

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України**

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БЕРЕЖНА ОЛЕНА ВАЛЕРІЇВНА

УДК 621.791.92

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ
ЗНОСОСТІЙКОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАВАРЮВАННЯ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології
технічні науки

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень, використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело _____ О.В. Бережна

Науковий консультант: Кузнецов Валерій Дмитрович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2018

Анотація

Для відновлення і зміцнення швидкозношуваних вузлів широке застосування знаходять електроконтактні способи нанесення покриттів. Однак технологічні можливості таких методів обробки обмежені низкою недоліків: наявністю тріщин, викришування навареного шару внаслідок низької міцності зчеплення покриття з основним металом при наварюванні на рекомендованих режимах, а також виникненням залишкових напружень в зоні приварювання покриття з поверхневим шаром виробу. Поверхневий шар металу покриття, нанесеного електроконтактним способом, найбільш навантажений і найменш захищений від шкідливих впливів, значно впливає на довговічність відновлених деталей. На структурний стан поверхневих шарів впливає не тільки остаточна операція обробки, але і їх послідовність.

У зв'язку з цим доцільне застосування технологій комбінованої обробки поверхні, розробка яких передбачає проведення всебічних, комплексних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на розробку рекомендацій щодо вдосконалення конкретних технологічних заходів.

В першому розділі проведено порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик альтернативних варіантів регенерації конструктивних розмірів робочих поверхонь деталей механізмів і машин. Для отримання заданих характеристик відновлених деталей необхідне постадійне перетворення властивостей у певній послідовності з поступовим наближенням значень характеристик до заданих. Стадійність обумовлюється тим, що не можна, з одного боку, перетворити одним методом одночасно всі різні властивості деталей, з іншого – отримати одразу на одній стадії (операції) весь комплекс необхідних значень результуючих параметрів. Необхідність підвищення продуктивності відновлювальних робіт, якості навареного металу, економії матеріальних ресурсів робить доцільним подальше всебічне дослідження та вдосконалення технології електроконтактного наварювання, а, отже, і подальший розвиток математичних методів їх розрахунку.

На основі аналізу літературних даних обґрунтовано доцільність досліджень, визначено мету роботи і сформульовані основні завдання дослідження.

У другому розділі досліджено структурний фактор мікропластичності зразків, наварених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей, у зв'язку з різною чутливістю привареного металу до концентрації напружень. Дослідження мікропластичності навареного металу проводили при деформації розтягування на зразках зі сталей марок 25, 40 і 40Х після нанесення на них покриття методом електроконтактного наварювання стрічками. Наварені зразки піддавали термічній обробці за різними режимами з метою зміни структури поверхневого шару, в результаті чого отримано 5 груп наварених зразків для дослідження мікропластичності. На основі експериментальних даних одержано рівняння регресії, що апроксимують залежність між напруженням і мікропластичною деформацією.

Встановлено, що менший опір мікропластичній деформації характерний для наварених зразків з переважаючою феритною структурою, у порівнянні з навареними зразками зі структурою сорбіту або трооститу, що свідчить про структурний стан, який обумовлює підвищення в'язкості руйнування. Низькі значення напружень вказують на більш високу рухливість дислокацій. Якщо у навареному зразку міститься відносно великий обсяг зерен надлишкового фериту, то перешкод для зрушень менше, а лінії ковзання прямолінійні. У сорбітних структурах з розвинутою межзеренною поверхнею перешкод для ковзання значно більше, що й обумовлює зігнутість ліній. Пластична деформація пов'язана з рухом дислокацій. У наварених зразках, малочутливих до концентрації напружень, малою є необхідна середня величина напружень для старту дислокацій. Отже, чим менше величина напружень, необхідна для початку руху дислокацій, тим менш чутливий зразок до концентрації напружень.

Так як тісний зв'язок може бути встановлений між поведінкою дислокацій (їх рухом, накопиченням у перешкод) і модулем пластичності, то відповідно, чим більший модуль пластичності, тим швидше накопичуються дислокації і тим вище чутливість матеріалу до концентрації напружень. Модуль пластичності (коефіцієнт зміцнення) визначали з використанням методів статистичного моделювання.

Встановлено, що найменшим коефіцієнтом зміцнення характеризуються наварені зразки з феритною структурою, найбільший коефіцієнт зміцнення мають нава-

рені зразки, що містять у структурі сорбіт. Зі збільшенням ступеню деформації коефіцієнт зміцнення знижується у всіх досліджених структурних станах, що вказує на залежність процесу пластичної течії від ступеню мікродеформації. Проведені дослідження схильності привареного металу в різних структурних станах до мікропластичної деформації дозволили виявити структуру навареного металу, яка є найменш чутливою до концентрації напружень: наявність в структурі нанесеного шару вільного фериту знижує інтенсивність накопичення дислокацій. Експериментально підтверджено вплив коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно до зразків, наварених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей з подальшою термічною обробкою.

В третьому розділі проведено вибір режиму індукційного нагріву при нормалізації відновленого поверхневого шару циліндричних деталей діаметром 50 – 120мм з конструкційних сталей. Отримано співвідношення, що дозволяють для обраного режиму за заданими значеннями кінцевої глибини прогріву, кінцевої і початкової температури та радіусу відновленої циліндричної деталі розрахувати питому потужність, час нагріву, частоту, швидкість зростання поверхневої температури та її розподіл по перетину деталі. Встановлено, що розраховані значення питомої потужності та часу нагріву відрізняються від відомих значень цих параметрів при наскрізному нагріві та нагріві під гартування, отже запропонований нагрів є перехідним між відомими режимами нагріву циліндричних деталей. При цьому даний нагрів забезпечує необхідне значення зростання поверхневої температури та близьке до заданого її розподілення вглиб прогрітого шару.

Розроблено склад теплоізолюючої суміші, що містить шаруваті з'єднання графіту та графіт ГЛ1. Її застосування знижує енерговитрати при термообробці наварених зразків після ТВЧ, підвищуючи ефект теплоізоляції з наближенням до умов обробки в печі. Встановлено, що уповільнене охолодження у теплоізолюючій суміші наварених зразків після локального нагріву ТВЧ забезпечує зниження швидкості охолодження від температури аустенізації до початку перлітного перетворення і підвищення середнього вмісту надлишкового фериту на 4,7% при збільшенні розміру зерна в середньому на 11мкм. При виборі раціональної технології відновлення та

зміцнення зношених виробів, велике значення мають не тільки характеристики стандартних механічних властивостей і межа витривалості, але й опір розвитку тріщин. Встановлено, що для деталей, які працюють в умовах циклічного навантаження, структура, одержана в результаті комбінованої обробки, є найменш чутливою до концентрації напружень.

В четвертому розділі запропоновано спосіб електроконтактного наварювання стрічками, який полягає у створенні на поверхні металевої стрічки з низьковуглецевої сталі для електроконтактного наварювання зносостійкого шару шляхом попередньої хіміко-термічної обробки електродної стрічки, причому на поверхні деталі перед електроконтактним наварюванням закріплюють стрічку у контакті з деталлю стороною, яка не піддавалась хіміко-термічній обробці. Дослідження зносостійкості нанесеного шару проводили за критерієм відносного зношення зразків за втратою ваги за визначений час. Мікротвердість наварених зразків оцінювали за напруженням відколу дифузійного шару у нанесеному покритті під дією алмазної піраміди. З метою дослідження впливу вмісту компонентів B_4C (x), $FeTi$ (y) і Al_2O_3 (z) у складі комплексної насичувальної суміші для обробки електродних стрічок на зносостійкість та тріщиностійкість навареного шару проведено оптимізацію складу з використанням регресійних моделей. Встановлено, що високими експлуатаційними показниками в умовах контактного та абразивного тертя відрізняється шар, наварений сталеву стрічкою, яка пройшла попереднє багатокомпонентне насичення у суміші $B_4C-FeTi-Al_2O_3$ наступного складу: 20-30% B_4C ; 30-40% $FeTi$; 20-40% Al_2O_3 ; 7% Na_3AlF_6 . Застосування при електроконтактному наварюванні одержаних електродних матеріалів з градієнтним розподілом властивостей забезпечує створення покриття з високими зносостійкими характеристиками на його поверхні та збереженням пластичних властивостей у м'якій феритній складовій, що запобігає росту тріщин та їх розповсюдженню в основний метал.

П'ятий розділ присвячено математичному моделюванню напружено-деформованого стану електродної стрічки у термомодеформаційному осередку під час електроконтактного наварювання. Під час розрахунку локальних характеристик напружено-деформованого стану у рамках зон пластичного змінення електродного ма-

теріалу шляхом числового інтегрування виконували визначення зусилля на ролику-електроді та моментів на деталі і на ролику-електроді. Моделювання теплового стану електродного матеріалу в термодформаційному осередку при електроконтактному наварюванні проводили згідно з теорією теплопровідності. Знаючи розподіл температурних полів вздовж електродного матеріалу в термодформаційному осередку, поточної товщини електродної стрічки і часу протікання імпульсу струму, одержано залежність для визначення необхідної сили струму.

Представлена сукупність аналітичних описів склала повний алгоритм з числового одномірного математичного моделювання процесу електроконтактного наварювання деталей електродною стрічкою, на основі якого розроблені програмні засоби для розрахунку основних енергосилових параметрів процесу. Особливістю запропонованої математичної моделі є коректне урахування розподілу теплових характеристик електродного матеріалу вздовж термодформаційного осередку, що відіграє важливу роль у формуванні з'єднання в процесі наварювання. Встановлено вплив величини коефіцієнту кінематичної асиметрії на зміну локальних енергосилових характеристик процесу.

З практичної точки зору результати автоматизованого проектування технологічних режимів електроконтактного наварювання дозволяють визначити всі вихідні параметри процесу для одержання заданої товщини навареного на поверхні виробу шару. В ході дослідження визначено інтегральні характеристики процесу електроконтактного наварювання. Показано, що змінення коефіцієнту кінематичної асиметрії, який залежить від співвідношення лінійних швидкостей ролику-електроду та деталі, є перспективним напрямком керування напружено-деформованим станом електродного матеріалу, що дозволяє регулювати процес деформації і приварювання матеріалу.

В шостому розділі представлено результати кінцево-елементного моделювання процесу електроконтактного наварювання стрічками. Згідно з одержаними даними процес нагріву електродного матеріалу ініціюється в зоні його контакту з поверхнею виробу. На цій же ділянці стрічки в термодформаційному осередку спостерігаються й максимальні температури протягом всього періоду нагріву. Основна ж ча-

стина електродного матеріалу в термодформаційному осередку знаходиться у в'язко-пластичному стані. Порівняння результатів моделювання просторово-часових теплових полів при різній тривалості протікання імпульсу електричного струму свідчить про нівелювання градієнту температурних показників у термодформаційному осередку, як по довжині, так і по ширині стрічки зі збільшенням часу дії імпульсу струму.

З метою дослідження впливу тривалості імпульсу електричного струму на зміну картини напружено-деформованого стану електродної стрічки у термодформаційному осередку проведено моделювання протікання процесу при $K_v=1,015$ та $K_v=1,0$. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження протягом всього часу протікання імпульсу зварювального струму в термодформаційному осередку мають місце в зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі. Високі значення еквівалентних напружень у зоні приварювання, яка має найвищу температуру у термодформаційному осередку, викликані дією сил третя, обумовлених наявністю кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання.

Згідно з результатами представленого кінцево-елементного моделювання у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею ролика-електроду деформаційні процеси практично не протікають, що пов'язане з низькими значеннями дотичних контактних напружень, характерними для цієї ділянки товщини стрічки, а також з порівняно низькою температурою матеріалу в цій зоні. З іншого боку еквівалентні деформації характеризуються максимальними значеннями в зоні контакту сталевих стрічки з поверхнею деталі. Така картина спостерігається при збільшенні тривалості імпульсу струму та добре узгоджується з даними розробленої кінцево-різницевої математичної моделі процесу електроконтактного наварювання стрічками.

Проведено аналіз впливу величини коефіцієнту кінематичної асиметрії на змінення дотичних контактних напружень в зоні контакту електродного матеріалу з поверхнею ролик-електроду та відновлюваної деталі. Встановлено, що збільшення коефіцієнту кінематичної асиметрії приводить до росту дотичних контактних напружень в зоні контакту електродного матеріалу з поверхнею відновлюваної деталі. Змінюється також і площа розповсюдження дотичних контактних напружень: у зоні

контакту електродної стрічки з поверхнею деталі вони займають значно більшу площу, ніж у зоні контакту стрічки з роликом-електродом.

Проведено експериментальні дослідження міцності зчеплення поверхні деталей з покриттям, нанесеним при різних значеннях коефіцієнту кінематичної асиметрії. Результати експериментів свідчать про підвищення міцності зчеплення нанесеного шару при збільшенні коефіцієнта кінематичної асиметрії.

На основі даних кінцево-різнецевої математичної моделі процесу електроконтактного наварювання стрічками проведено синтез регулятора процесу електроконтактного наварювання з використанням методу нечіткого нейрокерування на базі гібридної багатошарової мережі з прямим розповсюдженням. З використанням додатку MatLabFuzzyLogicToolbox одержано базу нечітких правил, а також розроблено структурну схему реалізації модуля нечіткого керування, реалізація якого дозволяє системі управління адаптуватися до зміни термічних та силових показників режиму електроконтактного наварювання стрічками та компенсувати змінні параметри теплового стану електродного матеріалу у термодформаційному осередку.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність результатів виконаного дослідження становлять наступні розробки:

- технологія відновлення циліндричних деталей, що включає термообробку привареного шару струмами високої частоти на задану глибину та охолодження у теплоізолюючій суміші;

- технологія комбінованого відновлення поверхонь деталей з попередньою хіміко-термічною обробкою електродного матеріалу, що забезпечує створення градієнтного розподілу властивостей по перетину привареного шару (Пат. 116099 Україна);

- методики проектування технологічного процесу електроконтактного наварювання, розроблені на основі встановлених закономірностей теплового та силового режимів;

- алгоритм автоматизованого проектування технологічних режимів процесу електроконтактного нанесення покриттів, що дозволяє визначити оптимальні режими наварювання з урахуванням заданих параметрів електродних матеріалів;

- спосіб підвищення міцності зчеплення привареного шару з поверхнею деталі за рахунок створення кінематичної асиметрії при електроконтактному наварюванні (Пат. 118044 Україна та 116024 Україна);

- програмні засоби, які дозволяють визначити енергосилові характеристики процесу формоутворення покриття при електроконтактному приварюванні з урахуванням поточного розподілу теплових та геометричних показників матеріалу у термомодеформаційному осередку;

- інформаційне та програмне забезпечення, база даних, необхідні для створення гібридної нейронної системи керування процесом електроконтактного наварювання.

Ключові слова: електродна стрічка, електроконтактне наварювання, кінцево-різницева математична модель, кінцево-елементна модель, режими електроконтактного наварювання.

Summary

For restoration and hardening of wearing parts, electrocontact surfacing methods are widely used. However, the technological possibilities of such processing methods are limited by a number of drawbacks: the presence of cracks, the chipping of the deposited layer due to the low adhesion strength of the coating to the base metal during surfacing at the recommended modes; and the occurrence of residual stresses in the welded zone of coating with the surface layer of the product. The surface layer of the coating metal deposited by the electrocontact method, is the most loaded and the least protected from harmful effects; it significantly affects the durability of the restored parts. The structural state of the surface layers is affected not only by the final processing operation, but also by their sequence.

Thereby, it is advisable to apply the technologies of combined surface treatment, the development of which provides for comprehensive, complex theoretical and experimental research aimed at developing recommendations for improving specific technological measures.

In the first section The comparative analysis of technical and economic characteristics of alternative variants for structural dimensions' regeneration of machine parts and machines working surfaces is carried out. To obtain the specified characteristics of the restored parts, stage-by-stage transformation of properties in a certain sequence with a gradual approximation of the characteristics values to the given ones is necessary. Staging is caused by the fact that, on the one hand, to convert all the heterogeneous properties of parts by one method at the same time is impossible, and on the other hand, to obtain at once in one stage (operation) the entire complex of the resulting parameters necessary values is impossible too. The need to increase the productivity of restoration work, the quality of deposited metal, and the saving of material resources make it expedient to further study and improve the technology of electrocontact surfacing, and, consequently, further development of the mathematical method of calculating them.

Based on the analysis of literary data, the reasonability of studies is substantiated, the purpose of the work is determined and the main tasks of the study are formulated.

In the second section the structural factor of samples microplasticity deposited by strips of constructional carbon steels, in connection with the different sensitivity of the deposited metal to the stress concentration is investigated. The study of the deposited metal microplasticity was carried out with tensile deformation on steels samples of 25, 40 and 40X grades after their coating by electrocontact surfacing by the tapes. The deposited samples were subjected to heat treatment in various regimes in order to change the structure of the surface layer, resulting in 5 groups of deposited samples for the microplasticity study. On the basis of experimental data, regression equations are obtained. They approximate the relationship between stress and microplastic deformation.

It was established that the lower resistance of microplastic deformation is typical of deposited samples with a predominantly ferrite structure, in comparison with the deposited samples with a sorbite or troostite structure. It indicates a structural state that causes an increase in the fracture toughness. Low stress' values indicate a higher mobility of dislocations. If the deposited sample contains a relatively large volume of excess ferrite grains, then there will be fewer obstacles for shifts, and slip lines will be rectilinear. In sorbite structures with a developed intergranular surface, the obstacles to

sliding are much larger, which causes the lines bow. Plastic deformation is associated with the motion of dislocations. In deposited samples, which are insensitive to stress concentration, the required mean stress rate for starting dislocations is small. Consequently, the smaller stress rate required to initiate the movement of dislocations, the less sensitive the sample to the stress concentration.

Since a close relationship can be established between the dislocations behavior (their motion, accumulation at obstacles) and the plasticity module, respectively, the larger the plasticity modulus, the faster dislocations accumulate and the higher the sensitivity of the material to the stress concentration. The plasticity modulus (hardening coefficient) was determined using statistical modeling methods.

It is established that deposited samples with a ferrite structure are characterized by the smallest hardening coefficient. Deposited samples containing sorbite in the structure have the highest hardening coefficient. With an increase in the deformation ratio, the hardening coefficient decreases in all the studied structural states, which indicates the dependence of the plastic flow process on the microdeformation ratio. Investigations of the deposited metal propensity in various structural states to microplastic deformation allowed to reveal the structure of deposited metal, which is the least sensitive to stress concentration. The presence of free ferrite in the structure of the deposited layer reduces the intensity of dislocation accumulation. The influence of the hardening coefficient on the sensitivity to stress concentration concerning samples deposited by stripes from structural carbon steels with further heat treatment is experimentally confirmed.

In the third section the choice of the induction heating mode during the normalization of the reconstructed surface layer of cylindrical parts 50-120 mm in diameter from structural steels was carried out. Proportions are obtained. They allow to calculate power density, heating time, frequency, the rate of the surface temperature growth and its distribution along the section of the workpiece for the selected regime using the specified values of the final heating depth, final and initial temperature, and the radius of the reduced cylindrical part. It is established that the calculated values of the power density and heating time differ from the known values of these parameters during through heating and hardening heat. Hence the proposed heating is transient between the known heating modes

of cylindrical parts. In this case, this heating provides the necessary value of the surface temperature growth and its distribution into the heated layer.

The composition of the heat-insulating mixture containing graphite laminated compounds and graphite GL1 was developed. Its application reduces power consumption during heat treatment of deposited samples after RF current, increasing the thermal insulation effect with the approach to the processing conditions in the furnace. It is found that slow cooling in heat-insulating mixture of deposited samples after local heating RF current reduces the rate of cooling from the austenite conditioning temperature to pearlite transformation start, and increases the average content of ferrite by 4.7% with an increase of grain size by 11 μm on average. When choosing a rational technology for recovery and hardening of worn-out products, the characteristics of the standard mechanical properties and the limit of stability, resistance to the development of cracks are of great importance. It is established that for components operating under conditions of cyclic loading, the structure obtained as a result of combined treatment is the least sensitive to stress concentration.

In the fourth section a method for electrocontact surfacing by tapes, which consists in creating on the surface of the metal strip from low carbon steel for electrocontact surfacing a wear-resistant layer by preliminary chemical-thermal treatment of the electrode belt was carried out. And on the surface of the part before the electrocontact surfacing, the tape is fixed in contact with the part by a side that was not subjected to chemical-thermal treatment. Investigations of the applied layer wear resistance were carried out by the criterion of the samples relative wear and weight loss over a certain time. The micro-brittleness of the deposited samples was estimated according to the spalling stress of the diffusion layer in the applied coating under the diamond pyramid. To investigate the influence of the components content B_4C (x), FeTi (y) and Al_2O_3 (z) in the complex saturating mixture for electrode strips treatment for wear resistance and fracture toughness of deposited layer. There was a composition optimization using regression models. It is found that in conditions of contact and abrasive frictions, the layer, deposited by steel strip, saturated in multicomponent mixture B_4C -FeTi- Al_2O_3 of the following composition: 20-30% B_4C ; 30-40% FeTi; 20-40% Al_2O_3 ; 7% Na_3AlF_6 before, has high performances. Application in electrocontact surfacing of produced electrode materials with a gradient distribution of properties

provides a coating with high wear-resistant characteristics on its surface and a maintenance of plastic properties in the soft ferrite component, which prevents the growth of cracks and their spreading into the parent metal.

The fifth section is devoted to the mathematical modeling of the electrode strip's stress-strain state in a thermal deformation focus during electrocontact surfacing. When calculating the local characteristics of the stress-strain state within the zones of electrode material plastic change by the numerical integration, the forces on the roller-electrode and the moments on the part and on the roller-electrode were determined. Modeling of the electrode material thermal state in the thermal deformation hearth during electrocontact surfacing was carried out according to the theory of thermal conductivity. Knowing the distribution of the temperature fields along the electrode material in the thermal deformation zone, the current thickness of the electrode tape, and the time of the current pulse, we obtained a dependence to determine the required current.

The presented set of analytical descriptions made a complete algorithm for numerical one-dimensional mathematical modeling of the parts' electrocontact surfacing by electrode tape. On this basis software for calculating the main energy-power parameters of the process was developed. A peculiarity of the proposed mathematical model is the correct consideration of the thermal characteristics of the electrode material distribution along the thermal deformation focus. This plays an important role in the formation of the association during the surfacing process. The effect of the kinematic asymmetry coefficient magnitude on the change in the local energy-force characteristics of the process is established.

Practically, the results of the automated design of electrocontact surfacing technological modes allow to determine all the initial parameters of the process to obtain a given thickness of the layer deposited on the product surface. In the course of the study, the integral characteristics of the electrocontact surfacing process were determined. It is shown that the change in the kinematic asymmetry coefficient, which depends on the linear velocities ratio of the roller-electrode and the part, is a promising direction of the stress-strain state control of the electrode material. This allows to regulate the process of the material deformation and surfacing.

In the sixth section the results of finite element modeling of the electrocontact surfacing by tapes are presented. According to the data obtained, the heating of the electrode material is initiated in the area of its contact with the surface of the detail. At the same section of the tape, the maximum thermal temperatures are observed in the thermal deformation zone during the whole heating period. The main part of the electrode material in the thermal deformation zone is in the viscous-plastic state. Comparison of the modeling results of spatio-temporal thermal fields for different duration of electric current pulse flow indicates the leveling of the temperature gradient in the thermal deformation center, both along the length and width of the tape with increasing time of the current pulse.

In order to study the effect of the electric current pulse duration on the change in the picture of the electrode strip stress-strain state in the thermal deformation zone, a modeling of the process flow was carried out at $K_v=1,015$ и $K_v=1,0$. It is established that the maximum equivalent stresses during the whole time of the welding current pulse in the thermal deformation heat take place in the zone of electrode tape contact with the surface of the part. High values of equivalent stresses in the deposition zone, which has the highest temperature in the thermal deformation zone, are caused by frictional forces conditioned by the kinematic asymmetry of the electrocontact surfacing process.

According to the results of the presented finite element modeling, the deformation processes practically do not occur in the contact zone of the electrode tape with the roller-electrode surface. This is caused by the low values of tangential contact stresses typical for this section of the tape thickness and also the relatively low temperature of the material in this zone. On the other hand, equivalent deformations are characterized by maximum values in the contact zone of the steel tape with the surface of the part. Such a picture is observed with increasing duration of the welding current pulse and agrees well with the data of the developed finite-element mathematical model of the electrocontact surfacing by tapes.

The effect of the kinematic asymmetry coefficient magnitude on the change in tangential contact stresses in the contact area of the electrode material with the surface of the roller-electrode and the remanufactured part is analyzed. It is established that an increase in the kinematic asymmetry coefficient leads to an increase in tangential contact stresses in

the contact zone of the electrode material with the surface of the remanufactured part. The area of tangential contact stresses also changes: in the zone of the electrode tape contact with the part surface, they occupy a larger area than in the contact zone of the tape with the roller-electrode.

Experimental studies of the adhesion strength of the parts' surface coated with different values of the kinematic asymmetry coefficient were carried out. The results of the experiments indicate an increase in the adhesion strength of the applied layer with an increase in the kinematic asymmetry coefficient.

On the basis of the data of the finite difference mathematical model for the process of electrocontact surfacing by tapes, a regulator of the electrocontact surfacing process was synthesized using the method of fuzzy neural control based on a hybrid multilayered network with direct propagation. Using the application of MatLabFuzzyLogicToolbox, a database of fuzzy rules was obtained, and a block diagram of the fuzzy control module implementation was developed. This implementation allows the control system to adapt to changes in the thermal and strength parameters of the electrocontact surfacing by tapes and to compensate for the changing parameters of the electrode material thermal state in the thermal deformation zone.

The practical value of the results. The practical value of the results of research performed investigation contains following developments:

- the technology for cylindrical parts recovery is developed, including heat treatment of the deposited layer by high frequency currents to a given depth and cooling of the thermal insulating mixture;
- the technology of combined surface recovery of parts with preliminary chemical-thermal treatment of electrode material was developed; it ensures the creation of a gradient distribution of properties along the cross-section of the deposited layer;
- methods for designing the technological process of electrocontact surfacing are proposed; they were developed on the basis of the thermal and power regimes established regularities;

- the algorithm for automated design of the electrocontact coating technological modes was developed, which allows to determine the optimum surfacing regimes taking into account the specified parameters of electrode materials;

- the method for increasing the adhesion strength of a deposited layer to the work-piece surface by creating a kinematic asymmetry in electrocontact surfacing was developed;

- software tools were developed; they allow to determine the energy-power characteristics of the coating fabrication during electrocontact surfacing, taking into account the current distribution of the thermal and geometric parameters of the material in the thermal deformation zone;

- infoware and software, database, necessary for the creation of a hybrid neural system for controlling the electrocontact surfacing process are offered.

Keywords: electrode tape, electrocontact surfacing, finite-difference mathematical model, finite element model, electrocontact surfacing modes.

Список публікацій здобувача

1. Бережная, Е.В., Гавриш, П.А., Грибков, Э.П. (2016). *Нанесение защитных покрытий порошковыми материалами: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-730-4.

Дисертантом проведено математичне моделювання формування покриття методом електроконтактного зміцнення шару, нанесеного газотермічним напиленням.

2. Грибков, Э. П., Кассов, В. Д., Данилюк, В. А., Бережная, Е.В. (2013). *Численное математическое моделирование процессов прокатки порошковых лент: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-652-9.

Дисертантом проведено моделювання поведінки часток порошкового середовища в термодформаційному осередку при виготовленні порошкової стрічки

3. Berezshnaya, Olena V., Gribkov, Eduard P., Kuznetsov, Valeriy D. (2016). Investigation of Thermostressed State of Coating Formation at Electric Contact Surfacing of

“Shaft” Type Parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 14 p, DOI: 10/1155/2016/6597317 [іноземне фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель, що враховує розподіл теплових властивостей та геометричних параметрів вздовж термодформаційного осередку в процесі електроконтактного наварювання компактним матеріалом.

4. Бережная, Е.В. (2014). Управление качеством металлопокрытия при восстановлении деталей электроконтактной наплавкой. *Все материалы. Энциклопедический справочник: ежемесячный научно-технический производственный журнал*, №6, С.22-26, ISSN: 1994-6260 (Print). [іноземне фахове видання]

5. Кузнецов, В.Д., Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Повышение износостойкости деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Проблемы тертя та зношування*, №3 (72), С.34-40, ISSN: 0370-2197 (Print). [e-LIBRARY, EBSCO, Google Scholar, WorldCat] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено технологію підвищення зносостійкості деталей, відроджених методом електроконтактного наплавлення, за рахунок використання комплексної хіміко-термічної обробки електродного матеріалу.

6. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Грибкова, С.Н. (2016). Термонапряженное состояние износостойкого слоя при электроконтактной наплавке. *Вісник Приазовського державного технічного університету: збірник наукових праць*, Вип. 32, С.99-108, ISSN: 2225-6733 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено модель термонапруженого стану зносостійкого шару при електроконтактному наплавленні циліндричних деталей, встановлено вплив температури нагріву нанесеного матеріалу на розподіл напружень та деформацій вздовж термодформаційного осередку під час наплавлення.

7. Бережная, Е.В., Грибкова, С.Н. (2013). Математическое моделирование напряжений и деформаций при электроконтактной наплавке проволок цилиндрических деталей. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць*, № 1 (14), С. 206-213, ISSN: 2218-1806 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель процесу формозміни електродного матеріалу при електроконтактному наплавленні.

8. Чепель, Ю.А., Бережная, Е.В., Кассов, В.Д. (2013). Микропроцессорная система управления электроконтактной наплавкой двумя роликовыми электродами. *Проблемы машиностроения*, №5, С.42-45, ISSN: 0131-2928 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено мікропроцесорну систему керування електроконтактним наплавленням двома роликовими електродами.

9. Бережная, Е.В. (2017). Влияние структуры металлопокрытия на сопротивление развитию трещин. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, Вып. 77, С.147-151, ISSN: 2219-5548 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

10. Бережная, Е.В. (2017). Выбор режима индукционного нагрева для нормализации наплавленных поверхностей цилиндрических деталей. *Вісник Приазовського державного технічного університету: збірник наукових праць*, Вып. 34, С.115-123, ISSN: 2225-6733 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

11. Бережная, Е.В., Кузнецов, В.Д., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. (2017). Исследование микропластической деформации металла, наплавленного электроконтактным методом. *Автоматическая сварка*, №7, С.24-28, ISSN: 0005-111X (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

Дисертантом досліджено структурний фактор мікропластичності зразків, наплавлених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей.

12. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Цывинда, Н.И. (2014). Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса восстановления деталей землеройных машин методом электроконтактной наплавки. *Гірничий вісник: науково-технічний збірник*, Вып. 97, С.201-205, ISSN: 2306-5435 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання].

Дисертантом розроблено математичну модель, яка дозволяє визначити основні технологічні параметри процесу електроконтактного наплавлення циліндричних деталей.

13. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2014). Электроконтактное упрочнение слоя, нанесенного газотермическим напылением. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць*, № 1, С.173-180, ISSN: 2218-1806 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель процесу електроконтактного зміцнення шару, нанесеного газотермічним напыленням.

14. Бережная, Е.В., Кассов, В.Д., Чепель, Ю.А. (2014). Структура системы управления микроконтроллером электроконтактной наплавки. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №1 (13E), С.16-21, ISSN: 2219-7869 (Online).

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(13%D0%95\)2014/nomer_1\(13E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(13%D0%95)2014/nomer_1(13E)_2014.html). [Фахове видання]

Дисертантом розроблено структуру системи керування силовою частиною обладнання для електроконтактного наплавлення.

15. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2014). Математическое моделирование формообразования слоя при электроконтактной наплавке проволокой деталей типа вал. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №6, Ч.2, С.93-96, ISSN: 1998-7927 (Print). [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель напружено-деформованого стану металу в термодформаційному осередку при електроконтактному наплавленні на основі методу полів ліній ковзання.

16. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гушин, А.М. (2014). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(32), С.6-9, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено машину тертя для дослідження триботехнічних параметрів матеріалів, що піддаються інтенсивному зношуванню.

17. Бережная, Е.В. (2011). Восстановление деталей станочного оборудования электроконтактной наплавкой порошковой проволокой. *Надійність інструменту та*

оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць, №29, С.175-179, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

18. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2012). Математическое моделирование напряжений и деформаций при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электроконтактной наплавки. *Обработка материалов давлением*, №1 (30), С.61-64, ISSN: 20762151 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом проведено вибір вихідних даних для математичного моделювання напружено-деформованого стану при виготовленні електродного матеріалу для електроконтактного наплавлення.

19. Грибков, Э.П., Данилюк, В.А., Бережная, Е.В. (2012). Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой электродной ленты. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №13 (184), Ч.1, С.74-79, ISSN: 1998-7927 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом визначено основні статистичні характеристики виготовлення електродного матеріалу для електроконтактного наварювання.

20. Бережная, Е.В. Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2012). Микроконтроллерная система мониторинга интенсивности износа наплавленного металла. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №2(27), С.141-144, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено мікроконтролерну систему моніторингу триботехнічних параметрів наплавленого металу.

21. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Селедцов, А.С. (2012). Методика и оборудование для экспериментального определения исходных данных на проектирование процессов обработки давлением дискретных сред. *Обработка материалов давлением*, №3(32), С.137-141, ISSN: 2076-2151 (Print). [Фахове видання].

Дисертант прийняв участь у розробці методики визначення фізико-механічних властивостей дискретних середовищ при їх ущільненні.

22. Бережная, Е.В. (2012). Современные методы повышения износостойкости землеройной техники. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №3 (28), С.33-36, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

23. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А. (2012). Машина трения для испытания на износостойкость металла наплавки. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №31, С.112-117, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено машину тертя зворотно-поступового руху.

24. Сатонин, А.В., Кассов, В.Д., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2013). Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при электроконтактной наплавке лент с использованием процессов прокатки. *Обработка материалов давлением*, №1 (34), С.30-35, ISSN: 2076-2151 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено математичну модель електроконтактного наплавлення осесиметричних тіл обертання металевими стрічками.

25. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2013). Устройство сжатия сварочных роликов для электроконтактной наплавки. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1 (30), С.143-148, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено пристрій стискання роликів-електродів для електроконтактного наплавлення.

26. Турчанин, М.А., Бережная, Е.В., Малыгина, С.В. (2013). Технико-экономические преимущества электроконтактной наплавки режущего инструмента. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №32, С. 198-201, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом здійснено обґрунтування вибору методу відновлення деталей, що працюють в умовах зношування

27. Данилюк, В.А., Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Разумович, О.О. (2013). Совершенствование технологии изготовления порошковых проволок сложной конструкции для восстановления деталей технологического оборудования. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №33, С. 47-51, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено конструкцію електродного матеріалу для наварювання.

28. Бережная, Е.В. Гуцин, А.М., Турчанин, М.А. (2015). Гибкоперенастраиваемый триботехнический комплекс для исследования износостойкости и долговечности

наплавлених режущих елементів робочих органів. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(34), С. 10-13, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено принципову електрокінетичну схему триботехнічного комплексу для імітаційного моделювання процесу зношування.

29. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П., Кузнецов, В.Д. (2017). Численное математическое моделирование процесса консолидации порошковой среды электроконтактным методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, №6 (1228), С. 15-20, ISSN: 2222-0631 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом проведено дослідження впливу технологічних режимів електроконтактного наварювання на розподіл температурних полів у термомодеформаційному осередку.

30. Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Кассов, В.Д., Наливайко, О.М. Машина тертя зворотньо-поступального руху. Патент №85987 України на корисну модель. МПК G01N3/56(2006.01). №и 2013 06952. Заявл. 03.06.2013. Опубл. 10.12.2013. Бюл.№23. 4с.

31. Грибков, Е.П., Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Кассов В.Д. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84241 України на корисну модель. МПК В23К 35/40(2006.01). №и 2013 05779. Заявл. 07.05.2013. Опубл. 10.10.2013. Бюл.№ 19. 4с.

32. Грибков, Е.П., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Чепель, Ю.А. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84906 України на корисну модель. МПК В23К 35/40 (2006.01). №и 2013 03311. Заявл. 18.03.2013. Опубл. 11.11.2013. Бюл.№21. 4с.

33. Сатонин, О.В., Бережна, О.В., Малигіна, С.В. Спосіб електроконтактного наплавлення. Патент №88576 України на винахід. МПК В23К 35/00 (2006.01). №и 2013 10799. Заявл. 09.09.2013. Опубл. 25.03.2014. Бюл.№.6. 4с.

34. Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. Спосіб визначення зварюваності різнорідних металів. Патент №106718 України на корисну модель. МПК В23К 31/12 (2006.01). №и 2015 08944. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 10.05.2016. Бюл. №9. 4с.

35. Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Гушчін, А.М. Стенд для випробування на надійність ріжучих елементів машин. Патент №107668 України на корисну модель. МПК G01N 3/56 (2006.01). №и 2015 08938. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 24.06.2016. Бюл.№.12. 5с.

36. Бережна, О.В., Кузнецов, В.Д. Спосіб оцінювання міцності зчеплення зносостійкого шару, нанесеного електроконтактним методом. Патент №116024 України на корисну модель. МПК G01N 19/04 (2006.01). №и 2016 09945. Заявл. 28.09.2016. Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9. 4с.

37. Бережна, О.В., Лапченко, О.В., Кузнецов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №116099 України на корисну модель. МПК B23K 11/00, B22D 19/00, B22D 19/06 (2006.01). №и 2016 11237. Заявл. 07.11.2016. Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9. 3с.

38. Бережна, О.В., Грибков, Е.П., Кузнецов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №118044 України на корисну модель. МПК B23K 11/00, B22D 19/00, B22D 19/06 (2006.01). №и 2016 12406. Заявл. 06.12.2016. Опубл. 25.07.2017. Бюл. №14. 4с.

39. Berezshnaya, O., Shepel, Ju., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2015). Development of welding equipment for the production of layered tapes. *Metallurgical and Mining Industry*, №12, pp.332-338, ISSN: 20760507 (Print)

Дисертантом розроблено технологію та обладнання для виготовлення багатошарової електродної стрічки для електроконтактного відновлення зношених деталей.

40. Berezshnaya, O., Kuznetsov, V., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2016). Determining of the structural schemes and performance of linear DC motor control system for welding equipment development in the layered tapes production. *Metallurgical and Mining Industry*, №1, pp.154-157, ISSN: 20760507 (Print)

Дисертантом розроблено конструктивні особливості обладнання для виготовлення багатошарових стрічок для електроконтактного наварювання

41. Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на физико-механические характеристики по-

крытия. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №38, С.125-131, ISSN: 2222-9000.

Дисертантом досліджено вплив комбінованої технології відновлення на фізичний стан шару, нанесеного електроконтактним методом.

42. Кассов, В.Д., Грибков, Э.П., Грибкова, С.Н., Бережная, Е.В. (2016). Конечно-элементное моделирование внедрения твердых частиц в оболочку при прокатке порошковых лент. *Обработка материалов давлением*, №2 (43), С.36-40, ISSN: 2076-2151 (Print).

Дисертантом проведено вибір вихідних даних для кінцево-елементного моделювання впровадження твердих часток при виготовленні порошкових стрічок.

43. Гавриш, П.А., Бережная, Е.В., Соболев-Бутовченко, Е.А. (2016). Газотермическое напыление антифрикционного покрытия деталей перегружателя ТАКРАФ. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №2 (20E), С. 49-54, ISSN: 2219-7869 (Online).

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(20%D0%95\)_2016/article/10.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(20%D0%95)_2016/article/10.pdf).

Дисертантом розроблено методику проведення експериментів.

44. Бережная, Е.В., Разживин, А.В. (2014). Построение интеллектуальной системы управления процессом электроконтактной наплавки. *Актуальные проблемы в машиностроении: Международная научно-практическая конференция (Новосибирск)*, №1, С.49-55, ISSN: 2313-1020 (Print). [e-LIBRARY].

Дисертантом розроблено інтелектуальну систему керування процесом електроконтактного наплавлення з послідовним увімкненням програмного та нейронного регуляторів.

45. Бережная, Е.В. (2017). Технологические особенности термообработки деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Актуальные проблемы в машиностроении: Международная научно-практическая конференция (Новосибирск)*, №1, С.126-131, ISSN: 2313-1020. [e-LIBRARY].

46. Berezshnaya, Olena, Razzhivin, Aleksey, Zubenko, Ekaterina (2016). Synthesis of Neural Network Regulator for Electrocontact Surfacing on the Basis of Fuzzy Control

Module. *Proceedings of the International Symposium on Embedded Systems and Trends in Teaching Engineering: TEMPUS (Nitra)*, pp.189-194, ISBN: 978-80-558-1041-6.

Дисертантом розроблено методику синтезу регулятора електроконтактного наварювання та модуля нечіткого нейронного керування.

47. Бережная, Е.В. (2011). Перспективные направления снижения затрат на восстановление деталей подъемно-транспортного оборудования, работающих в условиях абразивного износа. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.16, ISBN: 978-966-379-640-6.

48. Бережная, Е.В. (2011). Энерго- и ресурсосберегающая технология восстановления изношенных деталей дорожно-строительной техники. *Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: 3-я міжвузівська науково-технічна конференція (Донецьк)*, С.61-63.

49. Бережная, Е.В. (2012). Стабилизация процесса электроконтактной наплавки режущего инструмента. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: X Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 13, ISBN: 978-966-379-640-6.

50. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гушин, В.М. (2012). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: 4-а міжвузівська науково-технічна конференція (Донецьк)*, С.120.

Дисертантом здійснено постановку наукового завдання дослідження, вибір наукового підходу до його розв'язання.

51. Бережная, Е.В. (2013). К расчету температурного поля при электроконтактной наплавке многослойных покрытий. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: IV Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 31, ISBN: 978-966-379-647-5.

52. Разживин, А.В., Бережная, Е.В. (2014). Система автоматизации процесса управления тепловым режимом электроконтактной наплавки. *Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология*

и надежность машин, приборов и оборудования: Международная научно-техническая конференция (Вологда), С. 174-176, ISBN: 978-5-87851-522-1.

Дисертантом здійснено обґрунтування вибору системи автоматизованого керування процесом електроконтактного наплавлення.

53. Бережная, Е.В. (2015). Тепловые процессы при консолидации порошковой среды электроконтактным способом. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XIII міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ), С. 14, ISBN: 978-966-379-640-6.*

54. Бережная, Е.В. (2015). Повышение ресурса работы технологического оборудования литейных цехов комбинированной обработкой. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: V Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ), С. 30-32, ISBN: 978-966-379-647-5.*

55. Бережна, О.В., Разживін, О.В. (2016). Розробка бази даних автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наплавлення деталей машин. *Проблеми та перспективи розвитку науки і техніки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро), С. 53.*

Дисертантом розроблено базу даних автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наплавлення та проведено перевірку її інформативності.

56. Бережная, Е. В. (2016). Стойкость восстановленных валов, работающих в условиях циклического нагружения. *Университетская наука – 2016: Международная научно-техническая конференция (Мариуполь), Т. 2, С. 130–131.*

57. Бережная, Е.В. (2016). Выбор режима нагрева наплавленной цилиндрической детали токами высокой частоты. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XIV Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ), С.14, ISBN: 978-966-379-640-6.*

58. Бережная, Е.В. (2017). Моделирование теплового состояния композиционного материала при электроконтактной наплавке. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VII Міжнародна науково-практична конференція (Чернігів), С. 61-63.*

59. Бережная, Е.В. (2017). Термічна обробка відновлених електроконтактним методом циліндричних деталей. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: VI Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.18, ISBN: 978-966-379-647-5.

60. Бережная, Е.В. (2017). Повышение надежности деталей методом комбинированной обработки поверхности. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро)*, Ч. 2, С. 282-284.

ЗМІСТ

| | Стор. |
|--|-------|
| АНОТАЦІЯ | 2 |
| ЗМІСТ | 28 |
| ВСТУП | 32 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ | 40 |
| 1.1. Аналіз роботи виробів, що працюють в умовах циклічного навантаження | 40 |
| 1.2. Аналіз роботи виробів, що працюють в умовах абразивного зношування | 44 |
| 1.3. Сутність способу електроконтактного наварювання | 49 |
| 1.4. Матеріали, що застосовуються для електроконтактного наварювання | 58 |
| 1.5. Методи підвищення експлуатаційних характеристик покриттів хіміко-термічною обробкою | 72 |
| 1.6. Аналіз методів зниження залишкових напружень і підвищення втомної міцності навареного шару | 82 |
| 1.7. Аналіз існуючих математичних моделей процесу електроконтактного наварювання | 87 |
| 1.8. Системи керування електроконтактним наварюванням | 95 |
| Висновки до розділу 1 | 106 |
| РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ СТРУКТУР МЕТАЛУ, НАНЕСЕНОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ МЕТОДОМ | 108 |
| 2.1. Методика дослідження та обробки експериментальних даних | 109 |
| 2.2. Закономірності мікропластичної деформації залежно від структури нанесеного шару | 113 |
| 2.3. Вплив структури нанесеного шару на змінення коефіцієнту зміцнення | 130 |
| Висновки до розділу 2 | 135 |

| | |
|--|-----|
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «ВАЛ», ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ | 137 |
| 3.1. Теплотехнічний розрахунок режиму індукційного нагріву з регламентованими параметрами | 137 |
| 3.1.1. Обґрунтування режиму нагріву | 137 |
| 3.1.2. Основні розрахункові співвідношення | 140 |
| 3.1.3. Розрахунок параметрів нагріву | 144 |
| 3.2. Дослідження впливу теплоізолюючого середовища на структуру нанесеного шару | 161 |
| 3.3. Дослідження впливу структури поверхневого шару на швидкість зростання тріщин і втомну міцність | 175 |
| Висновки до розділу 3 | 191 |
| РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОДНИХ СТРІЧОК НА СТРУКТУРУ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ НАВАРЕНОГО ШАРУ | 192 |
| 4.1. Вибір способу попередньої обробки електродних стрічок | 192 |
| 4.2. Триботехнічний комплекс для дослідження зносостійкості навареного шару | 204 |
| 4.3. Вибір складу насичувальної суміші для багатокомпонентної хіміко-термічної обробки електродних стрічок | 209 |
| Висновки до розділу 4 | 220 |
| РОЗДІЛ 5. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ І МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ | 222 |
| 5.1. Математичне моделювання термодформаційного процесу в зоні формування з'єднання при електроконтактному наварюванні стрічкою | 222 |
| 5.2. Аналіз термодформаційних процесів при формуванні навареного шару | 235 |

| | |
|--|-----|
| | 30 |
| Висновки до розділу 5 | 248 |
| РОЗДІЛ 6. КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ШАРУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ГІБРИДНОЇ НЕЙРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАВАРЮВАННЯ | 250 |
| 6.1. Кінцево-елементне моделювання процесу електроконтактного наварювання стрічкою | 250 |
| 6.2. Проектування системи керування процесом електроконтактного наварювання | 279 |
| 6.2.1. Структура системи автоматизації керування процесом електроконтактного наварювання | 279 |
| 6.2.2. Оцінка ступеню інформативності бази даних процесу електроконтактного наварювання | 284 |
| 6.2.3. Корегування та аналіз параметрів бази даних технологічного процесу електроконтактного наварювання | 288 |
| 6.2.4. Синтез регулятора та алгоритму керування процесом електроконтактного наварювання на основі бази даних | 293 |
| 6.3. Впровадження результатів роботи | 309 |
| Висновки до розділу 6 | 313 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 315 |
| ПОСИЛАННЯ | 318 |
| ДОДАТОК А. Лістинг програми для розрахунку енергосилових параметрів режиму електроконтактного наварювання | 354 |
| ДОДАТОК Б. Довідка про використання результатів роботи у комплексі науково-дослідницьких робіт спільно з ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» | 360 |
| ДОДАТОК В. Акт впровадження у «Науково-дослідному і проектно-технологічному інституті машинобудування» | 362 |
| ДОДАТОК Г. Акт використання в Донецькому фізико-технічному інституті ім. А. А. Галкіна НАН України | 364 |
| ДОДАТОК Д. Акт впровадження у фермерському господарстві | 366 |

| | |
|---|-----|
| ДОДАТОК Е. Акт впровадження у науково-виробничій компанії «Регіон Інноватика Еніон – Балтика» | 368 |
| ДОДАТОК Є. Акт впровадження у Державному підприємстві «Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енергосталь» Міністерства промислової політики України | 370 |
| ДОДАТОК Ж. Акт впровадження на ПАТ «Завод напівпровідників» | 372 |
| ДОДАТОК З. Акт впровадження на ЗАТ «Краматорський завод металоконструкцій» | 374 |
| ДОДАТОК И. Акт впровадження на ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» | 376 |
| ДОДАТОК І. Акти використання за госпдоговорами | 378 |
| ДОДАТОК К. Акт впровадження у навчальний процес | 382 |
| ДОДАТОК Л. Список публікацій здобувача | 384 |

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості, пов'язаних з виходом на світовий ринок, перед виробниками вітчизняної промислової продукції стоїть проблема зниження трудомісткості виробництва, його собівартості, економії матеріальних і енергетичних ресурсів. Як показує досвід передових держав, успішність вирішення цієї проблеми багато в чому визначається рівнем розвитку зварювального виробництва.

Актуальність теми. Можливості підвищення продуктивності і терміну служби обладнання, визначаються експлуатаційною стійкістю деталей, що піддаються в процесі роботи зношуванню та низька експлуатаційна стійкість яких призводить до передчасного виходу машин з ладу, зниження їх функціональних якостей. Економічний збиток від зношування елементів машин, механізмів, інструментів не обмежується вартістю безворотніх витрат металу, а носить лавинний характер. Стирання деталей приводить до падіння їх продуктивності, зниження якості продукції, що виготовляється, передчасній заміні деталей запасних частин та інструментів новими. Вартість нових запчастин значно вища вартості металу, який витрачається в результаті зношування. Одну з головних груп зношених деталей, які на даний час масово відновлюються, складають вали різних машин і механізмів зі зношеними посадочними і опорними шийками, схильні до дії циклічних навантажень в процесі експлуатації. У більшості випадків саме ці деталі лімітують ресурс вузлів і агрегатів машин. Коефіцієнт їх відновлення при капітальному ремонті машин складає 0,25 ... 0,95. З точки зору завдань підвищення ефективності відновлення працездатності зношених деталей, що мають невеликі діаметральні розміри і незначні втрати робочої поверхні, шляхом їх нарощування до номінальних розмірів при мінімальному рівні термодинамічних збурень, що вносяться до стану основного металу, успішно застосовується електроконтактне наварювання стрічками, які при простоті виготовлення дозволяють отримувати за один прохід плаский наварений шар необхідної ширини і необхідного хімічного складу. Електроконтактне наварювання стрічками є електро-термічним процесом зі складним взаємозв'язком між параметрами, характер зміни яких в реальних умовах залежить від цілого ряду чинників, які протягом імпульсу

зварювального струму змінюються в широких межах. Таким чином, електроконтактне наварювання стрічками являє собою сукупність операцій нагрівання, деформації та охолодження водою, в результаті яких формування остаточної структури нанесеного шару характеризується неоднорідністю дисперсності і механічних властивостей, а також різною чутливістю до концентрації напружень. Регламентування комплексу показників фізико-механічного характеру (механічні властивості металу поверхневих шарів, мікроструктура поверхневого шару, яка має низьку чутливість до концентрації напружень) є значним резервом забезпечення надійності відновлених деталей. Багатоваріантність завдань, що вирішуються при дослідженні процесів формоутворення шару, нанесеного електроконтактним наварюванням стрічками, передбачає доцільність використання математичних моделей різного рівня складності, що забезпечують в кожному конкретному випадку отримання достатніх обсягів інформації. У зв'язку з цим проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на забезпечення зносостійкості і якості нанесеного металу, економії матеріальних ресурсів на основі ефективних технологічних рекомендацій, представляє собою актуальну задачу, що має для підприємств промислового комплексу України важливе наукове і практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких представлені в дисертаційній роботі, виконані у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського «Дослідження впливу зварювальних теплових, термомеханічних, статистичних процесів на структуру, технологічну міцність, якість металевих і композиційних матеріалів при зварюванні та конструкцій на їх основі» (номер державної реєстрації 0116u006106), а також держбюджетних науково-дослідних робіт «Обґрунтування напрямків підвищення надійності і довговічності вантажопідйомного, транспортуючого, будівельного і гірського устаткування на стадії проектування» (номер державної реєстрації 0112U006712), «Удосконалення конструкції та технологічної підготовки виробництва підйомно-транспортних будівельних і гірничих машин» (номер державної реєстрації 0115U004732) та у рамках конкурсних проєктів з найважливіших напрямків науки і технологій, що фінансуються МОН України «Визначення механізмів та ство-

рення теорії електроімпульсної консолідації нових порошкових матеріалів» у якості відповідального виконавця (номер державної реєстрації 0114U002537), «Удосконалення технології виробництва електродних матеріалів та процесу електроконтактного наплавлення» (номер державної реєстрації 0118U002849), а також у рамках комплексу науково-дослідних робіт, виконаних спільно з ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ). Внесок автора як виконавця полягає в удосконаленні технології виготовлення електродних матеріалів та електроконтактного наварювання стрічками, в оптимізації технологічних параметрів, у розробленні технологічних рекомендацій.

Мета і задачі дослідження. Розвиток наукових засад процесу зносостійкого електроконтактного наварювання стрічками та розробка на цій основі технологічних прийомів з підвищення ефективності та якості відновлення виробів електроконтактним методом.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні основні *задачі*:

- експериментально дослідити мікроструктуру нанесеного електроконтактним методом шару, що характеризуються низьким опором до мікропластичної деформації, як фактору накопичення втомних ушкоджень стосовно до деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження;

- провести розрахунок параметрів нагріву та вибір умов подальшого охолодження при термічній обробці привареного шару для створення структури, що характеризується низьким опором до мікропластичної деформації;

- експериментально дослідити вплив попередньої хіміко-термічної обробки електродних стрічок на фізико-механічні характеристики покриття, нанесеного електроконтактним наварюванням;

- провести теоретичний аналіз та розробку методики розрахунку енерго-силових параметрів формування покриттів різного функціонального призначення;

- розробити програмні засоби з автоматизованого проектування технології та вибору параметрів електроконтактного наварювання на базі математичного моделювання процесу.

Об'єкт дослідження. Нанесення функціональних покриттів електроконтактним методом.

Предмет дослідження. Закономірності формування функціонального шару в термодформаційному осередку з визначенням умов і способів регульованого впливу на його формоутворення при електроконтактному наварюванні; матеріали, технологія для реалізації електроконтактного наварювання.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено метод кінцевих елементів, реалізований у спеціальних програмних комплексах, а також основні положення теорії зварювальних процесів, пластичності та теплопровідності суцільного середовища. Експериментальні дослідження виконано на вимірювальних та моделюючих установках у лабораторних, а натурні випробування – у промислових умовах; містять методи вимірювання зварювально-технологічних, фізико-механічних характеристик, а саме дослідження мікропластичної деформації наварених зразків, кількісний металографічний аналіз покриття, дослідження швидкості зростання втомних тріщин при циклічному навантаженні та втомної міцності наварених зразків, випробування на зносостійкість та напруження відколу навареного шару, а також дослідження міцності зчеплення нанесеного покриття з поверхнею зразку. Математична обробка результатів дослідження виконувалась з використанням існуючого прикладного програмного забезпечення, методів статистичного аналізу, а також спеціально створеного пакету програм для оптимізації режимів електроконтактного наварювання. Достовірність одержаних результатів підтверджується їх використанням на промислових підприємствах України.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні основні результати виконаних теоретичних та експериментальних досліджень:

- набули подальшого розвитку уявлення про закономірності впливу коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно до деталей, відновлених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей, урахування яких дозволило знизити швидкість зростання втомної тріщини на 15,8-17,3% та підвищити втомну міцність на 17-20% за рахунок корегування кількісного співвідношення структурних складових у привареному шарі та їх розмірів;

- набув подальшого розвитку розрахунок параметрів індукційного нагріву з постійною питомою потужністю стосовно до відновлюваного поверхневого шару циліндричних деталей діаметром 50-120 мм, який є перехідним між наскрізним та гартівним нагрівом та забезпечує проведення нормалізації поверхневого шару при заданому розподілі температур у діапазоні 880...750°C по глибині прогріву з необхідною швидкістю нагріву не більше 50°C/с;

- вперше встановлено, що введення до теплоізолюючої сипучої суміші на основі сріблястого графіту добавок шаруватих з'єднань графіту дозволяє збільшити вміст надлишкового фериту у привареному шарі на 4,7% за рахунок підвищення ефекту термоізоляції відновлених деталей з наближенням до умов обробки у печі;

- вперше встановлено, що попереднє багатоконпонентне насичення сталеві стрічки В, Ті, АІ забезпечує зносостійкість привареного шару, яка може бути порівняна зі зносостійкістю борированного шару, при одночасному підвищенні напруження відколу у 2,5 рази;

- на основі чисельного рекурентного вирішення кінцево-різнецевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму шару, що приварюється, вперше розроблено математичну модель формування покриття, особливістю якої є урахування поточного розподілу термічних властивостей та геометричних параметрів вздовж термодформаційного осередку в процесі електроконтактного наварювання. З використанням даної моделі сформульовано та вирішено задачу з автоматизованого проектування технологічних режимів процесу електроконтактного нанесення покриттів;

- вперше на основі кінцево-різнецевої та кінцево-елементної моделі встановлено, що при створенні кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання з величиною коефіцієнту $K_v=1,015$ міцність зчеплення відновлених зразків збільшується на 24,3-26,8%.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність результатів виконаного дослідження становлять наступні розробки:

- технологія відновлення циліндричних деталей, що включає термообробку привареного шару струмами високої частоти на задану глибину та охолодження у теплоізолюючій суміші;

- технологія комбінованого відновлення поверхонь деталей з попередньою хіміко-термічною обробкою електродного матеріалу, що забезпечує створення градієнтного розподілу властивостей по перетину привареного шару (Пат. 116099 Україна);

- методики проектування технологічного процесу електроконтактного наварювання, розроблені на основі встановлених закономірностей теплового та силового режимів;

- алгоритм автоматизованого проектування технологічних режимів процесу електроконтактного нанесення покриттів, що дозволяє визначити оптимальні режими наварювання з урахуванням заданих параметрів електродних матеріалів;

- спосіб підвищення міцності зчеплення привареного шару з поверхнею деталі за рахунок створення кінематичної асиметрії при електроконтактному наварюванні (Пат. 118044 Україна та 116024 Україна);

- програмні засоби, які дозволяють визначити енергосилові характеристики процесу формоутворення покриття при електроконтактному приварюванні з урахуванням поточного розподілу теплових та геометричних показників матеріалу у термомодеформаційному осередку;

- інформаційне та програмне забезпечення, база даних, необхідні для створення гібридної нейронної системи керування процесом електроконтактного наварювання.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора в дисертаційній роботі полягає в обґрунтуванні загальної її концепції; постановці мети, визначені завдань і самостійному виборі наукових підходів до їх вирішення, формуванні програми досліджень, розроблені математичних моделей, підготовці експериментів, формулюванні закономірностей, аналізі і узагальненні результатів теоретичних і експериментальних досліджень. При підготовці публікацій за результатами досліджень внесок автора був визначальним.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі зварювального виробництва зварювального факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» з участю консультанта д.т.н., проф. Кузнецова В.Д.

Робота є результатом самостійних досліджень Бережної О.В.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на ІХ Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2011); 3-й міжвузівській науково-технічній конференції «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (м. Донецьк, 2011); Х Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2012); 4-й міжвузівській науково-технічній конференції «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (м. Донецьк, 2012); ІV Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (м. Вологда, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы в машиностроении» (м. Новосибірськ, 2014); ХІІІ Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2015); V Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2015); International Symposium on Embedded Systems and Trends in Teaching Engineering (TEMPUS) (Nitra, 2016); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки і техніки» (м. Дніпропетровськ, 2016); Міжнародній науково-технічній конференції «Университетская наука – 2016» (м. Маріуполь, 2016); ХІV Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы в машиностроении» (м. Новосибірськ, 2017);

VI Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2017); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка машин – основна складова прикладної механіки» (м. Дніпро, 2017); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено у 60 науково-технічних роботах, у тому числі 2 монографії, 27 статей у фахових наукових виданнях (з них 2 статті у виданнях іноземних держав, 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 22 публікації в інших наукових виданнях та збірниках конференцій. Новизна розробок підтверджена 9 патентами України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 395 сторынок, у тому числі 270 сторінок машинописного тексту, 133 рисунки і 41 таблицю, перелік використаних джерел із 370 найменувань, додатки на 42 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ

Основні напрямки економічного розвитку України передбачають зростання промислового виробництва, підвищення якості продукції, що випускається, створення ефективних технологічних процесів [1]. Здійснення намічених планів, як показує досвід розвинутих суспільств, неможливе без використання і подальшого розвитку наварювання, роль якого в умовах економії енергетичних ресурсів та дефіцитних матеріалів, як засобу підвищення довговічності швидкозношуваних деталей машин та їх багатократного відновлення, є пріоритетною [2-4].

В якості вихідних передумов теоретичних досліджень використано наукові положення, які містяться в трудах Б.Є. Патона, В.І. Махненка, В.А. Вінокурова, Н.Н. Рикаліна, І.І. Фрумїна, І.Р. Пацкевича та інших визнаних вітчизняних і закордонних спеціалістів у галузі теорії зварювальних процесів, а також результати робіт Е.С. Каракозова, Ю.В. Кліменка, А.В. Поляченка, В.І. Черноїванова, В.А. Наливкіна, Н.Н. Дорожкіна, В.Ф. Квасницького, Г.К. Харченка, С.І. Кучука-Яценка та інших провідних спеціалістів у галузі ремонту машин.

Необхідність підвищення продуктивності відновлювальних робіт, якості навареного металу, економії матеріальних ресурсів робить доцільним подальше всебічне дослідження та вдосконалення технології наварювання, а, отже, і подальший розвиток математичних методів їх розрахунку.

1.1. Аналіз роботи виробів, що працюють в умовах циклічного навантаження

Згідно з даними [5] експлуатаційна надійність та покращення функціональних можливостей машин та обладнання в умовах їх експлуатації є найважливішою науково-технічною проблемою, яка лежить в основі створення промислово-

го виробництва та ремонту сучасної техніки [5]. Багаторічна практика підтверджує, що довговічність і експлуатаційну надійність техніки вітчизняного виробництва, що визначається надійністю та якістю деталей і вузлів обладнання, неможна визнати задовільною. Однією з важливих умов підвищення надійності техніки є збільшення обсягів поставок запасних частин і відновлення деталей, як вважають автори [6]. Актуальність проблеми відновлення деталей підтверджується ще й тим, що при переплавленні зношених деталей безворотні втрати металу складають до 40 % (корозія, вигоряння). Собівартість відновлення зношених деталей зазвичай складає 30...70% від ціни нових, придбання яких вимагає значних фінансових витрат, а ресурс відновлених деталей часто значно вищий за ресурс нових, завдяки використанню ефективних способів відновлення та зміцнення згідно з даними [7]. На даний час даних з комплексного вирішення питань підвищення надійності машин, відновлення та зміцнення деталей машин із урахуванням структурних і фазових перетворень, що протікають при електроконтактному наварюванні недостатньо [8]. Згідно з даними [9] економічний збиток від зношування та виходу з експлуатації деталей та елементів машин, механізмів, інструментів не обмежується вартістю безворотніх втрат металу, а носить «лавинний» характер [9]. Стирання деталей приводить до зміни геометричних параметрів деталей, падіння продуктивності їх роботи та роботи вузлів та механізмів в цілому, і, як наслідок, зниження якості продукції, що виготовляється, передчасній заміні деталей запасними частинами та інструментів новими. Як свідчать результати [10], вартість нових запчастин значно вища вартості металу, який втрачається в результаті зношування [10].

Значення вагового зносу, в результаті якого деталі механізмів та машин є непридатним до подальшої ефективної експлуатації, не перевищує 0,5 %, а по деталям прецизійної групи ця величина складає менше 0,1 % [11]. Витрати робочого часу на заміну зношених деталей, пов'язані з передчасним виходом машин з ладу, склада-

ють 30-40%, причому витрати металу на виробництво змінних запасних частин перевищують 20% щорічної виплавки металу [12].

Одну з головних груп зношених деталей, які на даний час масово відновлюються, складають вали різних машин і механізмів та ріжучий інструмент сільськогосподарської техніки: посадочні місця та шийки валу, посадочні місця під муфти зчеплення та стопорні місця шийок під підшипники кочення; шпинделі токарних, свердлильних, фрезерних верстатів, вали токарних багаторізцевих верстатів, сушильних барабанів, формувальних машин, вібросит, дискові борони, лемехи плугів, лапи культиваторів та ін. [13-15 та ін.]. В більшості випадків саме ці деталі лімітують ресурс роботи вузлів і агрегатів машин, а отже від їх експлуатаційної стійкості залежить також і якість виготовленої продукції. Коефіцієнт відновлення вказаних типів деталей при капітальному ремонті машин складає 0,25...0,95 згідно з даними [13]. Значну частину відновлюваних деталей машин із зношеними посадочними та стопорними шийками складають різні вали та осі, які зазнають в процесі експлуатації дію циклічних навантажень [16-19].

На характеристики стійкості до втрати працездатного стану елементів складних технічних систем впливають як внутрішні конструктивні фактори, які залежать від призначення та властивостей елемента, так і сукупність зовнішніх факторів, які визначаються як умови експлуатації машин і обладнання [20].

Довжина зношених валів складає 100...4000 мм, проте понад 90% цих деталей мають довжину не більше 1000 мм. Діаметри валів дорівнюють 12...210мм, але у 98 % валів діаметр не перевищує 60 мм. Середнє значення маси складає близько 3 кг [6, 21-23]. При цьому найчастіше дефекти з'являються на посадочних поверхнях під підшипники [24-25]. Основними дефектами шліцевих валів є зношення опорних шийок, зношення та руйнування шліців, деформація валу, зношення різбових ділянок. Зношення шийок під шарикопідшипники не перевищує 0,3 мм [13]. Зношення шийок, які сполучаються із сальниками та втулками, може досягати 0,6...0,9 мм [6]. Шліці зношуються переважно у верхній частині бокової поверхні.

Близько 90% шліців автомобілів має знос 0,4...0,6 мм, а решта 10% – не більше 1мм. Поверхні під підшипники відновлюють при зношуванні більше 0,017...0,060 мм; поверхні нерухомих з'єднань (місця під колодиці зі шпонковими пазами та ін.) за рахунок додаткових деталей – при зношуванні понад 0,04...0,13мм; поверхні рухомих з'єднань – при зношуванні понад 0,4...1,3 мм; під ущільнення – понад 0,15...0,20 мм. Шпонкові пази відновлюють при зношуванні по ширині понад 0,065...0,095 мм; шліцеві поверхні – при зношуванні понад 0,2...0,5 мм [11, 26]. Зі всієї сукупності відновлюваних поверхонь валів 46 % зношуються до 0,3 мм; 27 % – від 0,3 до 0,6 мм; 19 % – від 0,6 до 1,2 мм и 8 % – понад 1,2 мм [27].

Через це зношування не може слугувати критерієм повного вибраковування деталі [22, 23]. Геометричні розміри зношеної деталі будь-якої конфігурації можуть регенеруватися багаторазово. З цієї точки зору зміну геометрії деталі через зношування та наступне відновлення розглядають як оборотний процес, що не впливає на загальну довговічність деталі [29]. Основною причиною повного вибраковування деталей є необоротні процеси накопичення пошкоджень у її матеріалі як при експлуатації, так і при ремонтно-відновлювальних операціях [29]. Саме кінетика накопичення втомних та технологічних пошкоджень і визначає термін служби деталей до їх вибраковування. Виходячи з цього вирішуються питання, що пов'язані з вибором найбільш ефективних технологічних операцій відновлення геометричних параметрів деталей та питання застосування зміцнення металу поверхневих шарів на різних стадіях експлуатації машин [11]. Наприклад, вали піддаються перешліфовуванню на ремонтні розміри, а вирішення питань відновлення та зміцнення проводиться диференційовано на кожному ремонтному етапі [30, 31]. Іноді виявляється доцільним застосування зміцнення поверхневого шару або відновлення шийок шляхом нарощування на більш ранніх номерах ремонтних розмірів, а не на останньому. Згідно з [32, 33] ефективність застосування технологічної операції залежить від рівня накопичених пошкоджень.

Враховуючи, що сучасне машинобудування пред'являє особливі вимоги до підвищення рівня надійності та збільшення ресурсу відновлених сталевих валів малого діаметру [11], при проектуванні відновлювальної операції з використанням розрахункових методів призначення технологічних умов нарощування поверхневого шару закладаються рішення, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості [34]: міцність зчеплення нанесеного шару з основою, зносостійкість та втомна міцність. Міцність зчеплення розглядають як критерій, що відповідає вимогам, що пред'являються до відновлення деталей машин [35]. Зносостійкість поверхневих шарів деталі визначає тільки її міжремонтний термін служби, оскільки зношений метал може бути відновлений методами реновації [36-38].

Кінцева мета реновації – одержання виробів у вигляді закінчених форм, розмірів, дизайну та заданих функціональних властивостей із забезпеченням їх взаємозамінності та збереженням робочих характеристик відновлюваних деталей. Виробничий досвід показує неефективність дугових способів відновлення сталевих валів малого діаметру, що викликане специфікою та спонтанним характером кристалізації наплавленого металу, що створює дефекти формоутворення, хімічну та структурну неоднорідність металу, тріщини, високі значення твердості, деформації та нерівності поверхні. Регламентація температурно-часових параметрів дугового наплавлення не дозволяє в широких межах маневрувати режимами нанесення та гнучко керувати процесами деформацій наплавлених деталей [25]. Особливо до цих параметрів чутливі вали малого діаметру, що працюють в умовах циклічного навантаження [35, 37, 39, 40, 41 та ін.].

1.2. Аналіз роботи виробів, що працюють в умовах абразивного зношування

Існує декілька видів взаємодії абразивного матеріалу з поверхнею робочих органів в процесі експлуатації обладнання, які характеризуються ковзанням або кочен-

ням робочої поверхні вздовж монолітного абразивного матеріалу, зіткненням з монолітним абразивним матеріалом, взаємодією з потоком абразивних часток, ковзанням деталей у масі абразивних часток, що супроводжується тертям та зношуванням сполучених деталей та механізмів обладнання. Кожен вид взаємодії характеризується різними механізмами руйнування поверхневих шарів, а також твердістю абразивного матеріалу та розміром абразивних часток, що обумовлює різну швидкість та інтенсивність зношування, а також протікання супровідних процесів утворення мікротріщин, відколів, тощо [5, 10, 42]. Процес абразивного зношування може мати різний ступінь навантаження, залежно від чого він може поділятися на ударно-абразивне зношування, подрібнення, розтирання та зношування, при якому великі абразивні частинки впроваджуються у поверхневі шари та рухаються вздовж поверхні при високому рівні напружень [43]. Основні фактори, що визначають характер та інтенсивність абразивного зношування, наступні: механічний склад абразивного середовища та ступінь закріпленості твердих абразивних часток [45]. Найбільш вірогідним та переважаючим механізмом абразивного зношування на даний час є втомне руйнування поверхневого шару робочих органів унаслідок багаторазового пластичного деформування окремих ділянок металу абразивними частками [47, 49].

Абразивне зношування робочих органів при контактуванні їх поверхонь з твердими частками мінерального походження характерне для великої кількості гірських, будівельних, транспортних, сільськогосподарських машин [46]. Абразивне зношування призводить до виходу з ладу робочих органів екскаваторів, різцового інструменту, що обробляє гірські породи, а також до зниження експлуатаційної стійкості транспортного обладнання через поломки, шум, вібрації, порушення геометричних показників з'єднань унаслідок збільшення первинних зазорів.

В процесі виконання дорожно-будівельних та сільськогосподарських робіт має місце підвищення швидкостей при обробленні ґрунта, а також інсує тенденція до зменшення металоємності та підвищення довговічності робочих органів обладнання [44]. Робочі органи ґрунтообробних машин є одними з найбільш за-

требуваних через їх невисокий ресурс експлуатаційної стійкості та довговічності, зокрема при роботі в умовах піщаних та супіщаних ґрунтів, що характеризуються найбільш високою здатністю до зношування. В першу чергу це обумовлено специфічними умовами експлуатації ґрунтообробного обладнання та порушенням технологічних норм при виготовленні, які приводять до великих масштабів виробництва при зниженні ресурсу роботи на таких ґрунтах до 5...10 га [5]. Крім того збільшення вологості ґрунту до певного значення також сприяє підвищенню його здатності до зношування.

Гранулометричний склад піщаних та супіщаних ґрунтів характеризується високим вмістом (близько 70...85% всього обсягу ґрунту) мінеральних часток кварцу з розмірами від 0,01 до 1,0 мм та високою твердістю близько 7...11 НV, що значно перевищує твердість робочих органів ґрунтообробної техніки. Породи ґрунту мають переважно водно-льодовикове походження та передбачають наявність валунів та гальки кристалічних порід [49]. Специфіка складу ґрунту, траєкторії його переміщення та нерівномірність тиску у окремих точках поверхні робочих елементів обумовлює його здатність до інтенсивного зношування з нерівномірним характером руйнування поверхневого шару робочої поверхні при експлуатації обладнання [10, 50-52]. Змінення твердості ґрунту обумовлює змінення тиску абразивних часток на поверхню деталей та робочих органів, що, відповідно, прискорює або зменшує інтенсивність зношування матеріалів [45]. Причому процес зношування відбувається лише у поверхневих шарах робочих елементів та супроводжується пластичною деформацією, руйнуванням та видаленням часток матеріалу деталей [50].

Згідно з [45] інтенсивність зношування робочих органів підвищується при збільшенні у ґрунті кількості твердих часток (здебільшого часток кварцу) розміром 0,1...1,0мм. Також важливим фактором, що впливає на інтенсивність зношування, є радіус закруглення гострих виступів абразивних часток, які в процесі впровадження у поверхневі шари робочих елементів залишають на ньому слід у вигляді пластично

видавленої канавки або мікрорізу [45]. Причому чим більший радіус закругення абразивних часток, що також визначається їх розміром, тим менш гострими є грані.

Згідно з [45] ґрунт представляє собою середовище, в якому абразивні частки знаходяться у стані нежорсткого закріплення та можуть рухатися відносно одне одного, а також обертатися навколо своєї осі під дією дотичних та нормальних напружень від зовнішнього впливу [45]. Ступінь закріпленості абразивних часток визначається максимальними дотичними та нормальними напруженнями та визначається межею міцності на зсув та відрив. Згідно з [45] при руйнуванні ґрунту зсувом, коли абразивні частки безперервно та практично з постійним тиском контактують з поверхневими шарами деталі, її зношування буде значно інтенсивнішим, ніж у випадку руйнування ґрунту відривом з утворенням первинної тріщини відриву та значних коливань навантаження.

Поверхня робочих органів у процесі експлуатації безперервно контактує з ґрунтом, внаслідок чого відбувається інтенсивне зношування, що приводить до зниження ефективності виконуваних робіт на 50% та підвищення витрат робочого часу на заміну запасних частин та простоювання на 10% [48]. Економічно виправдана довговічність машини залежить від певних співвідношень між термінами служби елементів та системи в цілому з урахуванням техніко-економічної припустимості заміни частини цих елементів новими або відновленими у сфері використання машини [7]. При цьому оптимальне співвідношення передбачає припустимість неминучих компромісів між вимогами виробництва та експлуатації машин. Очевидно, що вартість машини входить складовим елементом до вартості виробленої нею продукції, але загальна кількість цієї продукції при інших рівних умовах залежить від тривалості роботи машини. У зв'язку з цим необхідно перш за все встановити раціональний термін служби даної машини, а потім у процесі конструювання вузлів та деталей забезпечити максимальну економічну ефективність їх роботи протягом встановленого періоду, що також робить необхідним вибір ефективних, з точки зору мінімізації економічних витрат та часу простоювання обладнан-

ня, способів ремонту та відновлення зношених деталей [50]. Забезпечення високої зносостійкості деталей є однією з обов'язкових умов надійності роботи машин та одержання максимального економічного ефекту від їх застосування, оскільки саме через зношування втрачається працездатність більшості (80–90%) рухомих елементів та робочих органів машин [50].

Нерівномірність зношування, концентрація зношування на будь-якій ділянці контактуючої з абразивом поверхні, що випереджує зношування однієї з деталей приводять, як правило, до передчасної втрати працездатності всього виробу при неповному використанні ресурсу решти деталей. В процесі обробки ґрунту при сільськогосподарських та дорожно-будівельних роботах зношування робочих органів ґрунтообробних машин також є нерівномірним [57]. При зношуванні відбувається зміна форми ріжучих крайок деталей, що різко погіршує експлуатаційні характеристики машин та порушує хід технологічного процесу [15].

Забезпечення високої зносостійкості покриттів робочих органів в умовах абразивного зношування можливе при застосуванні матеріалів, що характеризуються одночасно високим опором стисканню та зсуву та високим молекулярно-механічним зчепленням між структурними складовими, високою твердістю з достатньою в'язкістю, теплопровідністю, невеликою різницею коефіцієнтів термічного розширення фазових складових та рівномірним розподілом легуючих елементів [42].

З метою створення зносостійких гетерофазних покриттів необхідно дотримуватися наступних вимог до характеристик складових покриттів [42]:

- зміцнюючі фази, що визначають зносостійкість в умовах абразивного зношування, повинні мати максимально можливу твердість, яка б не сприяла підвищенню крихкості поверхневого шару;
- матриця гетерофазного покриття повинна мати достатню пластичність та одночасно характеризуватися високою міцністю;
- зміцнююча фаза повинна мати високу адгезію до пластичної матриці.

Високоєфективним ресурсозберігаючим технологічним заходом, який задовольняє вимогам регламентації надійності та довговічності, дотримування принципів взаємозамінності та економічності є електроконтактне наварювання гетерофазних композиційних матеріалів та покриттів [30, 58].

1.3. Сутність способу електроконтактного наварювання

З'єднання між електродним і основним металами утворюється при їх спільному стисненні в результаті нагрівання при пропусканні електричного струму в умовах переважно пластичного деформування металу, що приварюється [39]. У зв'язку з цим основною перевагою електроконтактного наварювання у порівнянні з дуговими способами наплавлення є отримання з'єднання між електродним і основним металами без їх плавлення, що дозволяє запобігти перемішуванню електродного і основного металів, зменшити розміри ЗТВ, уникнути утворення дефектів литої структури [37, 40, 59].

Спосіб електроконтактного наварювання характеризується високою продуктивністю і низькою енергоємністю нанесення покриттів [60, 61]; мінімальною зоною термічного впливу на деталь; відсутністю необхідності використання захисної атмосфери і відсутністю випромінювання і газовиділення [39, 61, 62]. Процес електроконтактного наварювання відбувається при короткочасному високошвидкісному нагріванні ($800-1000^{\circ} / \text{с}$) електродного матеріалу і основного металу до температур $1400-1600^{\circ}\text{C}$ і силовому впливі роликів-електродів. Нагрівання проходить за рахунок пропускання струму, що генерується джерелом струму в імпульсному режимі, через пакет – електродний матеріал і основний метал, що поміщається між електродами зварювальної електроконтактної машини [63]. Електроконтактне наварювання відноситься до числа процесів з вираженим силовим і температурним активуванням поверхні. Величина силового впливу при цьому на 2-3 порядки вище, ніж в разі відцентрового індукційного, вібраційного та інших технологічних варіантів отримання покриттів [64]. При цьому швидкість нагріву шару, що приварюється, може досяга-

ти декількох тисяч градусів за секунду [39]. Поєднання двох активуючих факторів дозволяє здійснювати процес наварювання в середньому в 100 разів швидше, ніж, наприклад, при індукційному способі нанесення покриттів [35]. При цьому фізико-механічні властивості отриманого на поверхні відновлюваного виробу шару (зносо-стійкість, твердість, пористість і т.п.) залежать від технологічних параметрів процесу, які необхідно обирати з урахуванням впливу активуючих факторів, таких як си-лове і температурне активування поверхні[40].

В галузі ремонту сільськогосподарської техніки відомі наукові роботи, в яких вирішені різні завдання з використанням електроконтактного нагріву, електроконтактного напикання металевих порошкових матеріалів, електроконтактного наварювання (наплавлення) дроту та електроконтактного приварювання металеві стрічки [75-78 та ін.].

Сутність процесу електроконтактного напикання порошкових матеріалів (рис.1.1) за даними [41, 70-74] полягає у спіканні нагрітих струмом частинок порош-ку між собою і з поверхнею деталі.

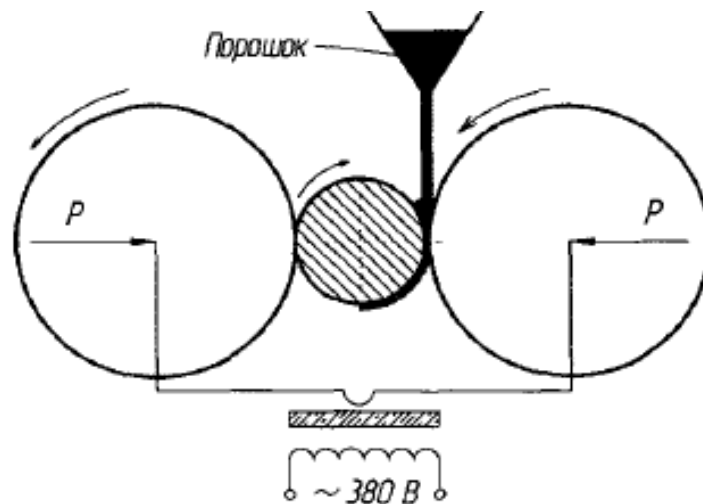


Рисунок 1.1 – Схема процесу напикання металевих порошків

У зв'язку з цим основною умовою отримання якісного, мікропористого шару з високими показниками за зчепленням з металом деталі є ведення процесу

у температурних режимах, що виключають плавлення металів порошку і деталі [75, 76].

Основні параметри процесу при напіканні циліндричних поверхонь сталевих деталей сталевими порошками повинні витримуватися: за робочою напругою 0,8...1,2 В на міліметр товщини шару і за швидкістю напікання – 0,17...0,25 м/хв. При цьому міцність зчеплення шару залежить від основних параметрів процесу: тиску, напруги і швидкості напікання. Дотримання цих параметрів у зазначених вище оптимальних режимах дозволяє отримати шари з міцністю зчеплення у 10-15 разів вище зчеплення шару, отриманого металізацією напиленням [77, 78].

В [79] досліджена можливість керування характеристиками зносостійкості шарів, отриманих електроконтактним напіканням металевих порошків на зношених поверхнях. Встановлено, що якість напеченого шару оцінюється головним чином величиною пористості покриття, що визначає характеристики зносостійкості з'єднань [80]. Для напечених покриттів відмінність у пористості як у відносному значенні, так і за розмірами пор, залежить від технологічних параметрів процесу і матеріалу вихідного порошку. При цьому працездатне покриття з пористістю напечених шарів – у межах від 12 до 38% [82]. В отриманих напіканням покриттях за даними [83] визначена повна і сполучена пористість. Сполучена пористість становить до 35% від повної пористості покриття, причому залежність між ними лінійна. Збільшення загальної пористості обумовлює збільшення сполученої і навпаки. Від пористості залежать характеристики зносостійкості напечених шарів в умовах граничного тертя. При оптимальній пористості у з'єднанні з бабітом Б-83 період обкатування скорочується майже вдвічі, зменшується коефіцієнт тертя у 2,5 рази у порівнянні з загартованою сталлю 45 [84]. Для відновлення поверхні головок зубів шестерень насосів типу НШ в роботі [85] запропоновано спосіб і технологію приварювання металевих порошків і композиційних порошкових матеріалів. Розроблена в [86] технологічна схема процесу дозволяє здійснювати приварювання порошку, як у сухому, так і у во-

лоному стані, регулювати товщину приварюваного шару шляхом зміни фракційного складу і об'ємної вологості порошку. Необхідна товщина шару досягається багатоцикловим приварюванням, при цьому міцність зчеплення покриття з основою становить 600 630МПа.

Для одержання шару з високою міцністю зчеплення з основою при відновленні деталей типу «вал» електроконтактним напіканням порошкових сплавів, за даними [87], необхідно створити у зоні ущільнення порошкового сплаву певний тиск, що забезпечує стабільність протікання процесу електроконтактного напікання. Порівняльна оцінка однороликового та двороликового пристроїв за ККД та продуктивністю показала, що двороликовий пристрій перевершує однороликові за ККД у 2,84 рази, а за продуктивністю – у 2,5 рази. Якісне формування покриття при цьому можливе при різних поєднаннях режимів процесу. На однороликовому пристрої необхідно застосовувати більш жорсткі режими напікання з підвищеним зусиллям притиснення електроду і щільністю струму (для напікання порошкового сплаву КБХ: щільність струму $i = 400 \text{ А/мм}^2$; тиск на ролик (деталь) $P_{\text{CP}} = 216 \text{ МПа}$; тривалість імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,06 \text{ с}$; тривалість паузи між імпульсами $t_{\text{п}} = 0,04 \text{ с}$; лінійна швидкість обертання деталі $V = 0,02 \text{ м/с}$) у порівнянні з режимами на двороликовому пристрої (того ж порошкового сплаву – щільність струму $i = 320 \text{ А/мм}^2$; тиск на ролик (деталь) $P_{\text{CP}}=127\text{МПа}$; тривалість імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,02 \text{ с}$; тривалість паузи між імпульсами $t_{\text{п}} = 0,02 \text{ с}$; лінійна швидкість обертання деталі $V = 0,0128 \text{ м/с}$) [87]. При цьому час дії максимальних температур ($\sim 1553 \text{ К}$) не перевищує 0,1 с, а зона термічного впливу становить не більше $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ [88]. В роботі [89] запропонований спосіб формування композиційних покриттів функціонального призначення зі змінними по товщині шару властивостями пошаровим електроконтактним напіканням порошкових матеріалів. Для відновлення зношених автотракторних деталей типу «вал», зокрема, вторинних валів КПП автомобілю ГАЗ-322132 «Газель», золотників гідророзподільника Р-75 і Р-80 та інших циліндричних деталей в [90, 91] розроблено технологію електроконтактного приварювання порошкових матеріалів у

магнітному полі, яка підвищує технологічність процесу шляхом утримування порошкових матеріалів у зоні приварювання і зменшує втрати присадкового матеріалу від осипання до 20% і більше у порівнянні з методом вільної засипки порошку. Проводити приварювання порошку рекомендується за двома схемами: з подачею у верхню зону приварювання і з подачею у нижню і верхню зони приварювання. У роботах [92, 93] оптимізовані технологічні та конструктивні параметри процесу, склад і вид порошкового присадкового матеріалу, вивчено вплив магнітного поля на частинки порошку [94].

Для економії порошку, регулювання товщини покриття і запобігання змивання порошку охолоджувальною рідиною запропоновані різні способи електроконтактного приварювання порошків, зокрема при відновленні деталей з невеликим зношуванням рекомендується використовувати феромагнітні порошки, що втягуються до зони приварювання магнітним полем, утвореним електричним струмом (рис.1.2) [95-98].

На схемі (рис.1.2, а) замикання порошку у період паузи між імпульсами струму відбувається механічно за рахунок стиснення пружини 6, а у період імпульсу струму електромагніт 5, підключений паралельно вторинній обмотці зварювального трансформатора 4, відкриває клапан 7 [95]. На схемі (рис.1.2, б) замикання феромагнітного порошку відбувається за рахунок магнітного поля від електромагніту 5, а реле 10 служить для узгодженої роботи електромагніту у період паузи і імпульсу струму [96]. На схемі (рис. 1.2, в) для подачі великої кількості феромагнітного порошку встановлено додаткові електромагніти 5 з боків роликового електрода 2, при цьому діюча на феромагнітну частку рівнодіюча сила від усіх джерел магнетизму і сили тяжіння спрямована до зони електроконтактного приварювання [97]. На схемі (рис. 1.2, г) весь неприварений порошок втягується вакуумом з фільтром [98]. На схемі (рис. 1.2, д) для подачі порошку до місця приварки використовується повітря під незначним тиском, а захисне повітря запобігає змиванню порошку охолоджуючою водою. На схемі (рис.1.2, є) феромагнітний порошок притягується до роликового

електроду і подається до місця приварювання самим роликівим електродом. Оптимальні параметри режиму електроконтактного напикання для деталей діаметром від 10 до 100 мм: струм наварювання – 5...14 кА, тиск електроду – 0,5...3кН, тривалість імпульсу струму – 0,04 с, тривалість паузи – 0,06 ... 0,10 с. При цьому міцність з'єднання нанесеного покриття з поверхнею деталі досягає 25кгс/мм² і більше [100]. Структура привареного металу і зона термічного впливу нерівномірна і має поперемінні структури гарту (мартенсит) і відпуску (троостомартенсит і ін.).

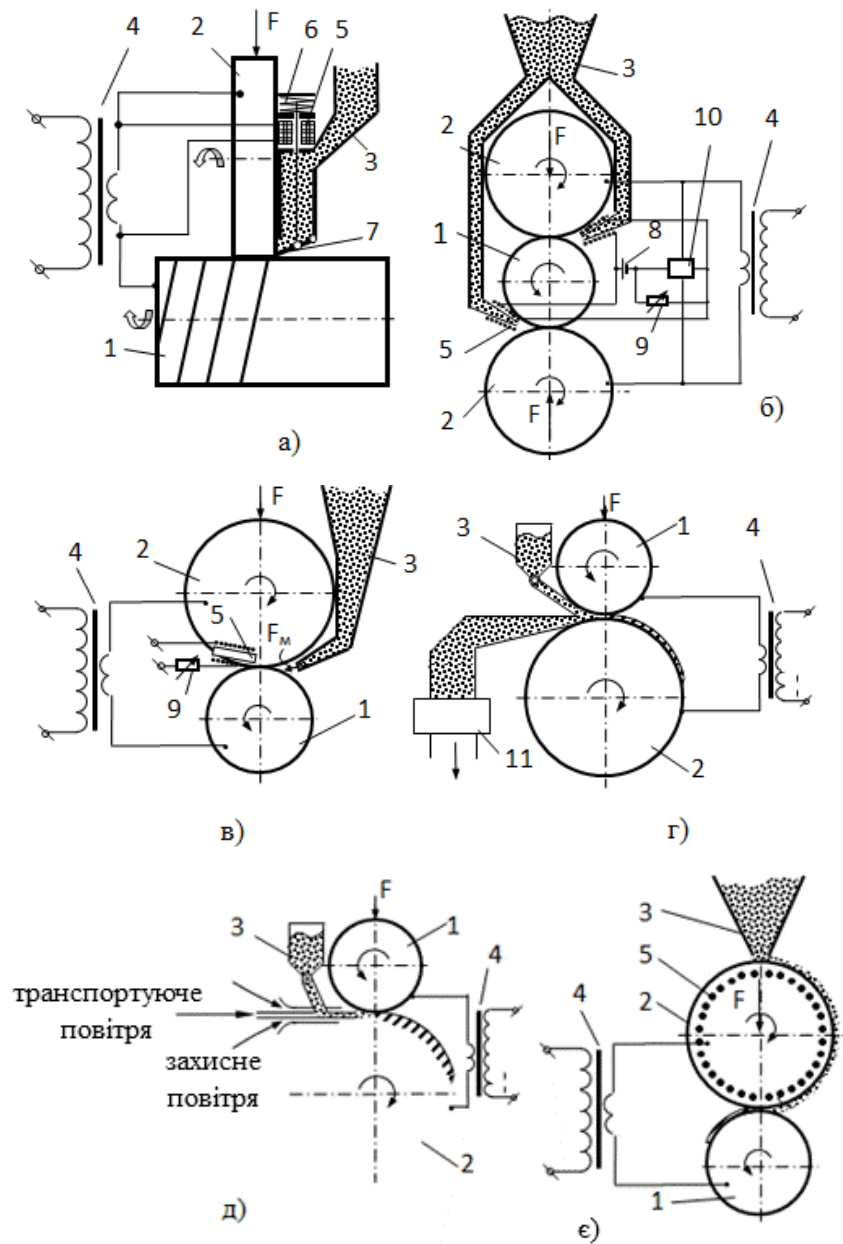


Рисунок 1.2 – Схеми процесу електроконтактного напикання порошків

Різномірність структури привареного металу згідно з [101] обумовлює його нерівномірну твердість, яка залежить від матеріалу електродного дроту і режиму охолодження деталі при наварюванні.

В [8, 26, 38] досліджений спосіб електроконтактного наварювання дротом (рис. 1.3), що дозволяє наносити металопокриття товщиною 0,2 ... 1,0 мм.

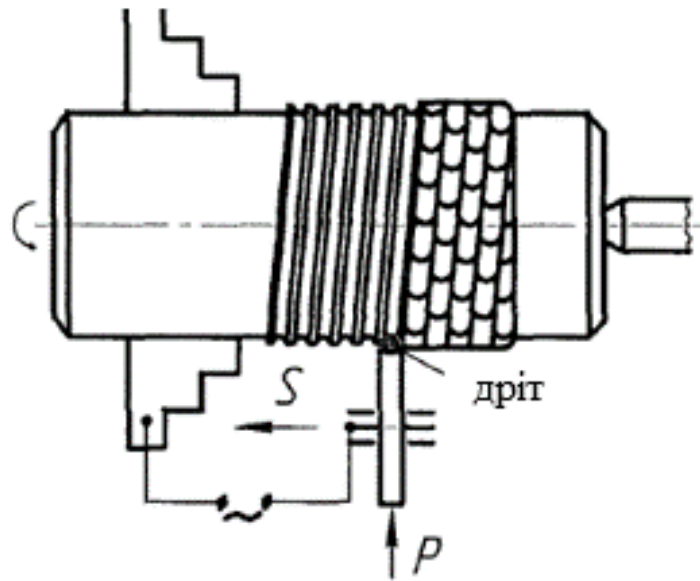


Рисунок 1.3 – Схема процесу електроконтактного наварювання дротом

У дослідженнях [20] запропонована технологія відновлення автотракторних деталей типу «вал» електроконтактним наварюванням дротом. Встановлено, що для досягнення максимально можливої міцності зчеплення, рівної міцності основного металу, процес слід вести при мінімальних зусиллях на електродах, що забезпечують утворення фізичного контакту поверхонь, що з'єднуються, а струм наварювання слід встановлювати максимально великим, не допускаючи перегріву електродного металу.

Для електроконтактного наварювання дроту необхідні «м'які» режими наварювання зі значенням коефіцієнту перекриття одиничних майданчиків привареного металу рівним 0,7. При цьому мінімальна по ширині валика зона відпуску відповідає 10 ... 15% -му перекриттю суміжних валиків, що дозволяє отримувати

найбільш високі значення однорідності структури, середньої твердості і зносостійкості металопокриття. Для отримання однорідної бездефектної структури рекомендуються «м'які» режими охолодження, що виключають подавання охолоджувальної рідини безпосередньо в зону формування з'єднання.

Згідно з [102, 103] технологія відновлення багат шаровим електроконтактним наварюванням дротом циклічно навантажених валів для повного відновлення геометрії шийок і галтельних переходів являє собою технологію комбінованого наварювання, яка полягає в електроконтактному наварюванні дроту на циліндричні частини шийки і подальшому дугового наплавленні галтелів, включаючи кромки раніше навареного шару. Для відновлення і зміцнення зношуваних поверхонь деталей широке застосування знайшло електроконтактне наварювання стрічками (рис. 1.4) [62, 65, 68, 104-116].

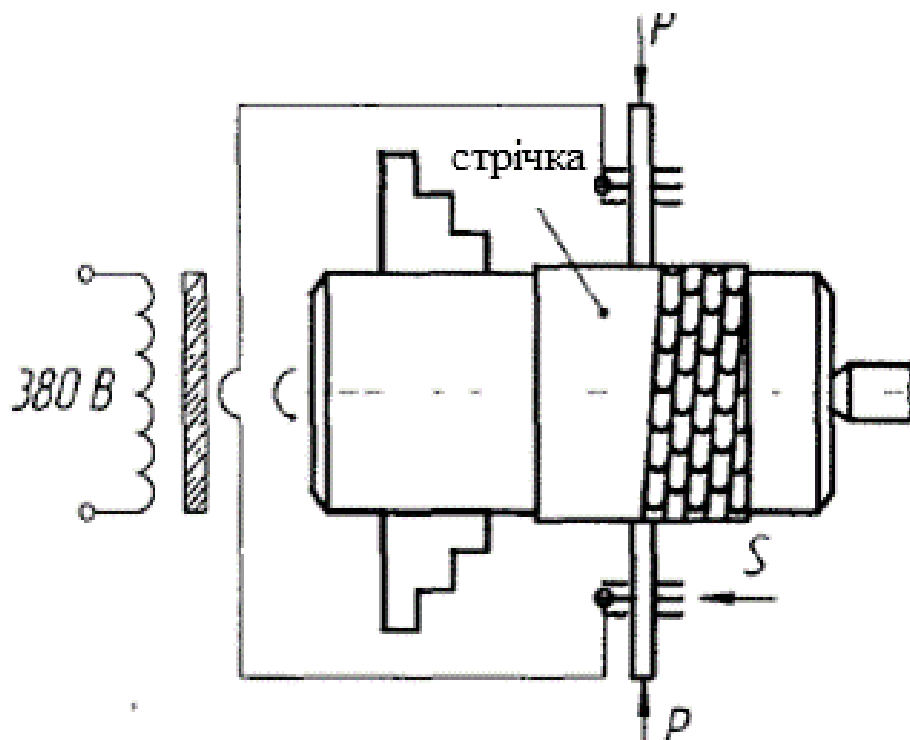


Рисунок 1.4 – Схема процесу електроконтактного наварювання стрічкою

Для відновлення зношених втулок розподільного валу двигуна ЯМЗ-238 розроблено технологію електроконтактного приварювання сталеві стрічки по зовніш-

ній поверхні у комплексі з пластичною деформацією (обтисненням). Встановлено оптимальні технологічні параметри режимів електроконтактного приварювання сталі 08кп до поверхні бронзової втулки, що забезпечують міцність зчеплення на зріз у межах від 55 до 68 МПа [70].

В роботі [28] при дослідженні відновлення деталей тракторів і автомобілів методом контактно-конденсаторного електроімпульсного наварювання легованими сталевими стрічками розроблений спосіб отримання легованого нарощеного шару на циліндричних поверхнях деталей з вуглецевих сталей, який полягає в тому, що на очищену поверхню деталі, що обертається та поступально переміщається, навивають по спіралі з попереднім натягом леговану стрічку із заданими фізико-механічними властивостями, одночасно приварюють її шовним контактним зварюванням на жорстких режимах, накладаючи шов посередині стрічки, або по межвиткових стиках. Контактно-конденсаторне наварювання легованих стрічок у технології виготовлення деталей – це нові можливості створення біметалевих деталей, основний метал яких – дешева вуглецева сталь, а поверхневі робочі ділянки – легована сталь з необхідними фізико-механічними властивостями [28].

В [29] встановлено, що при наварюванні стрічки контактним електроімпульсним методом глибина зони термічного впливу знаходиться у прямій залежності від сили струму і часу імпульсу і складає 0,5; 0,55; 0,6 мм. Структура привареного металу нерівномірна і містить перемінні структури гарту і відпуску в місцях перекриття швів. При наварюванні стрічки на загартовану деталь у перехідній зоні виявлено частковий відпуск основного металу. При цьому мікротвердість поверхні при наварюванні стрічки зі сталі У8А склала 8700, 65Г – 7500, 40Х – 7100 і 50 – 6800 Н/мм², а коефіцієнт відносної міцності відновлених валів перевищив на 8...25% міцність валу зі сталі 45, загартованого нагріванням струмами високої частоти. У відновлених валів залежно від марок застосовуваної стрічки, за даними [29], знижується межа витривалості на 54,1 ... 66,6%. Для підвищення межі витривалості в роботі рекомендується поверхнево-пластичне деформування

(обкатка кулькою), яке сприяє підвищенню межі витривалості наварених зразків на 209% [29].

Згідно з [91, 92] керувати пластичністю і в'язкістю з'єднання покриття з деталлю при електроконтактному приварюванні рекомендується шляхом попереднього деформування електродного матеріалу в холодному стані, використання захисної атмосфери, створення на поверхні деталі мікрорельєфу, використання проміжного шару з порошку.

Для відновлення гальмівних барабанів транспортних засобів сільськогосподарського призначення у [94] запропоновано технологію розмірної електроконтактною обробки та визначено раціональний режим електроконтактною обробки: робоча напруга – 24 ... 26 В, струм – 300 ... 400 А. При цьому зносостійкість відновлених гальмівних барабанів за запропонованою технологією підвищується на 8...10% порівняно з новими [94].

1.4. Матеріали, що застосовуються для електроконтактного наварювання

Згідно з [117] основним способом підвищення зносостійкості відновлених деталей в даний час є підвищення твердості покриття. Підвищення твердості нанесених покриттів виправдане для робочих органів сільськогосподарських машин і для деталей, що працюють в абразивному середовищі, але не завжди виправдано для деталей машин, що мають крім абразивного зносу втомний, корозійно-механічний знос, знос при схоплюванні і інші види зносу. Зі збільшенням твердості відновлюваних деталей підвищуються вимоги до якості поверхні, а саме до її шорсткості, тому що найдрібніші виступи на твердій поверхні діють як абразивні частинки, особливо при сухому терті і граничному мастиллі [118, 119]. Тому при виборі електродного матеріалу необхідно оцінювати вплив покриття на деталь [120]. Відомі правила вибору матеріалів пар тертя та рекомендації по співвідношенню твердостей контактуючих матеріалів деяких видів сполучень. Бажано, щоб матеріали пар тертя забезпечували

утворення тонких м'яких плівок у процесі контактування поверхонь внаслідок ефекту схоплювання з м'якою структурною складовою і як результат – зменшення сили тертя і забезпечення роботи сполучення без задирів.

При використанні в якості електродного матеріалу металевих порошоків, які дозволяють формувати необхідну структуру приварюваного матеріалу, і тим самим, зробити керованим процес отримання заданих фізико-механічних властивостей покриття, існує ряд труднощів [41, 49]: витрати дорогого порошку, регулювання товщини покриття залежно від величини зносу, труднощі використання суші порошоків, забезпечення високої міцності зчеплення важкозварюваних порошоків і ін. [64, 70, 71].

В роботі [87] відзначається, що відновлені насоси типу НШ електроконтактним приварюванням композиційних порошкових матеріалів складу ПГ-С27М-50% + ПТж23Н6М-50% і складу ПГ-С27М-100% в радіальному сполученні насосу, при концентрації абразиву в маслі 16 .. 32 г/л, показують високу опірність гідроабразивному і абразивному зношуванню, зокрема, відносна зносостійкість для першого складу складала: сполучення $E = 2,0$, шестерні $E = 11,5$; для іншого складу відповідно 1,7 і 2,2. При цьому зношування композиційних покриттів відбувалося в результаті руйнування зв'язків і ослаблення зв'язку твердих частинок.

Покриття, одержані в [88] на основі залізного порошку 30% ФБХ-6-2 або 40% ПГ-С27, або 25% КБХ, або 45% ПГ-УС25 шляхом його електроконтактного наварювання, мають зносостійкість, що дорівнює зносостійкості серійних виробів, а твердість даних покриттів складає 45 ... 52 НРС.

Порошкові композиції, за даними [88], що містять наповнювачі ФБХ-6-2 і ПГ-С27, забезпечують зчіплюваність привареного покриття з основою не нижче 200 МПа. При цьому структура нанесеного покриття складається з в'язкої основи і твердих включень. Мікротвердість в'язкої матриці становить $H_{100}=3260...3960$ МПа, твердого розчину – $H_{100} = 7170...8130$ МПа, карбідів і боридів хрому відповідно $H_{100} = 15320 ... 17280$ МПа і $H_{100} = 17500 ... 21340$ МПа, металу основи після елект-

рореконтактного наварювання – $H_{100} = 5170 \dots 5730$ МПа. Пористість покриття не перевищує 5 ... 7%. Нерівномірність твердості покриття не перевищує 2 HRC.

В роботі [90] відзначається, що механічні суміші KBX, ФБХ-6-2 забезпечують міцність зчеплення з основним металом при електроконтактному наварюванні у 1,3-1,8 рази вище, ніж порошкові сплави ПГ-УС25 і ПГ-С27. При цьому покриття з порошкових сплавів припрацьовуються повільніше. Запропоновано склади порошкових композицій (20% ФБХ-6-2, 80% ПЖ6; 20% KBX + 5% Al_2O_3 + 75ПЖ6; 30% ПГ-СР2 + 70% ПГ-ЮН-04; 20% ПГ-10К-01 + 80 % ПГ-10Н-04), що забезпечують можливість подальшої механічної обробки покриттів точінням і мають зносостійкість не менше нової деталі [90].

Для поверхневого зміцнення електроконтактним наварюванням у [80] запропоновано використовувати шлам ШХ15, що утворюється при шарикопідшипниковому виробництві, який за хімічним складом і за вмістом Cr, Mn і Si практично не відрізняється від хімічного складу сталі ШХ15 до її шліфування, а вміст вуглецю збільшено приблизно на 40 %. Шлам ШХ15 є конгломератом, що складається з досить міцно зчеплених між собою мікростружок різної форми, довжиною 40 ... 114 мкм, шириною 10 ... 25 мкм і товщиною 0,6 ... 1,2 мкм; має низьку щільність, яка в 68-86 разів нижче щільності сталі ШХ15; володіє задовільною пресованістю і здатністю до спікання. В такому шламі присутні абразивні включення розміром 0,0146 ... 0,267 мкм, об'ємна частка яких становить 4,7 ... 12,4% [80]. Міцність привареного шару запропонованого складу з основою зі сталі 65Г становить 525 ... 530 МПа, мікротвердість - 7210...8240Н/мм², глибина зони термічного впливу в основному металі – 0,40... 0,48 мм. Ударна в'язкість зразків з покриттям складає $KCU=0,25$ МДж/м² і приблизно дорівнює KCU зразків зі сталі 65Г, термооброблених до HRC52...54 або зміцнених електроконтактним наварюванням без подачі шламу. Корозійна стійкість покриття у 2,4-2,6 разів вище корозійної стійкості сталі 65Г. Зносостійкість покриття зі шламу ШХ15, отриманого електроконтактним наварюванням, у 2,8-3,0 рази вище зносостійкості сталі 65Г у поча-

тковому стані і в 1,6-2,1 рази вище зносостійкості тієї ж сталі, термообробленої до HRC 52 ... 54 або зміцненої електроконтактним наварюванням без подачі шламу [80]. Згідно з [80], зміцнені леза дискових робочих органів електроконтактним наварюванням шламу ШХ15 зношуються в основному по потиличній частині з поступовим виходом на покриття і значно повільніше по ріжучій кромці, забезпечуючи при цьому її самозагострювання. Знос зміцнених дисків складає 0,05... 0,1 мм по діаметру при напрацюванні 140 ... 151 Га, а незміцнених – 0,4 ... 0,5 мм [80].

Для відновлення високошвидкісних деталей, зокрема валу ротору турбокомпресору, застосовують електроконтактне наварювання суміші залізного порошку і чавунної стружки на зношену поверхню [86]. Також у [86] встановлено, що гартування струмами високої частоти нанесеної електроконтактним наварюванням суміші залізного порошку ПЖЗМ2 з чавунною стружкою підвищує твердість покриття і якість його зчеплення з основним металом, що забезпечує надійність відновленої деталі не нижче рівня надійності нової.

Для відновлення деталей, зокрема, опорних шийок розподільного валу двигуна А-01М і А-41, шийок колінчастого валу двигуна ЗМЗ-53 і інших у [121] запропоновано композиційний матеріал з антифрикційними присадками (міді, олову, графіту, дисульфиду молібдену, деяких полімерів та ін.), які дозволяють знизити коефіцієнт тертя, збільшити опірність захопленню і підвищити зносостійкість з'єднання. В якості з'єднуючого полімеру рекомендується використовувати спиртовий розчин ПВБ, який підвищує міцність та зменшує радіус крихкого руйнування.

Композиційні покриття з антифрикційними присадками забезпечують підвищення зносостійкості більш ніж у 2 рази в порівнянні з композиційними покриттями без присадок, зменшують коефіцієнт тертя в середньому в 1,5 рази і збільшують час до початку захоплення у 2-3 рази. Однак наявність присадок зменшує міцність зчеплення покриття з основним металом деталі. Так, при вмісті у покритті більше 20% міді міцність зчеплення на зріз становить менше 3МПа, а при вмісті в покритті більше 10% олова міцність зчеплення знижується більш ніж у 10 разів порівняно з

покриттями відповідного складу, але без олова. Зона термічного впливу на основний метал, а також коливання значень мікротвердості композиційного покриття менше, ніж при наварюванні сталевих стрічки [121].

Для відновлення бронзових деталей машин запропонований склад порошкового матеріалу для електроконтактного наварювання, що включає порошки з кольорових сплавів з флюсом з хлористого цинку (65%), хлористого калію (14%), хлористого натрію (11%), хлористого амонію (10%) у кількості 2 ... 4% від насипної маси порошку, який підвищує зчіплюваність бронзових порошоків зі зношеною поверхнею деталі [122]. Поверхнева твердість приварених шарів залежно від технологічних режимів процесу електроконтактного наварювання, може перевищувати твердість вихідного матеріалу деталі на 20 ... 33%, а зносостійкість підвищується на 25 ... 30% [122].

Для відновлення зношених поверхонь деталей, зокрема, шийок колінчастих валів компресорів, опорних шийок розподільних валів та інших циліндричних деталей в [123] пропонується проводити електроконтактне наварювання композиційного покриття на основі металевих порошоків марки ПР-Х11Г4СР і сітки з низьковуглецевої сталі, яка підвищує технологічність процесу шляхом утримування порошку в зоні приварювання і дозволяє зменшити витрати електродного матеріалу від осипання до 30% порівняно з методом вільної засипки порошку.

Шляхом зміни кута подачі порошку і вибором діаметру дроту сітки регулюється товщина покриття від 0,3 до 1,5 мм. При цьому пористість порошкового шару, привареного на оптимальних режимах, складає 2 ... 6%, міцність зчеплення покриттів з основою для сталевих деталей досягає 155 МПа, а для чавунних - 120 МПа відповідно [123]. Запропоновані композиційні покриття на основі металевих порошоків марки ПР-Х11Г4СР і сітки володіють високими зносостійкими властивостями, що перевищують зносостійкість сталі 45 у 2,5 рази, а чавуну - у 1,9 разів.

Згідно з даними [124] зносостійкість покриттів з порошоків ПГ-СР2, ПГ-УС25, ПС-12-НВК-01, 50% ПГ-10Н-01 + 50% ВК25, ШХ15 відповідно у 2,8 ... 3,0; 3,5 ... 4,0; 5,0 ... 6,0; 10,0 ... 11,0; 6,0 ... 7,0 разів вище зносостійкості сталі 45, тер-

мообробленої до HRC 48 ... 50, і у 4,0 ... 5,0; 7,0 ... 7,5; 19,0 ... 20,0; 10,0 ... 11,0 разів вище зносостійкості тієї ж сталі у вихідному стані. Зносостійкість покриття з порошку ПР-НПЧЗ у 4,0 ... 5,0 разів вище зносостійкості чавуну СЧ15, корозійна стійкість самої зони з'єднання не гірше корозійної стійкості одного з матеріалів, що з'єднуються. При цьому збільшення розміру частинок порошку від 2 до 250мкм не робить істотного впливу на щільність покриття і міцність з'єднання [124].

У [125] рекомендується використання корозійностійких і нових зносостійких сталей, а також матеріалів на основі залізного порошку (ПЖ РЗ.200.28) з антифрикційною добавкою (порошок міді ПМС-Н) у співвідношенні 4:1 для відновлення деталей, що працюють в умовах граничного тертя або без змащення і забезпечує підвищення зносостійкості відновленої деталі більш ніж удвічі, зменшення коефіцієнта тертя – в 1,5 рази, збільшення часу до початку схоплювання – у 2-3 рази порівняно з покриттям без присадки; карбіду хрому та високотемпературного припою для відновлення робочих органів ґрунтообробних машин з підвищенням ресурсу відновлених лап у 1,5-3 рази порівняно із серійними; карбіду хрому та твердого припою для отримання самозагострювальної робочої поверхні, що в 1,5-2,0 рази покращило зрізуваність бур'янів; металевого порошку (ПР-Х11Г4СР) і металевої сітки з вуглецевої сталі для отримання покриттів товщиною від 0,1 до 1,5 мм. При цьому одержувана гетерогенна структура дозволяє збільшити зносостійкість відновлюваних деталей у 1,5-2,0 рази порівняно з новими [125].

Використання вільних порошків дозволяє готувати широку гаму композицій різних технологічних і експлуатаційних властивостей, маючи в наявності невелику номенклатуру інгредієнтів, наприклад, сормайт ПГ-С27 [88], сплав ПГ-С1 + Al_2O_3 , ПГ-С1 + Cr_7C_3 , ПЖ1 + Al_2O_3 [87, 88, 90, 79, 80]. Наварювання проводять сухими порошками з вільною їх подачею під зварювальні ролики. При цьому експериментально встановлено, що вільні частинки порошкових матеріалів інтенсивно видавлюються з простору між зварювальним роликом і деталлю. Згідно з [92]

при використанні феромагнітних порошоків відбувається їх викид із зони ущільнення і спікання.

Зазначене сприяє формуванню покриття з напливами і великою кількістю пор, а коефіцієнт використання порошку не перевищує 0,8. Серйозною проблемою при використанні порошкових матеріалів і полімерно-порошкових стрічок є низька надійність роботи вузлів зварювальних роликів, рухомі частини яких заклинюють на осях від попадання у проміжок між ними часток порошкових матеріалів. Тому вузли зварювальних роликів повинні бути захищені від попадання часток порошоків в їх опори ковзання. При використанні сухих порошкових матеріалів додатково необхідна герметична система внутрішнього охолодження.

Для утворення зносостійких шарів на робочих ділянках деталей автомобіля електроконтактним наварюванням в [56] запропоновано склад порошкового дроту з оболонкою зі сталі 65Г і шихтовою композицією на основі сормайт у додаванням 28 ... 30 мас. % фероборхрону ФБХ-6-2 і 7 ... 8 мас. % міді, що забезпечує підвищення зносостійкості деталей у 4,2-4,4 рази порівняно з деталями, що пройшли гартування струмами високої частоти.

Перевагою використання дроту в якості електродного матеріалу для електроконтактного наварювання є сприятливі залишкові напруження в покритті. Встановлено [66], що в покриттях із сталевого дроту діють залишкові напруження стискання, рівні 0,1 ... 0,2 межі текучості привареного металу (в покриттях із сталевих стрічки і порошоків діють напруження розтягування [68, 88]).

Сприятливі залишкові напруження пояснюються термомеханічним впливом роликів електроду на електродний матеріал при його приварюванні. Перераховані переваги відносяться і до сітчастих присадкових матеріалів (зварених і тканих сіток), так як їх основою є сталевий дріт. Тріщиноутворення при використанні дроту практично не спостерігається, але через складність технологічного процесу спосіб практично не використовується [66].

Найбільш поширеним способом відновлення зношених деталей і зміцнення поверхонь методом електроконтактного наварювання є створення робочого шару з використанням сталевих стрічок [65, 68]. За даними [106, 107] в якості покриттів може використовуватися стрічка зі сталей 08КП, 10, 20, 40, 40Х, 50, 65Г, У8, У10, 50ХФА, Х6В9, Р9, Х18Н9Т з проміжним шаром з порошків заліза, чавуну, твердих сплавів, сормаїту, ПГ-ХН80СР, композицій зазначених матеріалів у поєднанні з карбідами титану, вольфраму та ін. При цьому електроконтактне наварювання може здійснюватися як у режимі спікання частинок, так і з утворенням рідкої фази. Згідно з [106, 107] найбільш схильні до утворення рідкої фази, а отже, мікротріщин в покритті, самофлюсуючі порошки системи Сг-Ni-В.

Матеріал стрічки обирається з урахуванням необхідної твердості відновлюваної ділянки деталі. Твердість поверхневого шару залежить від хімічного складу стрічки, вмісту вуглецю і легуючих елементів (табл.1.1) [106].

Таблиця 1.1

Твердість навареного шару

| Матеріал стрічки | Твердість, HRC |
|------------------|----------------|
| Сталь 20 | 20...30 |
| Сталь 40 | 35...40 |
| Сталь 45 | 40...45 |
| Сталь 55 | 45...50 |
| Сталь 40Х | 50...55 |
| Сталь 65Г | 55...60 |

Однак при реалізації даного способу можливе виникнення дефектів при формуванні покриття у вигляді мікротріщин і тріщин на поверхні покриття, ви-

плеску шару, що приварюється, утворення недостатньої міцності з'єднання покриття з основним металом, і інших несприятливих складових процесу.

Крім того, поверхня стрічок, що використовуються для електроконтактного наварювання, зазвичай містить різні види забруднень: фізичні або механічні забруднення (пил, абразивні частинки); органічні забруднення у вигляді адсорбованих тонких і товстих плівок (мастила, віск, парафін); хімічні забруднення (оксидні, нітридні, сульфідні та інші сполуки); газоподібні забруднення, адсорбовані поверхнею. Таким чином, поверхня стрічок, що використовуються для відновлення і зміцнення, знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Вільні зв'язки поверхневих атомів насичені хімічними зв'язками забруднень.

Широка номенклатура пропонованих матеріалів дозволяє обирати для електроконтактного наварювання марку стрічки, виходячи з існуючих рекомендацій з відновлення деталей залежно від умов експлуатації (табл.1.2) [106].

Таблиця 1.2

Металеві стрічки

| Марка стрічки | Товщина, мм | Марка стрічки | Товщина, мм | Марка стрічки | Товщина, мм | Марка стрічки | Товщина, мм |
|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 65Г | 0,1...3,0 | Ст15 | 0,5...3,0 | Ст50 | 0,5...3,0 | 12Х18Н9Т | 0,8...2,0 |
| У7А | 0,5...3,0 | Ст20 | 0,5...3,0 | Ст1 | 0,5...3,0 | 12Х18Н10Т | 0,8...2,0 |
| У8А | 0,1...3,0 | Ст25 | 0,5...3,0 | Ст2 | 0,4...3,0 | 12Х13 | 0,8...3,0 |
| У8ГА | 0,5...3,0 | Ст30 | 0,5...3,0 | Ст08 | 0,4...3,0 | 30Х13 | 0,8...3,0 |
| У10А | 0,1...3,0 | Ст35 | 0,5...3,0 | Ст10 | 0,4...1,5 | 40Х13 | 0,8...3,0 |
| 9ХФ | 0,5...3,0 | Ст40 | 0,5...3,0 | Ст3 | 0,4...3,0 | 08Х13 | 0,8...3,0 |
| 60С2А | 0,1...3,0 | Ст45 | 0,5...3,0 | Ст0 | 0,6...3,0 | 14Х13 | 0,8...3,0 |
| 14Х17Н2 | 0,8...3,0 | 08Х17Т | 0,8...3,0 | 2Х17 | 0,1...2,0 | 65Х13 | 0,1...2,0 |
| 8Х18Н10 | 0,1...2,0 | 08Х18Н10Т | 0,1...2,0 | М0Б | 1,45 | 47НД | 0,1...2,0 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---------------|------------|---------|-----------|
| 09X15H8Ю | 0,1...2,0 | 15X18H12C4ТЮ | 0,1...2,0 | X20H80 | 0,12...3,0 | 36H | 0,1...2,0 |
| 12X18H10T | 0,1...2,0 | 04X20H10Г2Б | 0,1...2,0 | БрОФ | 0,21...1,0 | 47HX | 0,1...2,0 |
| 05X18H10T | 0,1...2,0 | МНМц60-20-20 | 0,1...0,5× ×40...120 | БрБ2 | 0,21...1,0 | 42H | 0,1...2,0 |
| МНМц3-12 | 0,1...0,5× ×40...120 | МНМц68-4-2 | 0,1...0,5× ×40...120 | БрБНТ- 1/9 | 0,21...1,0 | 42HA-BИ | 0,1...2,0 |
| НМЖМц28- 2.5-1.5 | 0,1...0,5× ×40...120 | МНМцАЖ3- 12-0.3-0.3 | 0,1...0,5× ×40...120 | 29HK | 0,1...2,0 | 70C2XA | 0,1...2,0 |
| 50XФА | 0,1...2,0 | Ст60 | 0,1...2,0 | Ст70 | 0,1...2,0 | 65X13 | 0,1...2,0 |

Необхідно активувати поверхню електродного матеріалу, тобто вивести її зі стану термодинамічної рівноваги. Для цього необхідно розірвати зв'язки між поверхневими атомами твердого тіла і сторонніми атомами, підвищити енергію поверхневих атомів до рівня забезпечення їх хімічної взаємодії з частинками основного металу.

Попередити дефекти покриттів з металевих стрічок можливо шляхом їх електроконтактного наварювання через проміжний активуючий шар, який може виконувати найрізноманітніші функції: знижувати хімічну неоднорідність в зоні з'єднання; знижувати залишкові напруги і усувати вплив відмінності в значеннях коефіцієнта лінійного теплового розширення матеріалів, що зварюються; запобігати їх пластичній деформації; істотно знижувати основні параметри режиму електроконтактного наварювання (зусилля на ролик-електроді, сила струму і час імпульсу) при одночасному забезпеченні високої міцності зчеплення, що має найбільш важливе значення [106, 116].

При електроконтактному наварюванні покриттів з активованою поверхнею необхідно враховувати швидке зниження активованого стану. Хімічна адсорбція газів відновлює міжатомні зв'язки, що звільнилися. Активація поверхні значно посилюється при утворенні у поверхневому шарі стрічки структурних дефектів. При цьому не тільки зростає енергія атомів, а й збільшується швидкість їх дифузії в про-

цесі їх хімічної взаємодії. Підготовку стрічки слід проводити так, щоб поряд з очищенням здійснювалася її активація. В якості проміжного шару використовуються металеві порошки, які характеризуються розміром часток – середнім або граничним розмірами фракції, типові значення яких лежать у межах 1 ... 50 мкм. Вони можуть відрізнятися за формою і методом виготовлення.

Однією з найважливіших характеристик порошку, що використовується в якості проміжного шару при електроконтактному наварюванні, є вміст оксидів і інших домішок, що ускладнюють отримання міцних з'єднань покриттів з основним металом. Порошок одного і того ж матеріалу і одного і того ж дисперсного складу, але різних виробників і навіть в залежності від партії одного і того ж виробника можуть давати різні за якістю характеристики проміжного шару.

В даний час випускається велика різноманітність металевих порошків, у тому числі і порошків спеціального призначення (табл. 1.3) [70].

Таблиця 1.3

Металеві порошки, що застосовуються у якості проміжного шару

| Fe, % | Ni, % | C, % | Cu, % | Mn, % | Si, % | S, % | P, % | Cr, % | B, % | Co, % | Al, % | Pb, % | Zn, % | Sn, % |
|------------|--------|-----------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| ПЖ | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | - | 0,8...1,2 | - | 0,6...1,1 | 0,6 | 0,05 | 0,05 | - | - | - | - | - | - | - |
| ПЖР | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | - | 0,05 | - | 0,11 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | - | - | - | - | - | - | - |
| ПР-НХ13СР | | | | | | | | | | | | | | |
| <5,0 | основа | 0,3 | - | - | 2,4 | - | - | 13,0 | 1,5 | - | - | - | - | - |
| ПР-НХ15СР2 | | | | | | | | | | | | | | |
| <5,0 | основа | 0,47 | - | - | 3,1 | - | - | 15,0 | 2,0 | <0,2 | - | - | - | - |
| ПР-НХ16СР3 | | | | | | | | | | | | | | |
| <5,0 | основа | 0,75 | - | - | 3,2 | - | - | 16,0 | 2,7 | - | - | - | - | - |
| ПР-НХ17СР4 | | | | | | | | | | | | | | |
| <5,0 | основа | 1,0 | - | - | 4,1 | - | - | 17,0 | 3,6 | - | - | - | - | - |
| ПР-ФБХ6-2 | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | - | 3,5...5,5 | - | 1,5...4,0 | 1,0...2,5 | <0,07 | <0,06 | 32,0...37,0 | 1,3...2,0 | - | - | - | - | - |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-------------|----------------|-----------|------------------|---------------|-----------|-------|--------|-----------------|----|------|---------------|-------|------|------|
| ПР-Х17Г8М5 | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | <0,2 | <0,12 | - | 7,5.. .8,5 | <0,5 | <0,05 | <0,05 | 16,5... 17,5 | - | - | - | - | - | - |
| ПГ-УС25 | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | 1,0...1,8 | 4,4...5,4 | - | <2,5 | 1,6...2,6 | - | - | 35,4... 41,0 | - | - | - | - | - | - |
| ПР-ЧН15Д7 | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | 15,0 | 2,6 | 7,0 | 1,0 | 2,2 | - | - | 2,2 | - | - | - | - | - | - |
| ПР-Х18Н9 | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | 8,0...11, 0 | <0,12 | - | <1,0 | <0,8 | <0,02 | <0,035 | 16,0... 20,0 | - | - | - | - | - | - |
| ПР-НЮ5 | | | | | | | | | | | | | | |
| <1,0 | основа | <0,1 | - | <1,0 | <1,0 | - | - | - | - | - | 5,0 | - | - | - |
| ПВ-Х25Ю6 | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | - | <0,2 | - | - | - | - | - | 25,0 | - | - | 6,0 | - | - | - |
| ПВ-Н70Ю30 | | | | | | | | | | | | | | |
| <0,2 | основа | <0,07 | - | - | - | - | - | - | - | - | 30,5 | - | - | - |
| ПКХ25Н10Ю10 | | | | | | | | | | | | | | |
| основа | 10,0 | - | - | - | - | - | - | 10,0 | - | 24,5 | 0,91 | - | - | - |
| ПР-БрАМц9-2 | | | | | | | | | | | | | | |
| <0,5 | - | - | 86,0.. ..90,5 | 1,5.. .2,5 | <0,1 | - | <0,01 | - | - | - | 8,0.. 10,0 | <0,03 | <1,0 | <0,1 |

Для відновлення деталей у [106] запропоновано спосіб армування, що забезпечує створення композиційного гетерогенного покриття, яке містить моношар часток спеченого твердого сплаву, розміром 100 ... 500 мкм.

Матрицею в шарі слугує сталева стрічка, приварена разом з частками на поверхню деталі регульованими імпульсами струму, без нагрівання деталі і без деструкції часток.

Для відновлення деталей армуванням згідно з [106, 116] можуть бути використані частки гранульованих і подрібнених спечених твердих сплавів, а також інші тверді сполуки тугоплавких металів. Частки можуть закріплюватися на стрічці або деталі, наприклад, за допомогою клеїв. Залежно від матеріалу, режиму наварювання і форми частинок, вони занурюються в тіло деталі на 20 ... 25% свого розміру

або майже цілком (на 90%) розташовуються у стрічці. Зносостійкість армованого різними твердими сплавами шару в 10-55 разів вище, ніж загартованої сталі. Згідно з [106, 116] вирішальний вплив на зносостійкість шару у з'єднанні в цілому здійснює площа, яку займають тверді частки, і рівномірність їх розташування на поверхні тертя, в першу чергу, в напрямку тертя.

Оптимальний розмір твердих частинок з урахуванням високої зносостійкості армованого шару, а також малої величини зносу більшості деталей становить 300 ... 500 мкм при одношаровому розташуванні. Застосування композиційного гетерогенного покриття призводить до збільшення зносостійкості відновлених виробів у 4-20 разів і підвищення ресурсу – в 2-3 рази [106, 108].

Прогресивним методом є використання аморфних стрічок, які є новим класом матеріалів, який володіє високими фізико-механічними і хімічними властивостями (табл.1.4) [107, 108].

Таблиця 1.4

Аморфні стрічки

| Найменування | Товщина, мкм |
|---------------------------------|--------------|
| СТЕМЕТ: | |
| на основі міді – 1101 | 30...50 |
| на основі титану – 1201, 1202 | 40...60 |
| на основі цирконію – 1409 | 40...60 |
| на основі нікелю – 1301, 1311 | ≤ 60 |
| СПАЙМЕТ: | |
| на основі міді – СМ701, СМ710 | 20...50 |
| на основі нікелю – СМ610, СМ621 | 20...50 |

Заготовки з аморфних стрічок для проміжного шару вирізують по аналогії з металевими стрічками.

Покриття, отримані в процесі відновлення або зміцнення деталей електроконтактним наварюванням, повинні відповідати таким вимогам:

- покриття повинне бути суцільним, однорідного кольору, без тріщин, відшарувань, слідів місцевої корозії;
- шорсткість покриття повинна бути не більше 80 ... 100 мкм за ГОСТ 2789-73;
- мінімальна товщина покриття встановлюється в залежності від призначення покриття і умов експлуатації;
- покриття повинне бути міцно пов'язане з основним металом і не відшаровуватися.

Для підвищення зносостійкості ріжучих робочих органів промислових м'ясо-рубко-переробної галузі АПК в роботі [126] проводиться електроконтактне наварювання стрічок з вуглецевих сталей 45, 65Г, У8А і ХВГ, зміцнених дифузійним хромуванням на величину від 0,012 до 0,030 мм з мікротвердістю від 11870 до 19450 МПа. При цьому тривалість роботи серійних і випробувальних хрестових ножів, зміцнених електроконтактним наварюванням дифузійно-хромованих стрічок збільшується між переточуваннями з 6,8 ... 8 до 13 ... 18 год [126]. В роботі [107] запропонований спосіб електроконтактного наварювання стрічки з корозійно-стійкої сталі і підшаром зі сталі ВСтЗпс, який підвищує конструкційну міцність деталі. Поверхня покриття зі стрічки з корозійно-стійкої сталі має високу зносостійкість і необхідний опір руйнуванню.

Проведений аналіз показав, що застосовані для електроконтактного наварювання матеріали дозволяють отримувати на робочих поверхнях деталей машин і механізмів шари з необхідними експлуатаційними властивостями. Проте зношування різних конструктивно-подібних груп деталей коливається від 0,01 до 10 мм. Залежно від величини зносу і вимог до якості робочих поверхонь відновлювані деталі поділяються на три умовні групи [127, 19]. До першої групи віднесені деталі зі зносом в інтервалі 2 ... 10 мм. Таких величин зносу досягають деталі ходової частини тракторів, що піддаються корозійно-механічному зношуванню з переважанням абразивного [127]. Ця група містить в собі до 7% обсягу можливих відновлюваних деталей. Для даної групи деталей доцільно використовувати електроконтактне наварювання

дроту. Деталі другої групи знаходяться в інтервалі зносів 0,6... 2 мм. Ця група деталей більш численна (до 10%). Третя група деталей зі зносом від 0,01 до 0,6 мм є переважаючою – до 83% зношених деталей [127]. Причому знос до 0,1 мм мають 52% деталей, до 0,2 – 12%, до 0,3 мм – 10%, до 0,4 мм – 1%, до 0,5 мм – 5% і до 0,6 мм – 3%. Для деталей другої і третьої груп доцільно використовувати електроконтактне наварювання металевого порошку або стрічки [78, 106, 109].

На жаль, електроконтактне наварювання металевого порошку має низку недоліків, один з яких – складність і трудомісткість операцій подачі і рівномірного закріплення порошку на відновлюваній поверхні, неможливість отримання покриттів із стабільними властивостями при використанні суміші порошків. Композиційне покриття може бути отримане або з порошку стабільного заданого складу або за рахунок використання суміші порошків. Перший варіант є, як зазначалося вище, досить дорогим через високу вартість таких порошків. Крім того, порошків, спеціально призначених для електроконтактного наварювання, не існує. Це змушує застосовувати порошки, які випускають для газотермічних і схожих з ними технологій. Використання таких порошків у технологічних процесах електроконтактного відновлення та зміцнення поверхонь деталей часто перешкоджає отриманню покриття із заданими властивостями.

1.5. Методи підвищення експлуатаційних характеристик покриттів хіміко-термічною обробкою

Ефективним методом підвищення експлуатаційних характеристик деталей, що працюють в умовах зношування, з нанесеними на їх поверхні покриттями, згідно з [126], є хіміко-термічна обробка. Утворення у поверхневому шарі гетерогенної структури забезпечує в процесі експлуатації найбільше навантаження окремих ділянок у поверхневих шарах без залучення до процесу зношування глибинних шарів. При цьому найбільш повно реалізується правило позитивного градієнту зсувного опору згідно з [33] і забезпечується здатність покриття прис-

корено знижувати рівень контактних напружень. Припрацьовування відбувається наступним чином: спочатку протікає інтенсивне припрацьовування переважно на макрорівні, коли під дією пластичної деформації і зношування поверхневого шару збільшується контурний і фактичний майданчик контактування; надалі після досягнення певної площі контактування відбувається збільшення площі одиничних фактичних контактів і збільшення їх числа переважно на мікрорівні, як свідчать дані [10]. Рівноважна шорсткість встановлюється після припрацьовування незалежно від величини і характеру первісної шорсткості поверхневого шару з одночасною самоорганізацією трибосистеми в результаті структурної пристосовуваності матеріалів поверхонь в умовах тертя [119].

Особливості роботи матеріалів з гетерогенною структурою поверхневого шару передбачають взаємодію м'яких фаз і твердої матриці в процесі пружної і пластичної деформацій. При використанні гетерогенних сплавів з м'якою фазою в процесі припрацьовування найбільш інтенсивно ніж у період після припрацьовування відбувається витискання м'якої фази внаслідок відмінності меж пластичності складових і різного ступеня пластичної деформації при напруженнях вище межі текучості матриці і м'якої фази. При загасаючій швидкості процесу припрацьовування поверхневого шару встановлюється певна структурна відповідність двох контактуючих поверхонь, яка і забезпечує в даних умовах роботи високий рівень несучої здатності.

Насичення металевих покриттів із зовнішнього середовища різними елементами та системами елементів змінює їх хімічний і фазовий склад, підвищуючи твердість, а внаслідок цього і зносостійкість робочого поверхневого шару, створюючи сприятливі напруження стиснення і усуваючи дефекти структури. Змінюючи систему і ступінь легування матеріалу покриттів і режими насичення їх певними компонентами, можна отримати практично будь-які необхідні характеристики поверхневих шарів робочих поверхонь, що достатньо складно одержати в об'ємі відомих конструкційних матеріалів. Для деталей, що працюють в умовах недостатнього змащення або зовсім без нього доцільно застосовувати

метод цементації, що забезпечує утворення графітовмістких дифузійних шарів на поверхні деталі [130]. Для збільшення вмісту графіту в структурі дифузійного шару до 20% деталі після цементації можна піддати додатковому відпалу з метою графітизації при температурі 900-920 °С протягом 8-10 годин [130]. Проте вартість та час проведення такого процесу графітизації, пов'язаний з тривалим високотемпературним нагрівом, ускладнюють його впровадження у виробництво, викликаючи певні технологічні та економічні труднощі [131]. Це обумовило розробку технології прискореної графітизації поверхневих шарів сталевих деталей за допомогою двоступеневої нітроцементації, що включає низько- і високо-температурну стадії процесу насичення робочої поверхні [132]. Для проведення такого процесу поверхневої обробки використовується спеціальна азотисто-вуглецева паста, яка при низьких температурах сприяє насиченню сталі азотом, а при високих температурах обробки – вуглецем [130-133].

Серед поширених методів зміцнення відновленої електроконтактним наварюванням поверхні відомим є хіміко-термічна обробка поверхневого шару боруванням і титануванням. При боруванні в робочому поверхневому шарі утворюються бориди заліза, що характеризуються високими показниками твердості та зносостійкості, а при титануванні має місце утворення у вихідному матеріалі карбїду титану, що крім твердості і зносостійкості відрізняється також високою корозійною стійкістю. Застосування вказаних методів зміцнення робочих шарів поверхні деталей дозволяє істотно підвищити експлуатаційні характеристики деталей. Сутність методу борування поверхневого шару полягає у насиченні поверхневих шарів бором, що дозволяє застосовувати його з метою підвищення поверхневої твердості і зносостійкості деталей, що працюють в умовах зношування.

При проектуванні технології борування необхідною умовою ефективного протікання процесу є наявність у контакті з поверхнею активного атомарного бору, а також важливими параметрами є значення температури і тривалості витримки деталі у насичувальному середовищі, що визначають характер протікан-

ня процесу дифузії атомарного бору в сталеву поверхню. Залежно від агрегатного стану насичувального середовища, застосовують борування різними методами, а саме: у порошках; з обмазок із застосуванням пічного нагріву та швидкісного нагріву деталей ТВЧ [134, 135], а також з використанням лазерного променя [136-139] та електричної дуги [140]; в рідких [141, 142] та газових середовищах [143, 144]. Борування у порошковому середовищі проводять з використанням аморфного бору та його сплавів та сполук. Процеси насичування поверхневих шарів проводять у герметичних контейнерах, а з метою меншого виснаження насичувальної суміші застосовують плавкий затвор для герметизації контейнеру. Також у якості захисного середовища при порошковому боруванні застосовується вакуум, захисні атмосфери та псевдорозріджені середовища.

Мікроструктура борованого шару сталевій поверхні [145] містить голки боридів, що орієнтовані перпендикулярно поверхні, яка піддається насичуванню, і впроваджуються у зерна фериту вихідної структури поверхні деталі. Голкоподібна форма боридних шарів вказує на те, що при їх утворенні відбувається швидке зростання боридних фаз в напрямку, перпендикулярному до поверхні деталі, в той час як уздовж поверхні розвиток цих фаз практично не відбувається, що, згідно з даними роботи [146], залежить від щільності центрів утворення боридів.

Характер зміни товщини боридних шарів залежить від часу поверхневої обробки конструкційних матеріалів. Структурно-фазовий склад зони боридів та товщина боридного шару залежить від параметрів процесу, способу борування і часу перебування поверхні під дією насичувальної суміші, а також визначається хімічним складом саме конструкційного матеріалу, що піддається обробці [147]. Так, згідно з даними роботи [148], відносна кількість боридної фази збільшується при застосуванні у насичувальній суміші кремнію, молібдену, вольфраму, титану, хрому, нікелю та марганцю, проте додавання алюмінію, вуглецю та міді зменшують її кількість.

Характерні властивості боридних шарів полягають у високій твердості, високій зносостійкості при різних видах тертя та зношування, стійкості при низьких та високих температурах, а також стійкості при роботі у різних агресивних середовищах [143], що дозволяє широко застосовувати метод борування для зміцнення поверхонь деталей машин та обладнання, а також елементів ріжучого і штампового інструменту [149-153].

Останні дослідження, спрямовані на інтенсифікацію процесу борування і на підвищення якості одержуваного в результаті робочого шару, пропонують для досягнення необхідних результатів застосовувати зміну складу насичувального середовища або розробку нових технологій борування. Так, авторами робіт [154, 155] зазначено, що добавки рідкісноземельних елементів сприяють інтенсифікації процесу насичування поверхневого шару бором, збільшуючи товщину одержуваного робочого шару, його мікротвердість, а також стійкість проти окислення при роботі в умовах високих температур.

У рекомендаціях, даних авторами [156] стосовно усунення крихкості боридних шарів, запропоновано додавати до складу насичувальної суміші перехідних та рідкоземельних металів, що окрім того дозволяє зробити структуру боридних шарів більш компактною. Так, в роботі [157] пропонується введення до насичувальної суміші доломіту з метою інтенсифікації процесу насичування поверхневого шару. Однак широке застосування зазначеного методу обмежується дефіцитністю пропонованих компонентів підвищення ефективності та швидкості протікання процесу.

В роботах [158-160] зазначено, що на інтенсифікацію процесу створення боридного шару також впливає попередня хіміко-термічна обробка цементацією або азотуванням. Попередня термічна обробка поверхневого шару, що сприяє подрібненню зерна аустеніту, також дозволяє збільшити товщину одержуваного надалі боридного шару [161]. Найбільша товщина боридного шару на поверхні деталі досягається після термоциклічної обробки сталеві поверхні за-

вдяки зменшенню схильності боридів до крихкого руйнування без зниження їх твердості [162].

Таким чином, за даними робіт [163, 164], проведення хіміко-термічної обробки поверхні деталі спільно з термоциклічною дозволяє значно інтенсифікувати процес насичення поверхневого шару при одночасному покращенні механічних властивостей основного металу деталі, що сприятиме підвищенню її експлуатаційних характеристик. Суттєвими недоліками такої технології обробки поверхні є наявність істотних енерговитрат та підвищеної крихкості боридних шарів, що обумовило обмеження застосування даного методу поверхневої обробки в промисловості [143].

Створення на поверхні деталі шару карбіду титану із застосуванням насичення титаном дозволяє надати таких властивостей, як висока твердість, зносостійкість та корозійна стійкість. Мікротвердість карбіду титану значно перевищує ці показники інших карбідів металів, використовуваних в техніці, а саме карбідів вольфраму, молібдену, ванадію, хрому, що обумовлює широке застосування карбідів титану для зміцнення. Титанування знайшло застосування в галузі захисту деталей машин, що працюють в агресивних середовищах, для підвищення гідроерозійної стійкості деталей [143], а також зміцнення інструменту для холодної деформації металів, що дозволяє значно підвищити стійкість деталей порівняно з серійними виробами. Титанування проводять контактним газовим методом, у рідкому середовищі, в паровій фазі та газовим методом [141, 145].

Найбільш ефективним є метод титанування у порошкоподібних титановмісних сумішах завдяки своїй простоті та екологічності. Структура, фазовий і хімічний склад титанованого шару залежать, головним чином, від складу сталі і вмісту в ній вуглецю, що впливає на інтенсивність протікання процесу карбідоутворення, а також від методу і режиму насичення. При титануванні конструкційних сталей, завдяки впровадженню вуглецю з підкладки в карбідний шар під ним утворюється зона часткового зневуглецювання, що ви-

значається за мікротвердістю або за мікроструктурою при повільному охолодженні після титанування.

Основні недоліки даної технології поверхневої обробки, що заважають більш широкому поширенню застосування процесу титанування для зміцнення поверхонь, полягають у наявності під шаром карбіду титану знеуглецьованого шару з низькою мікротвердістю, що може викликати деформування шару при експлуатації; низькій окалиностійкості карбідного шару, що обмежує час проведення гартування, а, отже, зменшуються і розміри виробів, що піддаються титануванню; низькій жаростійкості, що не дозволяє використовувати покриття з карбіду титану для зміцнення виробів, що працюють в умовах високих температур; високій крихкості карбідних шарів, що обумовлюється відмінністю температурних коефіцієнтів об'ємного розширення карбіду титану і основного металу (при охолодженні з температури насичення відбувається розтріскування поверхневого шару, і чим товще шар, тим більше схильність до розтріскування).

Подальша термообробка також може привести до розтріскування шарів з тієї ж причини, що обмежує товщини зміцнених шарів на поверхні сталі до товщини 15...25 мкм [143]. Через це титануванню можна піддавати тільки вироби, які не потребують доведення [143]. З метою усунення імовірності утворення вказаних недоліків титануванню рекомендують піддавати леговані сталі, що відрізняються зниженим температурним коефіцієнтом об'ємного розширення, а також добре піддаються гартуванню, що забезпечує підвищення твердості поверхневого шару при закінченні охолодження після титанування до 56-61 HRC. Виходячи з вищевикладеного, можна відзначити, що область застосування процесів титанування в промисловості досить обмежена, і її розширення можливе тільки в разі насичення виробів титаном спільно з іншими елементами [143].

Насичення поверхневих шарів перлітних сталей алюмінієм дозволяє надати їм підвищену окалиностійкість і опір атмосферній корозії відносно деталей, що працюють при 560-585 °С [166]. Глибина алітованого шару коливається у межах 0,02-0,8 мм. Дифузійне алітування проводять у порошкоподібних

сумішах, у ваннах з розплавленим алюмінієм, методом металізації сталі алюмінієм з подальшим дифузійним відпалом, обробкою в аерозолях, електролізом з розплавленими солями алюмінію, а також газовим методом [166-168]. Найбільшого поширення в промисловості набув метод насичення в порошкових сумішах, оскільки він є найбільш простим у застосуванні, екологічно чистим і вибухобезпечним [145, 169-171].

Структура і фазовий склад алітованого шару залежать від методу алітування [172] і визначаються двома факторами [173]: дифузією алюмінію всередину сталевих виробів і самодифузією заліза до поверхні виробів, що сприяє збільшенню загальної глибини шару за рахунок дифузії алюмінію від поверхні деталі і наростанню шару на поверхні за рахунок самодифузії заліза. Після поверхневого алітування в порошкоподібних сумішах або газовому середовищі і травлення звичайними реактивами алітований шар виявляється у вигляді нетравленої зони [145].

Поряд з перевагами, метод алітування має низку недоліків, які обмежують область його застосування, а саме: низька зносостійкість і висока крихкість шару [174-176], що унеможлиблює застосування процесу алітування для зміцнення виробів, які працюють в умовах різних видів зношування; низька стійкість шару після тривалого перебування у вологому середовищі, що унеможлиблює використання алітування для зміцнення деталей машин і інструменту у якості самостійного процесу поверхневої обробки. Однак з огляду на те, що перевагою процесу алітування є висока швидкість дифузії алюмінію порівняно з дифузією інших зміцнюючих елементів, впливає, що насичення алюмінієм в комплексі з іншими елементами доцільно застосовувати для збільшення глибини насичування робочих поверхневих шарів конструкційних матеріалів.

Технологія боротитанування дозволяє підвищити захист поверхні деталей від газової корозії, корозії в агресивних середовищах, гідроерозії, від інтенсивного абразивного зносу і ін. при значно вищій стійкості поверхні, ніж після борування, хромування, борохромування і інших високоефективних процесів хімі-

ко-термічної обробки. Це вказує на те, що використання для зміцнення ріжучого інструменту процесу боротитанування є більш доцільним та ефективним, ніж застосування однокомпонентного борування або титанування. Боротитанування проводять наступними методами: порошковим, електролізним та з обмазок з пічним нагрівом або з нагріванням ТВЧ [177-179].

Через невисоку швидкості формування боротитанованих шарів при одночасному насиченні, неможливості повторного використання сумішей цей спосіб у промисловості застосовують рідко. Висока поверхнева твердість одержаних шарів забезпечується боруванням металевої основи з подальшим титануванням [143]. Боротитановані шари формуються також при боруванні сталей, що містять титан, причому змінюється голчаста будова боридів через збільшення в сталі вмісту титану, а також підвищення мікротвердості боридних фаз, що є важливим фактором забезпечення однорідності властивостей по глибині одержаного шару.

Позитивно впливаючи на якість поверхневого шару, двокомпонентні покриття також мають і низку недоліків, властивих відповідним однокомпонентним покриттям, які полягають у низькій твердості основного металу після насичення поверхневого шару, що викликає необхідність проведення наступної термообробки; різних значеннях коефіцієнтів термічного розширення поверхневого шару і основного металу [143], що сприяє розтріскуванню та руйнуванню зміцненого робочого шару при охолодженні або подальшій термообробці; наявності між шаром боридів титану і основним металом зони твердого розчину титану і бору в залізі з низькою мікротвердістю, що може привести до деформації шару в процесі експлуатації. Перевагами даної технології поверхневої обробки є створення робочого шару, який характеризується високою теплостійкістю, що дозволяє застосовувати його з метою зміцнення інструменту для гарячої деформації [143].

Для підвищення жаростійкості боридних покриттів на ріжучому і штампового інструменті застосовують бороалітування, яке полягає в одночасному або послідовному насиченні металів і сплавів бором і алюмінієм, що дозволяє підвищити експлуатаційну стійкість інструменту та обладнання від 2 до 15 разів,

що працює в умовах інтенсивного зносу зі змащенням і без змащення, в контакті з розплавленими металами, при впливі ударних навантажень, при підвищених і високих температурах, в умовах ерозійного зносу і багаторазових теплових і ін. [143].

Технологія бороалітування здійснюється в обмазках, розплавах, у газовому середовищі та в порошках, що є найбільш простим методом, який не вимагає застосування спеціального устаткування і матеріалів. Для одночасного насичення поверхні бором і алюмінієм пропонують використовувати склади, що містять в якості постачальника атомів алюмінію фероалюміній або саме алюміній, а в якості постачальника атомів бору застосовують карбід бору або оксид бору. Бороалітування істотно підвищує межу втоми й умовну межу корозійної втоми, різко знижуючи чутливість сталі до концентрації напружень при циклічному навантаженні в повітряному і в корозійному середовищі [143], також підвищується зносостійкість і жаростійкість поверхневого шару конструкційних сталей і сплавів.

Бороалітований шар має високу жаростійкість й окалиностійкість і тому виробі з цим шаром можуть піддаватися подальшій термообробці, проте такий поверхневий шар має низьку корозійну стійкість при роботі в агресивних середовищах [181]. Підвищення швидкості формування дифузійних шарів згідно з дослідженнями [164-184], забезпечується додаванням до насичувальної суміші рідкоземельних металів або оксидів некарбідоутворюючих металів [182-184]. Основний недолік пропонованих технологій поверхневої обробки є труднощі здійснення їх в промислових умовах.

Процес титаноалітування проводиться методом одночасного або послідовного насичення поверхневих шарів титаном і алюмінієм, що застосовується для підвищення жаростійкості, корозійної стійкості та зносостійкості [143]. Встановлено, що одночасне насичення вуглецевих сталей титаном і алюмінієм мають зносостійкість при сухому терті ковзання в два рази більшу, ніж сталь У8 у загартованому та у стані після низького відпуску, згідно з даними [181]. Крім того

для підвищення абразивної та ударно-абразивної зносостійкості і твердості наявності алюмінідів титану у поверхневому шарі недостатньо, що обумовлює необхідність застосування методу комплексного поверхневого насичення робочих шарів бором, титаном і алюмінієм з метою підвищення комплексу експлуатаційних характеристик.

Однією з переваг технології комплексного насичення конструкційних вуглецевих сталей є можливість варіювання співвідношення компонентів сумішей в широких межах. Крім того процес комплексного насичення виробів бором, титаном і алюмінієм дозволяє здійснювати формування нових типів покриттів з широким комплексом властивостей.

До перспективного напрямку застосування процесів комплексного поверхневого насичення конструкційних вуглецевих сталей бором, титаном і алюмінієм відноситься також можливість отримання зносостійких структур в поверхневих робочих шарах електродних матеріалів для подальшого їх електроконтактного наварювання. Однак можливості застосування цього способу розкриті не в повному обсязі.

1.6. Аналіз методів зниження залишкових напружень і підвищення втомної міцності навареного шару

З метою одержання заданих характеристик відновлених деталей необхідно проводити постадійне перетворення властивостей в певній послідовності з поступовим наближенням значень властивостей до заданих [111]. Стадійність обумовлюється тим, що не можна, з одного боку, перетворити одним методом одночасно всі різнорівні властивості деталей, з іншого – отримати відразу на одній стадії (операції) весь комплекс необхідних значень результуючих параметрів. Таким чином, якщо електроконтактне наварювання сталеву стрічкою спрямоване на нарощування поверхневого шару з перетворенням геометричних параметрів деталі і структури мате-

ріалу, то подальша термообробка спрямована на покращення властивостей поверхневого шару для забезпечення високої стійкості в умовах циклічного навантаження.

При розробці комбінованої технології відновлення деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження, необхідно враховувати, що відновленню електроконтактним наварюванням і термічною обробкою піддається не весь виріб, а тільки зношені ділянки, а товщина стрічки і глибина зони термічного впливу не перевищує декількох міліметрів [61].

Поверхневий шар металу покриття, нанесеного електроконтактним способом, найбільш навантажений і найменш захищений від шкідливих впливів, значно впливає на довговічність відновлених деталей. На структурний стан поверхневих шарів впливає не тільки остаточна операція обробки, а й послідовність їх. Попередня операція не повинна створювати неоднорідність, а наступна – повинна усувати неоднорідність, якщо вона виникає в результаті попередньої обробки [187]. Дослідження [86, 188] показали, що отримати однорідне металопокриття при відновленні електроконтактними методами по всій оброблюваній поверхні деталі не вдається. Оскільки електроконтактне відновлення деталей типу «вал» являє собою наварювання по гвинтовій лінії з перекриттям суміжних валиків, то структура металопокриттів має яскраво виражену неоднорідність [188].

Раніше наварений і загартований електродний метал при тепловій дії наступного зварного валика може нагріватися і відпускатися в різній мірі. Метал в зоні стиків нагрівається вище A_{c3} , а більш віддалені від стику об'єми електродного металу нагріваються нижче критичних температур. Верхні шари металопокриття більш інтенсивно охолоджуються в масивний мідний ролик-електрод, а нижні шари охолоджуються переважно в деталь. Таким чином, в металопокритті чергуються структури гарту, часткового і повного відпуску, що підтверджується і результатами виміру мікротвердості по глибині металопокриття і ЗТВ (рис.1.5) [187].

Одним з основних недоліків практично всіх металевих покриттів, що наносяться різними методами (наплавленням, газотермічним напиленням, електрооса-

дженням, електроконтактним наварюванням і ін.), є наявність в них залишкових напружень, які негативно позначаються на втомній міцності та інших властивостях деталей з покриттями. У роботах [189, 108] показано, що зменшити зазначений недолік можна правильним вибором режиму охолодження і кроку наварювання деталі по гвинтовій лінії.

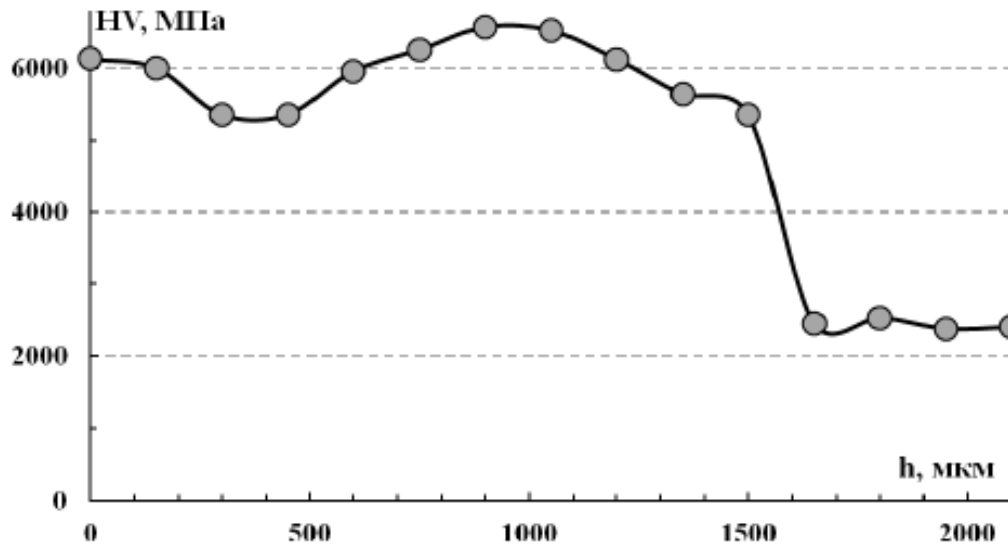


Рисунок 1.5 – Розподіл мікротвердості по глибині навареного шару

Проте згідно з [187] кардинально поліпшити структуру можна шляхом введення в технологічний процес відновлення додаткових зміцнюючих операцій – таких як ППД роликками, електромеханічне зміцнення, гартування з нагрівом ТВЧ, термообробка та ін. [188]. Як показали дослідження [108] покриттів, отриманих електроконтактним приварюванням стрічок, вони зазнають значних залишкових напружень в поверхневому шарі, що впливає і на утворення мікротріщин. В роботі [186] також підкреслюється, що якість відновлення деталей електроконтактним наварюванням високовуглецевих сталевих стрічок багато в чому визначається властивостями металопокриття і перш за все їх стійкістю до утворення тріщин, які виникають через термічні напруження, що утворюються при гартуванні поверхні. Результати досліджень [189] покриттів, отриманих електроконтактним наварюванням

різних електродних матеріалів, свідчать про утворення тріщин на ділянках приварювання стрічки зі сталей У9 і 65Г (табл.1.5) [190].

Шар привареної стрічки зі сталі 40 не має тріщин, і після шліфування до товщини 0,1 мм відшаровування стрічки не спостерігається. На привареній стрічці зі сталі Ст3 і AISI304 (аустенітна корозійностійка, $\leq 0,08\% \text{ C}$) тріщин і відшаровування не спостерігається, проте через низький вміст вуглецю недоліком покриттів з цих сталей є низька твердість одержуваного покриття.

Таблиця 5.1

Зростання мікротріщин у навареному шарі

| Вид електродного матеріалу | Матеріал зразку | Загальна довжина мікротріщин | |
|---|----------------------|----------------------------------|------------------------|
| | | Середньоарифметичне значення, мм | Основне відхилення, мм |
| Стрічка У9 у вихідному стані | сталь 45 | 32 | 1,7 |
| | загартована сталь 45 | 72 | 2,1 |
| Стрічка У9 після повного відпалу | сталь 45 | 20 | 1,0 |
| | загартована сталь 45 | 41 | 2,6 |
| Стрічка У9 після повного відпалу та високотемпературного відпуску | сталь 45 | 10 | 1,2 |
| | загартована сталь 45 | 24 | 2,2 |
| Стрічка У9 після високотемпературного відпуску | сталь 45 | 14 | 1,7 |
| | загартована сталь 45 | 44 | 2,5 |
| Армована одношарова спечена стрічка з порошку ПГС-27М | сталь 45 | 29 | 2,3 |
| Армована одношарова спечена стрічка з порошку ФБХ-6-2 | сталь 45 | 33 | 1,7 |
| Армована двошарова спечена стрічка ФБХ-6-2 + ПЖР3.200.28 | сталь 45 | 12 | 1,3 |
| Армована двошарова спечена стрічка ФБХ-6-2 + ПН-У40Х28Н2С2ВМ | сталь 45 | 22 | 2,1 |
| Порошок ПЖР3.200.28 | сталь 45 | 7 | 0,8 |

Встановлено [190], що покриття зі сталевих стрічки відрізняються зниженим в 1,3 ... 2 рази утворенням тріщин порівняно з кращими за цим показником дослідженими порошковими покриттями, крім того за критерієм мінімального утворення

тріщин найкращими покриттями є покриття зі сталеві стрічки і тонкошарових порошкових матеріалів з низьким вмістом вуглецю.

Для зменшення схильності покриття до утворення тріщин необхідно знизити напруження в стрічці. Згідно з [190] з цією метою рекомендують проводити термообробку (повний відпал або високотемпературний відпуск) сталевих стрічок, що дозволяє підвищити їх пластичність, а також термообробку навареного шару.

Також важливу роль при формуванні структури навареного і термообробленого шару відіграють умови охолодження [186]. Охолодження на повітрі призводить до утворення окалини, що вимагає збільшення припусків на механічну обробку, а, отже, і збільшення товщини електродної стрічки. Для усунення зазначених недоліків та отримання необхідної структури охолодження необхідно проводити в середовищі, яке забезпечувало б більш повільну швидкість охолодження і перешкоджало б окисленню поверхні. Серед відомих методів охолодження при різних видах термообробки, найбільш простими і доступними є способи охолодження в воді, маслі (гартування на мартенсит), в розплавах солей і металів (ізотермічне гартування). Застосування розплавів солей потребує суттєвої модернізації через високу складність процесу і пристроїв для його застосування у багатосерійному виробництві. Використання теплоізоляційних матеріалів шлаків і золи в промисловості обмежена і мало вивчена. Крім того низька податливість цих матеріалів при зануренні і вилученні відновлених деталей ускладнює їх застосування. У роботах [191] запропоновано використовувати графіт ГЛ-1 при термічній обробці в якості пружно-податливого охолоджуючого середовища, яке дозволяє акумулювати і використовувати тепло, що виділяється при структурно-фазових перетвореннях. Однак цей технологічний прийом теплоізоляції не настільки ефективний як при пічній обробці [192].

Перспективним технологічним прийомом є використання добавок шаруватих з'єднань графіту різного складу [193-195]. Доцільність застосування шару-

ватих з'єднань графіту зумовлена їх високою здатністю збільшувати свій уявний об'єм в 50 - 1000 разів при нагріванні з утворенням низькотеплопровідного шару [196]. Крім того існує можливість хімічного регулювання в широких межах температури терморозширення від 200 °С до 1200 °С за рахунок введення до їх структури спеціально підібраних речовин – інтеркалантів [197]. Більш докладні дані про властивості шаруватих з'єднань графіту, методах отримання і закономірності термодеструкції при нагріванні зведені в [198].

1.7. Аналіз існуючих математичних моделей процесу електроконтактного наварювання

З огляду на короткочасність протікання процесу електроконтактного наварювання, існують певні складності в прогнозуванні одержуваної якості покриття і відповідності його основними експлуатаційними властивостями. Тому виникає необхідність використання математичного апарату для аналітичного моделювання електроконтактного наварювання з метою оптимізації основних параметрів процесу для отримання покриття, яке б максимально відповідало заданим вимогам.

Незалежно від виду електродного металу (металева стрічка, дріт, порошкові матеріали або їх композиції) природа утворення з'єднання з основним металом залишається незмінною, що пояснюється спільністю основних закономірностей утворення зварного з'єднання при зварюванні металів тиском [19]. В [20] розроблено теоретичну модель формування осередків захоплення однорідних металів при електроконтактному приварюванні. Отримано залежності для розрахункової оцінки розмірів осередків захоплення. Так, при електроконтактному наварюванні сплавів на основі заліза це призводить до необхідності існування критичних температур, нагрівання вище яких робить можливим формування покриття з реальною міцністю з'єднання [26].

В роботі [199] відзначається, що при електроконтактному наварюванні дроту його пластична деформація призводить до зміщення наварених обсягів металу на поверхні виробу як в радіальному (поперек шву привареного металу) так і в осьовому (уздовж шву привареного металу) напрямках [200]. Згідно з [199] експериментальні дані свідчать про збільшення міцності зчеплення між електродним дротом і деталлю з ростом осьової деформації. Однак осьова деформація в даній роботі контролювалася зміною температурних параметрів умов наварювання і це ускладнює оцінку впливу власне деформаційних процесів на збільшення міцності одержуваного привареного шару. Авторами [201] запропоновано математичну модель процесу формування шару на поверхні циліндричних деталей при електроконтактному наварюванні дротом, що дозволяє вирішити задачу підвищення міцності зчеплення між електродним дротом і деталлю без збільшення тепловкладення і, відповідно, з мінімізацією термічного впливу на деталь. Ця проблема згідно з [201] може бути вирішена розвитком методів контролю осьової деформації дроту без зміни сили і тривалості імпульсів струму наварювання. Згідно із запропонованою в даній роботі схемою (рис.1.6) результуюча всіх сил прикладена до дроту в точках А і В, а вертикальна сила F_y в результаті кривизни поверхні нижнього електроду і деталі призводить до утворення горизонтальних сил F_{x1} і F_{x2} , що діють уздовж осі електродного дроту [201]. Розрахунок сил і моментів проведено з урахуванням коефіцієнту тертя ковзання в контакті дроту з відновлюваною деталлю. Коефіцієнт тертя визначено в залежності від шорсткості поверхні деталі і температури електродного дроту зі співвідношення:

$$f_{fr}=0,8k(0,877-0,00039T),$$

де k – коефіцієнт, що враховує шорсткість поверхні ($k=0,55$);

T – температура електродного дроту у межах від 800°C до 1300°C .

Згідно з представленою в [201] математичною моделлю процесу електроконтактного наварювання величина коефіцієнту відставання обертання ролик-електроду k_{el} повинна вибиратися в діапазоні 0,54-0,64. Результати експериментальних досліджень, наведені в [201], підтверджують можливість значного збільшення міцності зчеплення дроту з деталлю за рахунок збільшення тільки осьової деформації дроту. Внаслідок цього, осьова деформація дроту може бути представлена як ще один контролюючий параметр умов наварювання. Однак контролювати осьову деформацію дроту в процесі електроконтактного наварювання за рахунок моменту на ролик-електроді досить складно.

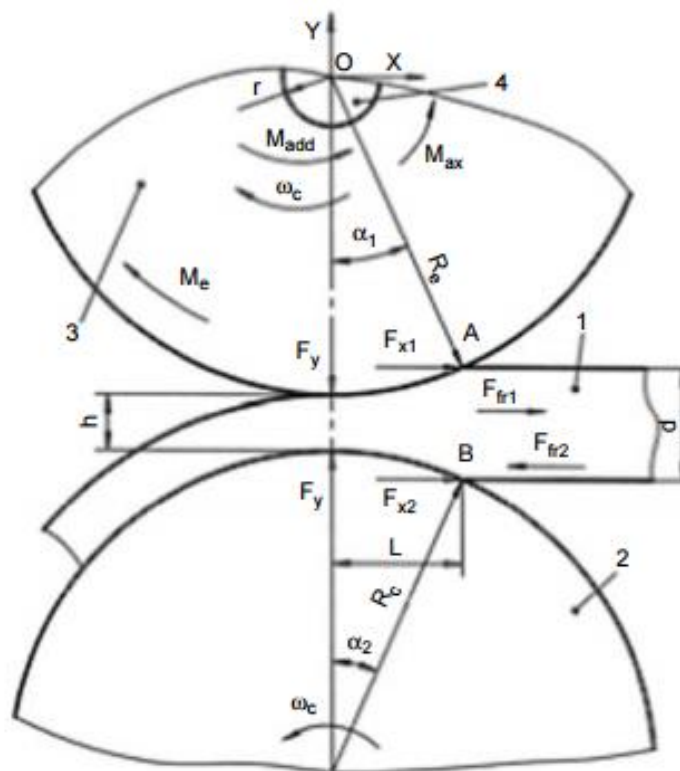


Рисунок 1.6 – Вплив зусиль на електродний дріт у площині ролик-електроду: 1 – електродний дріт; 2 – деталь; 3 – ролик-електрод, що обертається зі швидкістю e і притискається до деталі зусиллям F_y [201]

Тому для застосування способу наварювання з затримкою роликів-електродів на практиці необхідно розробити метод ефективного контролю осьової деформації електродного дроту.

В роботі [202] представлено математичну модель формування спеченої стрічки, армованої металевою сіткою для підвищення механічних характеристик, за допомогою методу електроконтактного роликowego зварювання. Визначено нормальні контактні навантаження в деформаційному осередку. Відзначено, що запропонований метод розрахунку зони спікання при виготовленні армованої порошкової стрічки може бути використаний також для оцінки параметрів процесу електроконтактного наварювання.

При електроконтактному наварюванні для отримання якісного зварного з'єднання важливо знати характер розподілу тепла в зоні з'єднання основного і привареного металу. Основною складністю при наварюванні робочих шарів є складність отримання необхідного розподілу температур по всій площі контакту через неконтрольовану і нерівномірну щільності зварювального струму в різних ділянках електричного контакту, а також через неоднакові умови відведення тепла.

В роботі [203] показано рішення задачі шляхом отримання масиву даних з подальшою їх обробкою і знаходженням оптимальних параметрів режиму наварювання. Однак для оптимізації параметрів процесу необхідно здійснити десятки експериментів, що є трудомістким процесом і займає велику кількість машинних ресурсів. З огляду на малу тривалість реального процесу електроконтактного наварювання, яка складає частки-одиноці секунд, зробити такий обсяг розрахунків в режимі реального часу складно.

Пропонована робота [204] спрямована на розробку моделі спрощеного розрахунку, що дозволяє оцінювати за різними критеріями вплив факторів на розподіл тепла по площі контакту зварного з'єднання і приймати конкретні рішення. Математичний опис розподілу температур дозволить спростити процес моделювання, побудови і прогнозування реальних залежностей при різних параметрах реального експерименту. Для опису даних отримані [204] рівняння регресії на основі функції щільності нормального розподілу імовірностей для одновимірної і двовимірної моделей розподілу температур в зоні контакту. Статистичний аналіз

дозволяє визначити ступінь впливу того чи іншого фактору на розподіл температур і в залежності від цього оптимізувати параметри процесу для отримання якісного зварного з'єднання.

В роботі [205] встановлено, що наварювання деталей нахиленими електродами виконується при наявності тангенціальної сили, що приводить до появи тангенціальних напружень в зоні контакту металів, що зварюються. Зі схеми розкладання зусилля стиснення, що діє на електрод (рис.1.7) видно, що при наявності кута α це зусилля стиснення розкладається на дві складові: нормальну і тангенціальну сили.

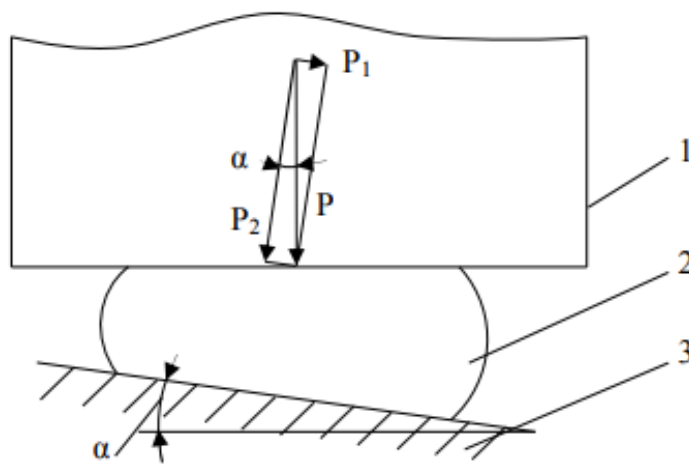


Рисунок 1.7 – Схема розкладання зусилля стискання електродів: 1 – ролик; 2 – валик навареного металу; 3 – деталь; P_1 і P_2 – тангенціальна та нормальна складові зусилля P , що діє на електрод, відповідно; α – кут нахилу робочої поверхні електроду до поверхні деталі [205].

Для виявлення можливого впливу тангенціальної сили, що діє в зоні контакту металів, на процес утворення з'єднання при електроконтактному приварюванні нахиленими електродами досліджено адгезію металів для простої двовірної моделі. Для простоти наявністю окисних плівок в роботі нехтували і припускали, що має місце чиста адгезія. Розглядався нескінченний брусок м'якого металу, що стискається твердою плоскою поверхнею так, що в результаті пластичної течії вся геометрична площа контакту приходить в безпосередній контакт з плоскою пласти-

ною (рис.1.8). Середній нормальний тиск дорівнює відношенню навантаження до площі контакту (рис.1.8, а). Потім прикладали тангенціальну силу F (рис.1.8, б), яка створює тангенціальні напруження σ (для рівноваги тонкого шару ABCD напруження σ повинні бути додані до BC і DA для запобігання обертання елемента). Згідно з критерієм пластичної течії при складних напруженнях в металі тонкий шар ABCD буде текти пластично за умови [205]:

$$p^2 + 3\sigma^2 = k^2,$$

де k – константа, близька до межі текучості металу при одноосному напруженому стані.

Спочатку $p \approx p_0$ і $\sigma = 0$, отже $k = p_0$. Одержано [205]:

$$p^2 + 3\sigma^2 = p_0^2.$$

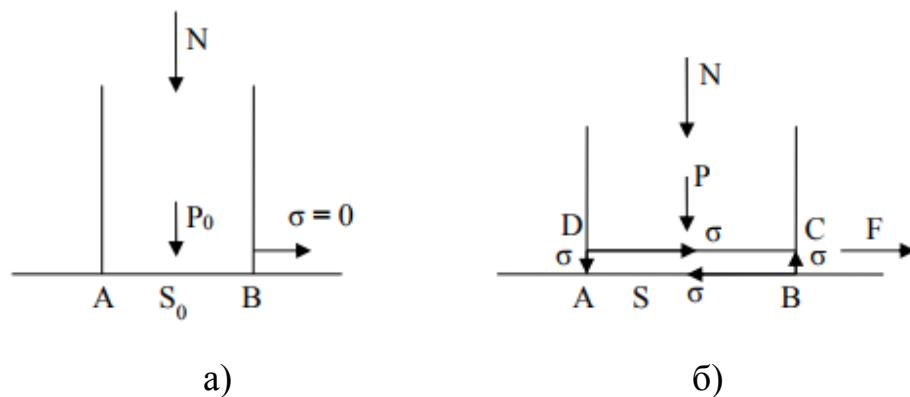


Рисунок 1.8 – Двовірна модель, що показує вплив складних напружень на утворення з'єднання у контакті металів тільки під дією одного нормального навантаження (а) та у контакті металів під дією нормального навантаження після прикладення тангенціального зусилля F (б) [205].

З останньої формули видно, що як p , так і σ визначають умови течії тонкої смуги ABCD. Показано, що якщо p спочатку дорівнює p_0 , то матеріал тонкої смуги

ги знаходиться вже в пластичному стані і навіть незначне тангенціальне напруження σ буде достатнім для розвитку подальшої пластичної течії. Це незначне тангенціальне напруження сприяє утворенню малого переміщення металу в зоні контакту, в результаті якого площа контакту металів збільшується від S_0 до S (рис.1.8, б).

Таким чином, встановлено, що навіть незначні тангенціальні напруження викликають зміщення і збільшення площі контакту металів. У цих умовах відбуваються мікроскопічні переміщення в зоні контакту металів. Додаткова пластична течія, викликана дією тангенціальних напружень в зоні контакту металів, допомагає зблизити недосконалості кристалічних решіток двох металів (вакансій, дислокацій і т.п.). Також показано, що наявність навіть невеликої тангенціальної сили в зоні контакту металів, що не викликає процесу макропереміщень при зварюванні тиском, сприяє інтенсифікації процесів схоплювання металів. Показано, що тангенціальні напруги сприяють активації контактних поверхонь, прискоренню утворення фізичного контакту металів в зоні їх з'єднання, а також сприяють дробленню і виносу окисних плівок за межі зони контакту металів за рахунок поліпшення умов пластичної течії в тонких приповерхневих шарах металу.

При побудові математичної моделі процесу електроконтактного припикання дискретних покриттів в [206] обмежилися схематичним, спрощеним уявленням об'єкту досліджень у вигляді «чорного ящика», коли математичною моделлю об'єкта досліджень є сукупність співвідношень виду:

$$Y_{\text{мод}} = f(X_i, Y_j, Z_r)$$

де $Y_{\text{мод}}$ – результуючий параметр (критерій оптимізації);

X_i – сукупність значень вхідних параметрів, що контролюються та керуються;

Y_j , – вхідні параметри, що контролюються, але не керуються;

Z_r – вхідні параметри, які не контролюються та не керуються.

Математичне моделювання процесу електроконтактного припікання покриттів дискретної структури складалося з таких етапів [206]:

- вибір керованих параметрів і рівнянь варіювання їх значень,
- вибір критеріїв,
- побудова робочої матриці проведення досліджень,
- побудова математичних моделей за результатами проведених досліджень,
- проведення статистичного дослідження цих моделей і обчислювального експерименту.

Конструювання плану експерименту проведено за допомогою пакету прикладних програм ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей) [206]. Наступний етап досліджень – проведення експериментів відповідно до генерованої робочої матриці плану. Після проведення експериментів і аналізу їх результатів розраховувалися середні значення відгуку і дисперсія по кожному експерименту [206]. Адекватність, відтворюваність та інформативність моделі оцінювали G -критерієм Кохрена, F -критерієм Фішера, критерієм Стьюдента, коефіцієнтом кореляції R .

Встановлено [206], що залежність пористості і зносостійкості покриттів дискретної структури від параметрів електроконтактного припікання дискретних покриттів (тиску, сили струму, часу імпульсів струму і пауз) можна представити рівняннями регресії, аналізуючи які показано, що найбільший вплив на пористість і зносостійкість покриттів надає взаємодія всіх трьох досліджуваних факторів електроконтактного припікання дискретних покриттів: тиску, сили струму, часу імпульсів струму і пауз. Майже в однаковій мірі на зносостійкість впливають тиск і струм, на пористість – величина струму і ефект взаємодії струму і тиску [206].

З розвитком технологій нанесення покриттів електроконтактними методами можливості емпіричних підходів у виборі конструктивних схем покриттів і технологічних режимів вичерпали себе, що передбачає на стадії проектування технологічного процесу аналіз напружено-деформованого стану електродного матеріалу в процесі електроконтактного наварювання з урахуванням реального ха-

рактеру розподілу його фізико-механічних властивостей під дією теплових і механічних навантажень. З огляду на складності фізико-хімічних процесів, що відбуваються при нанесенні покриттів електроконтактними методами, існуючі аналітичні залежності не дають можливості всебічно вивчити процес формування привареного шару.

1.8. Системи керування електроконтактним наварюванням

На сьогоднішній день у виробництві багато зусиль спрямовано на усунення негативних наслідків ролі людського фактору за рахунок механізації, автоматизації та роботизації контролю і управління відновлювальними операціями наварювання. Відомі методи неруйнівного контролю (просвічування рентгеном, ультразвукові, дилатометричні методи і ін.) в силу тих чи інших причин мають обмежене застосування. Крім того, ці методи, як правило, можуть бути використані для реєстрації якості вже відновлених виробів. Останнє призводить не тільки до подорожчання операції контролю, а й виключає можливість виявлення браку в ході процесу електроконтактного наварювання і своєчасного його усунення [207]. В результаті істотно знижується продуктивність процесу відновлення і його економічні переваги [208].

Електроконтактне наварювання представляє собою складний електротермічний процес з глибоким взаємозв'язком між параметрами. Одним з можливих принципів реалізації завдань управління є наступне уявлення про взаємозв'язок між параметрами процесу. Метою електроконтактного наварювання як технологічного процесу є формування температурного поля, що забезпечує отримання литої зони заданого розміру і оптимальних металургійних змін в зоні термічного впливу для досягнення привареним шаром заданих властивостей. При цьому важливі не тільки абсолютні значення температурного поля, але і тимчасові залежності розігріву та охолодження. Отже, глобальна мета управління – формування просторово-часового температурного поля, яке залежить в реальних умовах від цілого ряду

чинників: щільності струму, питомого електричного опору, площі контакту, товщини шару, що приварюється.

Критерій якості електроконтактного наварювання (міцність зчеплення, геометричні параметри шару та ін.) визначається результатом взаємодії багатьох параметрів, зміна яких не завжди може бути врахована внаслідок їх випадкового характеру. Крім того, електроконтактне наварювання може бути віднесене до такого класу технологічних процесів, при якому критерій якості (наприклад, геометрія нанесеного шару, міцність зчеплення), необхідний для побудови системи управління вимірюється тільки в дискретні моменти часу, але не безперервно. Однак деякі параметри процесу (струм наварювання, напруга, зусилля на ролику-електроді), корельовані з критерієм якості геометрії навареного шару, можуть вимірюватися в будь-які дискретні моменти, а також безперервно. Завдання полягає в тому, щоб за допомогою безперервного вимірювання основних параметрів режиму в ході електроконтактного наварювання з певною точністю автоматично оцінювати геометричні параметри навареного шару.

Геометрія зони наварювання, а, отже, і товщина шару, що приварюється, в процесі нагрівання змінюються під дією пластичних деформацій. При цьому повинна виконуватися умова механічної рівноваги, що визначається межею плинності матеріалу при даній температурі і зусиллі стиснення. Умови розповсюдження і накопичення теплоти залежать від фізичних властивостей матеріалу, функціонального шару, що приварюється, і основного металу виробу: теплопровідності, теплоємності, щільності, кількості прихованої теплоти плавлення. На зміну цих параметрів істотно впливає температура.

Дослідження якісних зв'язків різних параметрів процесу показують неможливість досягнення глобальної мети управління, тому необхідний пошук варіантів альтернативних цілей.

Параметрами електричної схеми є активний і індуктивний опір, які представляють собою результуючі опору, наведені до вторинного контуру. Функціональний

шар, що приварюється, і відновлюваний виріб в електричному відношенні представляють собою опір зони зварювання, що змінюється в часі. Як параметри зворотного зв'язку система управління може використовувати інформацію про зварювальний струм, напругу в обраних точках контуру і параметрах комутаційних процесів в тиристорному перетворювачі, які залежать від кутів включення тиристорів і від параметрів навантаження [209].

Вхідним параметром силової схеми машини для електроконтактного наварювання є тиск у мережі, який за допомогою пневматичного перетворювача перетворюється в зусилля стиснення. Управління зусиллям здійснюється набором дискретних сигналів, якщо пневматичний перетворювач складається з дискретних клапанів, або безперервним сигналом у разі застосування електропневматичного керованого перетворювача. Як параметри зворотних зв'язків можуть бути використані тиск мережі і зміна товщини шару, що приварюється, в процесі нагрівання [210].

Якщо врахувати, що температурне поле формується двома керуючими впливами – струмом і зусиллям, то для оптимальної зміни цього поля в часі необхідно здійснювати тимчасове програмування струму і зусилля. Причому якщо програмування струму здійснюється тільки на етапі нагріву шару, що приварюється, то за допомогою програмування зусилля здійснюється формування надійних контактів до нагрівання і управління процесом охолодження з метою запобігання утворення дефектів усадочного характеру [211]. У разі ідеального протікання електроконтактного наварювання для оптимізації температурно-часового поля було б достатньо знайти для даного матеріалу цикли за струмом і зусиллям, щоб забезпечити отримання цього поля, а завдання управління процесом електроконтактного наварювання складалося б в забезпеченні точної повторюваності цих циклів. Однак процес електроконтактного наварювання піддається дії збурень, компенсація яких вимагає коригування режимів за струмом і зусиллям безпосередньо в процесі наварювання [212-

214]. Збурення, які впливають на процес електроконтактного наварювання, можна розділити на наступні групи:

1. Властивості матеріалів шарів, що приварюються, і відновлюваного виробу – електро- та теплофізичні характеристики, геометричні розміри і стан поверхонь. Ці фактори мають тенденцію до зміни тільки від партії до партії і можуть бути враховані за допомогою підготовчих операцій перед наварюванням, забезпечення вхідного контролю та технологічних проб.

2. Технологічні параметри – сила струму, тривалість циклу наварювання, зусилля стиснення ролика-електрода. За допомогою апаратних засобів вони забезпечуються з достатнім ступенем точності.

3. Монотонні зміни електричного і силового контурів по мірі зношування електроконтактної машини. Ці зміни, крім зміни діаметра контактної поверхні ролика-електрода, відбуваються порівняно повільно і можуть бути усунені під час проведення регламентного обслуговування.

4. Умови проведення процесу електроконтактного наварювання – зміна напруги і повного опору зварювального контуру, шунтування струму наварювання. Вплив цих факторів не може бути скомпенсовано традиційними організаційно-технічними заходами. Урахування впливу саме цих факторів, включаючи зношування ролика-електрода, повинно забезпечуватися апаратурою контролю і управління [215].

Крім основних вхідних і вихідних сигналів, що характеризують протікання процесу електроконтактного наварювання, система управління повинна приймати і відповідним чином відпрацьовувати сигнали, що характеризують роботу електроконтактної машини і забезпечують безпеку її експлуатації, тобто сигнали від температурних датчиків, датчиків охолоджуючої води, трансформаторів струму в первинному ланцюгу. Узагальнюючи все вище сказане, можна виділити дві основні задачі, які повинна виконувати система управління процесом електроконтактного наварювання [216]:

1. Забезпечення якісного процесу наварювання за рахунок управління струмом і зусиллям з урахуванням заданої програми і сигналів зворотного зв'язку, що надходять при протіканні процесу електроконтактного наварювання.

2. Забезпечення надійної і довговічної роботи електроконтактної машини шляхом виключення можливості аварійних режимів, скорочення часу проведення регламентних робіт за рахунок автоматизації діагностики електроконтактної машини.

Системи управління, які застосовуються в даний час, можна класифікувати за алгоритмом управління, який визначає вибір альтернативної мети системи управління (рис.1.9) [217-219].



Рисунок 1.9 – Класифікація систем управління за алгоритмом управління

За принципом дії системи управління поділяються на дві великі групи. Для першої з них альтернативна мета управління полягає в стабілізації умов електроконтактного наварювання. При цьому умови визначаються таким чином, щоб збереження їх автоматично компенсувало вплив збурень. У більшості випадків стабілізуючим параметром є діюче значення струму наварювання. Для цього параметру, окрім традиційної жорсткої стабілізації по зворотньому зв'язку, використовується так звана параметрична стабілізація струму, яка полягає в підтри-

мці значення струму при коливаннях напруги, виключаючи вплив інших параметрів. Іншим способом стабілізації умов електроконтактного наварювання є так званий активний контроль, при якому процес електроконтактного наварювання припиняється після досягнення певними параметрами заданих значень. Такими параметрами можуть бути інтеграли струму або напруги, досягнуте переміщення рухомого ролика-електрода, зниження динамічного опору.

До другої групи належать системи, в яких за допомогою контрольованого параметру визначається необхідна для компенсації зміна режиму наварювання [220]. Коригувальні системи являють собою порівняно нову групу систем управління процесом електроконтактного наварювання. Причому в основному вони працюють за чітким алгоритмом, що нагадує алгоритм роботи слідкуючих систем. В цьому випадку процес здійснюється таким чином, щоб зміна в часі контрольованого параметра відповідала деякій ідеальній кривій, яку знімають в еталонних умовах електроконтактного наварювання, при відсутності збурень.

В даний час для забезпечення якості навареного покриття розроблені і застосовуються різні регулятори, основним призначенням яких є стабілізація режиму електроконтактного наварювання при зміні таких факторів, як, наприклад, діаметр робочої поверхні електродів, напруга мережі, характеристики обладнання. Як правило, ці регулятори працюють за заздалегідь розробленим алгоритмом, який в процесі наварювання зазвичай не підлаштовується під умови, що змінюються [221].

Обмеження подібних систем управління пов'язані з тим, що компенсація різних збурень, що викликають однакові або близькі зміни значень контрольованого параметра, вимагає різної реакції при зміні режимів електроконтактного наварювання для досягнення мети управління. У таких випадках жорсткий алгоритм компенсації не дає бажаних результатів. При цьому будуть ефективні системи, що адаптуються до різних ситуацій і здатні змінювати не тільки параметри

закону, а й закон управління. В даний час таких систем управління в чистому вигляді не існує.

Можна виділити кілька методів контролю за параметрами процесу. Найпростіший здійснюється за допустимим відхиленням, наприклад, струму наварювання і напруги між роликами-електродами. Надалі цей метод отримав розвиток завдяки використанню алгоритмів нечіткої логіки, які дають можливість підвищити надійність контролю [222].

Для кількісної оцінки якості привареного шару використовують метод оцінки за регресійними моделями. Останні (зазвичай у вигляді поліномів першого або другого порядку) будуються за експериментальними даними наварювання методом математичної статистики. При цьому в досліджах намагаються врахувати всі збурення, які діють на процес у виробничих умовах. Для підвищення точності моделей застосовують різні алгоритми підлаштування коефіцієнтів моделі за даними експериментальної перевірки режиму безпосередньо на виробництві [223].

Характерною особливістю більшості відомих регуляторів є те, що вони використовують в своїх алгоритмах будь-який один параметр процесу. Великим внеском в регулювання процесу електроконтактного наварювання є розробка багатofакторних моделей [224], які враховують збурення, викликані зміною напруги мережі живлення, зношування робочої поверхні ролика-електрода, шунтування, опору вторинного контуру машини, зусилля на ролик-електроді і ін. Більшість цих збурень впливає на зменшення щільності струму в зоні приварювання, яке нелінійно залежить від багатьох факторів.

Останнім часом розробляються системи активного контролю процесом електроконтактного наварювання на основі математичних моделей, які відображають взаємозв'язок параметрів процесу наварювання з об'єктивними кількісними оцінками якості привареного шару. У ролі контрольованих параметрів зазвичай виступають сила струму наварювання і напруга між електродом і деталлю, а самі системи можуть бути пасивного, активного типу або коригувальні [225, 226].

У пасивних системах дані про тимчасові значення контрольованих параметрів закладаються в мікроЕОМ, далі проводиться розрахунок очікуваних геометричних характеристик привареного шару і приймається рішення про якість наварювання [227-230]. Однією з труднощів застосування даного способу контролю є висока похибка розрахунку розміру ядра в зоні приварювання внаслідок невідповідності області визначення моделі з областю контрольованих параметрів при зміні умов наварювання. Проблема вирішується введенням функцій масштабного перетворення, що дозволяють коригувати коефіцієнти моделі [231]. При цьому стає можливим одночасна видача інформації про стан робочої поверхні ролика-електрода і рекомендацій до зміни режимів наварювання [232]. Для зменшення часу спрацьовування систем такого типу дані про геометрію ядра в зоні приварювання можуть заноситися у вигляді заздалегідь розрахованих таблиць [233].

У системах управління активного контролю якісне з'єднання утворюється за рахунок регулювання тривалості циклу наварювання на основі даних про значення контрольованих параметрів, наприклад струму наварювання і напруги між роликом-електродом і виробом [234].

На основі математичної моделі можуть бути побудовані коригувальні системи автоматичного управління електроконтактним наварюванням, що виробляють обчислення кута відкриття тиристорів, який вводиться в наступному періоді, на підставі отриманих даних про значення контрольованих параметрів [235].

Використання систем управління електроконтактним наплавленням на основі таких математичних моделей дозволяє за рахунок зміни одного або декількох параметрів, наприклад опору і тепловиділення в зоні наплавлення [221], досягати заданого діаметра ядра в зоні сплавлення. При цьому для розрахунку використовуються багатофакторні регресійні моделі, в яких враховується вплив багатьох збурень, або адаптивні моделі, в яких коефіцієнти безперервно уточнюються в ході багаторазового перерахування під час роботи [224]. Недоліком

регресійних моделей є низька точність передбачення в області збурень, які складають більше 10% номінального значення параметра. При цьому коефіцієнти в цих моделях залишаються незмінними, тобто такими, які були отримані на основі статистичних досліджень у вузькій області [224].

Подальшим продовженням систем управління на базі математичних моделей є системи управління електроконтактним наварюванням за допомогою нейронних мереж. Такі системи, побудовані на принципі штучного інтелекту, знаходять все більше застосування в системах контролю і керування зварювальними процесами [207, 236-240].

Застосування моделей на основі нейронних мереж математично дещо складніше, ніж застосування регресійних моделей, однак при використанні нейронних мереж вдається підвищити точність і надійність прогнозування якості електроконтактного наварювання за рахунок того, що в нейронній мережі існує можливість аналізу динамічних параметрів процесу [241]. Здатність нейронних мереж до навчання і самонавчання дозволяє застосовувати їх для встановлення імовірнісної структури і порядку у випадкових процесах. Важлива перевага нейронних мереж полягає в можливості аналізу інформації, яка щойно надійшла, на основі адаптації попереднім значенням, що сприяє подальшому накопиченню досвіду в процесі роботи. Такі системи, побудовані на принципі штучного інтелекту, знаходять все більше застосування в системах контролю і управління процесами зварювання і наварювання [207, 236-242]. Вони можуть мати різну складність в залежності від параметрів зворотного зв'язку, причому кількість цих параметрів теоретично не обмежена. Загальним недоліком для таких методів є необхідність спрощення математичних моделей з метою скорочення обсягів обчислень в умовах обмеженої швидкодії керуючих ЕОМ. При цьому занадто складна модель вимагає використання дорогих ЕОМ, а надмірно спрощена модель може призвести до серйозних помилок при її реалізації.

Незважаючи на те, що нейронні мережі як науково-технічний об'єкт існують більше півстоліття, основні способи їх практичної реалізації обмежуються областю програмного моделювання в різних середовищах візуального (і невізуального) проектування. Програмні реалізації переважають над апаратними. Крім того, апаратні реалізації внаслідок своєї відносної дорожнечі досі не мають широкого розповсюдження. Однак їх питома вага в загальній кількості світових технологічних розробок неухильно зростає [243].

Сучасні системи управління електроконтактними процесами відновлення та зміцнення реалізуються на основі потужних однокристальних мікроконтролерів, функціональні можливості і продуктивність яких дозволяють реалізовувати (крім функцій прямого цифрового управління) складні алгоритми контролю якості шару, що приварюється, і управління процесом [244]. При використанні в цих контролерах нейронних мереж для контролю якості процесу електроконтактного наварювання необхідної якості нанесеного шару можна досягти завдяки застосуванню адаптивного алгоритму [241, 245]. Розрахунок вагових коефіцієнтів і порогових значень нейронної мережі виконується на персональному комп'ютері із застосуванням обчислень з плаваючою комою. У однокристальному контролері використання такого розрахунку для обчислення по нейронній мережі контрольованих параметрів якості займає багато часу і не поєднується з високою продуктивністю електроконтактних машин [241].

У практиці розробки інтелектуальних систем є тенденція використання гібридних моделей для вирішення різних практичних задач. Нечіткі нейронні мережі являють собою гібридні моделі, що поєднують в собі переваги нейронних мереж (можливість адаптивного самонавчання) і нечітких систем (хороша інтерпретованість одержуваного за їх допомогою результату). При цьому нечітка нейронна мережа в результаті навчання формує систему правил, що є основою знань системи. Нейронні мережі можуть автоматично здобувати знання, але процес їх навчання відбувається досить повільно, аналіз навченої мережі склад-

ний, так як навчена мережа зазвичай чорний ящик для користувача, будь-яку ап-ріорну інформацію (знання експерта) для прискорення процесу навчання в нейронну мережу ввести неможливо.

Системи з нечіткою логікою, навпаки, придатні для пояснення отриманих з їх допомогою висновків, але вони не можуть автоматично здобувати знання для використання їх в механізмах висновків. В основу апарату гібридних мереж покладено наступні правила: висновки робляться на основі апарату нечіткої логіки, але відповідні функції приналежності підлаштовуються з використанням алгоритмів навчання нейронних мереж, наприклад алгоритму зворотного поширення помилки. Такі системи використовують ап-ріорну інформацію, але можуть набувати нових знань і для користувача є логічно прозорими. Особливість систем даного класу полягає в використанні нейромережових структур і нечіткої логіки для керування складними динамічними об'єктами, здатних функціонувати в умовах невизначеності математичного опису об'єкта управління. Під невизначеністю в даному випадку розуміється невизначеність, обумовлена як браком інформації, необхідної для отримання кількісного опису процесів, що протікають в системі, так і складністю об'єкта управління.

Застосування класичних методів синтезу, як правило, передбачає, що об'єкти управління описуються лінійними динамічними ланками невисокого (зазвичай не вище третього) порядку. Зазначене допущення часто призводить до того, що класичні регулятори на практиці не забезпечують задані показники якості управління. Інтелектуальні системи автоматичного управління, що використовують апарат штучних нейронних мереж і нечітку логіку, дозволяють проводити ідентифікацію складних нелінійних динамічних об'єктів і синтезувати для них нелінійні закони управління, що дає можливість вирішувати завдання синтезу систем автоматичного управління в умовах невизначеності на основі наявних експериментальних даних, отриманих на об'єкті [246]. Така комбінація дозволяє утворювати своєрідну нейро-fuzzy мережу, властивості якої визначаються видом

функції приналежності, межами зміни вхідних сигналів і використовуваним методом дефазифікації, забезпечуючи при цьому зниження складності алгоритмів управління, скорочення часу проектування і впровадження у виробництво. Нетрадиційна технологія fuzzy-управління, що поєднує як якісні принципи синтезу нечітких систем, так і кількісні принципи традиційної теорії управління, є найбільш привабливою для автоматизації складних технологічних процесів. Використання алгоритмів нечіткої логіки дозволяє досягти високих значень показників якості для систем із заздалегідь невідомими параметрами або параметрами, які сильно змінюються, що робить дуже перспективним їх використання в питаннях управління процесами електроконтактного наварювання [247].

Висновки до розділу 1

1. Порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик альтернативних варіантів регенерації конструктивних розмірів робочих поверхонь деталей механізмів і машин показує, що в сучасних умовах дефіциту матеріальних та енергетичних ресурсів їх відновлення і зміцнення електроконтактними методами з використанням різних електродних матеріалів (дротів, стрічок) є високоефективним ресурсозберігаючим технологічним прийомом.

2. Сучасні електродні матеріали, що застосовуються для електроконтактного наварювання, в тій чи іншій мірі задовольняють регламентації надійності і довговічності, забезпечують дотримання принципів взаємозамінності і економічності.

3. Регламентування комплексу показників фізико-механічного характеру (механічні властивості металу поверхневих шарів, мікроструктура, залишкові напруження зі створенням сприятливого їх розподілу у поверхневому шарі) є значним резервом забезпечення надійності відновлених деталей.

4. Внаслідок багатоваріантності можливих технічних рішень застосування всебічного і комплексного підходу є необхідним не тільки в рамках всього тех-

нологічного ланцюга, а й в рамках кожної окремої її складової, оскільки тільки урахування всіх вихідних і результуючих параметрів може надати узагальнену оцінку ефективності конкретних технічних рішень і розроблених на їх основі рекомендацій для такої складноорганізованої системи як комплексна технологія відновлення поверхневого шару.

5. Вирішення задач з підвищення якості і зниження собівартості при збільшенні службових властивостей відновлених деталей робить необхідним проведення всебічних, комплексних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на розробку рекомендацій щодо вдосконалення конкретних технологічних заходів.

6. З точки зору зниження трудомісткості і термінів проведення наукових досліджень доцільним є зміщення акцентів у бік теоретичних методів аналізу, що базуються на розробці і числовій реалізації математичних моделей, в достатній мірі повно відображають реальні фізичні об'єкти. Використання даних заходів, тобто широке використання різного роду обчислювальних експериментів, сприятиме і одночасному розширенню обсягів наданої інформації за рахунок, наприклад, диференційованого оцінювання ступеню впливу кожного окремого технологічного або конструктивного параметру, забезпеченню можливості дослідження комплексної оцінки основних показників якості. Результати експериментальних досліджень в цьому випадку можуть бути використані в якості критеріальних для оцінки ступеню достовірності отриманих теоретичних рішень, а також для уточнення вихідних даних, необхідних для їх реалізації.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ СТРУКТУР МЕТАЛУ, НАНЕСЕНОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ МЕТОДОМ

Процес електроконтактного наварювання здійснюється спільним деформуванням матеріалу, що приварюється, і поверхневого шару деталі, нагрітих у зоні деформації короткими імпульсами струму. Перекривання зварних точок між собою досягається обертанням деталі зі швидкістю, пропорційною частоті імпульсів струму [248-250]. Таким чином, електроконтактне наварювання є сукупністю операцій нагріву, деформації та охолодження водою (верхні шари покриття більш інтенсивно охолоджуються у масивний ролик-електрод, а нижні шари – переважно у деталь), в результаті яких формування остаточної структури нанесеного шару характеризується неоднорідністю дисперсності та механічних властивостей, а також різною чутливістю до концентрації напружень [251].

Визначивши оптимальну структуру з точки зору фізичного стану поверхневих шарів (привареного шару та зони термічного впливу) і чутливості до концентрації напружень можна правильно обирати технологію відновлення. Регламентування комплексу показників фізико-механічного характеру (механічні властивості металу поверхневих шарів, мікроструктура, залишкові напруження з утворенням сприятливого їх розподілу в поверхневому шарі) є значним резервом забезпечення надійності відновлених деталей [252-254]. Наявність у поверхневому шарі неоднорідної структури приводить до зниження зносостійкості деталей, які працюють на втому в умовах концентрації напружень [255, 256]. В зв'язку з цим є доцільним проведення досліджень, націлених на виявлення мікроструктури, яка володіє низьким опором мікропластичній деформації та низькою чутливістю до концентрації напружень в умовах циклічного навантаження, стосовно обраної групи відновлюваних матеріалів і матеріалів, що приварюються.

2.1. Методика дослідження та обробки експериментальних даних

Для одержання заданих характеристик відновлених деталей необхідне поетапне перетворення властивостей у визначеній послідовності з поступовим наближенні значень властивостей до заданих [252]. Стадійність обумовлюється тим, що неможна, з одного боку, перетворити одним методом одночасно всі різні властивості деталей, з другого – одержати одразу на одній стадії (операції) весь комплекс необхідних значень остаточних параметрів [255]. Таким чином, якщо електроконтактне наварювання сталеву стрічкою націлене на нарощування поверхневого шару з перетворенням геометричних параметрів деталей і структури матеріалу, то наступна термообробка спрямована на покращення властивостей поверхневого шару для забезпечення високої стійкості в умовах циклічного навантаження. Враховуючи, що мікропластична деформація відіграє визначальну роль у концентрації напружень у привареному шарі, а, отже, й впливає на стійкість відновлених деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження, дослідження структури проводили з точки зору опору мікропластичній деформації. Дослідження мікропластичності наварених зразків проводили при деформації розтягування [257]. Підготовка зразків включала наступні операції. На зразки зі сталі марок Ст25, Ст40 і Ст40Х виконували електроконтактне наварювання. Матеріал стрічок обирали ідентичним маркам сталі зразків (табл.2.1), режими підбирали також у залежності від марки сталі (табл. 2.2-2.3).

Таблиця 2.1

Металеві стрічки для електроконтактного наварювання

| Марка сталі | ГОСТ | Товщина стрічки, мм | Хімічний склад, % | | | | | | | | | |
|-------------|----------|---------------------|-------------------|-----------|---------|-------|--------|--------|---------|-------|-----|-------|
| | | | C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | Fe | As |
| Сталь 25 | 3560-73 | 0,5 | 0,22-0,3 | 0,17-0,37 | 0,5-0,8 | <0,25 | <0,04 | <0,035 | <0,25 | <0,25 | ≈97 | <0,08 |
| Сталь 40 | 3560-73 | 0,5 | 0,37-0,45 | 0,17-0,37 | 0,5-0,8 | <0,25 | <0,035 | <0,035 | <0,25 | <0,3 | ≈97 | <0,08 |
| Сталь 40Х | 21996-76 | 0,5 | 0,36-0,44 | 0,17-0,37 | 0,5-0,8 | <0,3 | <0,035 | <0,035 | 0,8-1,1 | <0,3 | ≈97 | - |

Режими електроконтактного наварювання зразків із різних марок сталей

| Марка сталі | I , кА | P , кН | $t_{\text{імп}}$, с |
|-------------|----------|----------|----------------------|
| Сталь 25 | 6,0 | 1,25 | 0,04 |
| Сталь 40 | 6,0 | 1,25 | 0,04 |
| Сталь 40X | 6,5 | 1,5 | 0,06 |

В табл.2.3 приведено досліджувані наварені зразки та їх хімічний склад.

Хімічний склад досліджуваних сталей

| Марка сталі | Вміст елементів | | | | | | |
|-------------|-----------------|------|------|------|-----|-------|-------|
| | C | Mn | SI | Cr | Ni | S | P |
| 25 | 0,23 | 0,29 | 0,17 | сл. | сл. | 0,019 | 0,021 |
| 40 | 0,41 | 0,32 | 0,21 | сл. | сл. | 0,017 | 0,018 |
| 40X | 0,39 | 0,33 | 0,19 | 0,92 | сл. | 0,016 | 0,019 |

Після електроконтактного наварювання здійснювали нагрів випробних зразків у лабораторній муфельній печі. Наварені зразки зі сталей 25 і 40 піддавали нормалізації з наступним високотемпературним відпуском (табл.2.4).

Наварені зразки зі сталі 40X піддавали термічній обробці за декількома режимами, які визначили і різні структури: проводили нормалізацію з відпуском (див. табл.4), а наварені зразки після гартування (II, III групи) піддавали відпуску при різних температурах для одержання продуктів відпуску різної дисперсності. Після проведення термічної обробки наварені зразки шліфували на плоско-шліфувальному верстаті в розмір $3 \pm 0,1$ мм. Шліфування проводили при інтенсивному охолодженні, щоб уникнути утворення шліфувальних опіків. Маркували їх згідно з маркою сталі та групою термічної обробки (див. табл.2.4) і виготовляли зразки.

Випробування на розтягування проводили на пристрої ІМ-4Р. Для дослідження мікроструктури в процесі деформування наварену поверхню зразку полірували як металографічний шліф, закріплений в спеціальній оправці.

Режими термічної обробки наварених зразків для випробувань на мікропластичність

| Марка сталі | Група | Режим початкової термообробки | | | Режим відпуску | | |
|-------------|-------|-------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| | | Т, °С | Час витримки, ч | Середа охолодження | Т, °С | Час витримки, ч | Середа охолодження |
| 25 | А | 880-900 | 1 | повітря | 620 | 2,5 | разом із піччю |
| 40 | В | 860-880 | 1 | з піччю | 620 | 1,5 | разом із піччю |
| 40 Х | І | 850-870 | 1 | з піччю | 640-660 | 1,5 | разом із піччю |
| 40 Х | ІІ | 850-870 | 1 | масло | 640-660 | 1,5 | разом із піччю |
| 40 Х | ІІІ | 850-870 | 1 | масло | 540-560 | 1,5 | разом із піччю |

Для виявлення мікроструктури використовували хімічне травлення мікрошліфів у 4% розчині HNO_3 в етиловому спирті. Для дослідження мікропластичності, її однорідності в залежності від структури вздовж подовжньої осі зразку (рис.2.1) за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3 наносили ряд реперних точок пірамідою під навантаженням 20г. Відбитки наносили через кожні 0,04-0,05 мм, тобто через відстані, спільномірні з розміром зерна досліджуваних наварених зразків (рис.2.2).

За даними замірів відстаней між відбитками a_k визначали зміну цієї відстані в результаті прикладення даного напруження:

$$\Delta a_k = a_{k+1} - a_k, \quad (2.1)$$

де a_k – відстань між реперними точками до деформації.

Збільшення деформації Δa_k були позитивними, якщо відстань між даними точками збільшувалась, і негативними, якщо зменшувалась.

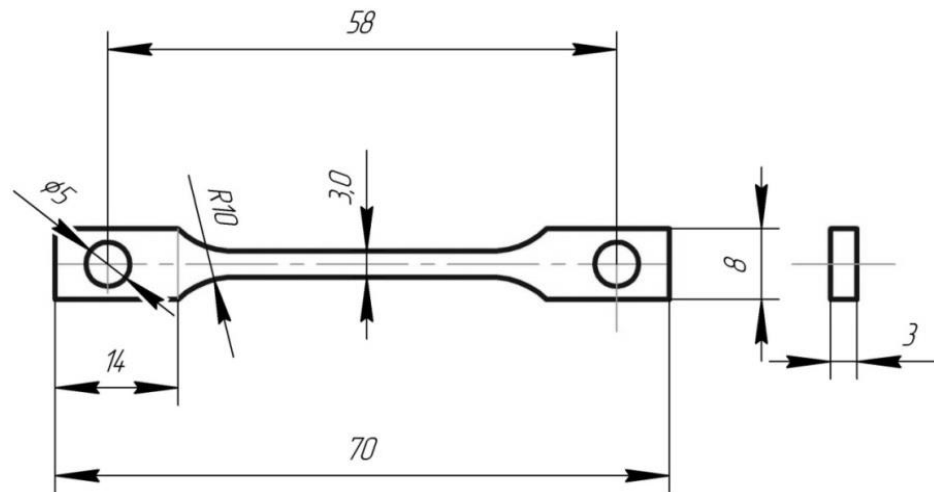


Рисунок 2.1 – Форма та розміри зразків для дослідження мікропластичності

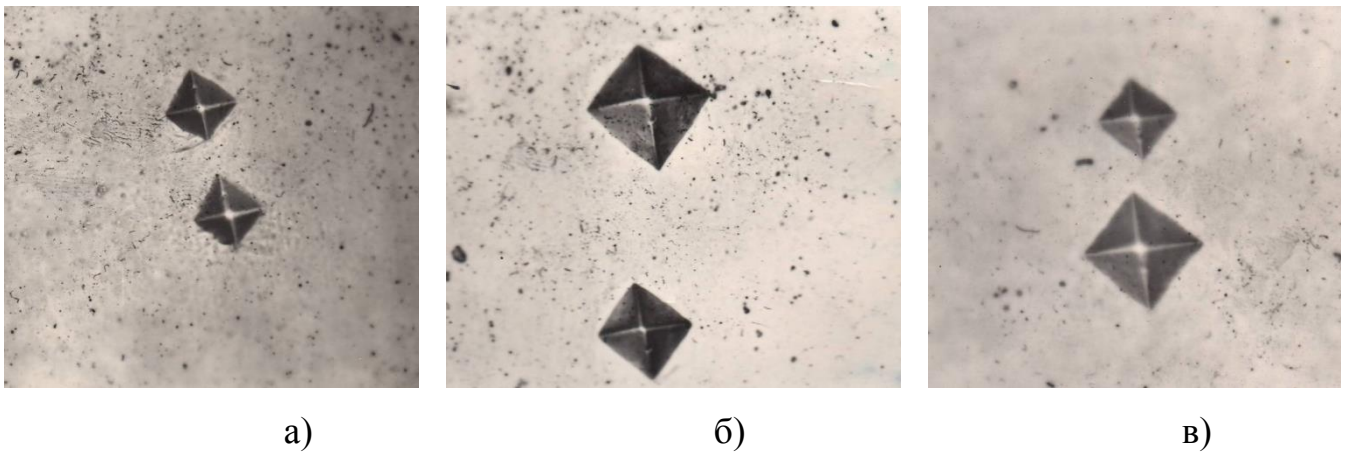


Рисунок 2.2 – Приклади мікроструктури поверхні наварених зразків групи II (а), III (б) і В (в) з нанесеними реперними точками ($\times 500$)

Незважаючи на те, що дослідження мікропластичності проводили в умовах статичного розтягування, в окремих мікронах виявлялась деформація стискання, а в інших – деформація розтягування. Це свідчить про неоднорідність деформації досліджуваного шару.

Величину відносної деформації для кожної базової відстані розраховували за формулою $\varepsilon_k = \ln \frac{a_{k+1}}{a_k}$. Як відомо [258], цей вираз справедливий для оцінки деформації, як при одноосьовому розтягуванні, так і при одноосьовому стисканні. Таким чином, для кожного даного навантаження одержували інформацію про мікродефор-

мації за даними 150-160 значень ε_k . Далі визначали середнє значення відносної деформації даного знаку [258]:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_k, \quad (2.2)$$

де $\bar{\varepsilon}_i$ – середня відносна деформація даного знаку під впливом даного i -того навантаження (i – номер навантаження).

n – число вимірюваних базових відстаней, які визначили деформацію даного знаку ($\approx 60 \dots 70$).

Дисперсія відносної деформації:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n \varepsilon_k \right)^2 \right]. \quad (2.3).$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{S^2}. \quad (2.4)$$

Коефіцієнт варіації мікропластичної деформації:

$$\gamma = \frac{S}{\bar{\varepsilon}_i} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

2.2. Закономірності мікропластичної деформації залежно від структури нанесеного шару

Експериментальні результати дослідження мікропластичної деформації наварених зразків у різному структурному стані приведені в табл.2.5-2.9. В наведених

таблицях представлено результати розрахунків експериментальних даних із визначення середньої математичної величини деформації $\bar{\varepsilon}_i$, позитивної середньої математичної величини деформації $+\bar{\varepsilon}_i$ і негативної $-\bar{\varepsilon}_i$ в залежності від прикладеного нормального напруження σ_i .

Таблиця 2.5

Експериментальні дані, які характеризують мікропластичну деформацію наварених зразків зі сталі 25 у нормалізованому стані (група А)

| σ_i , МПа | Деформація | | | Середньоквадратичне відхилення деформації | | | Коефіцієнт варіації деформації, % | | |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|---|-------|---------|---|------------|------------|
| | $\bar{\varepsilon}_i$ | $+\bar{\varepsilon}_i$ | $-\bar{\varepsilon}_i$ | S_1 | S_2 | S_3 | γ_1 | γ_2 | γ_3 |
| 30,5 | 0,009 | 0,005 | 0,009 | 0,008 | 0,011 | 0,006 | 59,45 | 58,71 | 60 |
| 50 | 0,009 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,012 | 0,00606 | 76,61 | 72,2 | 60,6 |
| 79,2 | 0,009 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,012 | 0,0065 | 80 | 77,42 | 72,2 |
| 109,8 | 0,01 | 0,008 | 0,01 | 0,011 | 0,013 | 0,011 | 81,2 | 100 | 73,3 |
| 140,2 | 0,01 | 0,008 | 0,01 | 0,013 | 0,014 | 0,011 | 83,93 | 105,4 | 78,23 |
| 169,5 | 0,011 | 0,009 | 0,012 | 0,013 | 0,015 | 0,014 | 89,58 | 122,2 | 78,95 |
| 200 | 0,011 | 0,011 | 0,014 | 0,014 | 0,022 | 0,015 | 100 | 150 | 83,78 |
| 219,5 | 0,016 | 0,018 | 0,015 | 0,019 | 0,023 | 0,015 | 100 | 162,5 | 90,79 |
| 250 | 0,047 | 0,054 | 0,019 | 0,030 | 0,039 | 0,017 | 127,2 | 166,6 | 107,1 |
| 280,5 | 0,048 | 0,055 | 0,037 | 0,043 | 0,048 | 0,031 | 137,5 | 170,9 | 122,2 |
| 320 | 0,056 | 0,062 | 0,039 | 0,047 | 0,058 | 0,031 | 144,4 | 209 | 141,6 |
| 341,5 | 0,103 | 0,104 | 0,076 | 0,061 | 0,061 | 0,069 | 172,7 | 220 | 155,5 |

Також приведені розрахункові величини, що характеризують неоднорідність мікропластичної деформації наварених електроконтактним методом зразків – середньоквадратичне відхилення S (відповідно по сумарній мікропластичній деформації S_1 , позитивній S_2 та негативній S_3) і коефіцієнт варіації по сумарній деформації γ_1 , позитивній деформації γ_2 та негативній – γ_3 . Для обробки експериментальних даних проводили математичне моделювання в програмному середовищі STATISTICA StatSoft 10.

Експериментальні дані, які характеризують мікропластичну деформацію наварених зразків зі сталі 40X після відпалу (група I)

| σ_i , МПа | Деформація | | | Середньоквадратичне відхилення деформації | | | Коефіцієнт варіації деформації, % | | |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|--|----------------|----------------|--------------------------------------|------------|------------|
| | $\bar{\varepsilon}_i$ | $+\bar{\varepsilon}_i$ | $-\bar{\varepsilon}_i$ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | γ_1 | γ_2 | γ_3 |
| 60,7 | 0,015984 | 0,025678 | 0,026 | 0,018 | 0,029 | 0,024 | 59,8 | 59,4 | 50,1 |
| 123 | 0,023255 | 0,025846 | 0,034033 | 0,027 | 0,035 | 0,024 | 68,5 | 68,1 | 70,7 |
| 186 | 0,030082 | 0,027925 | 0,034880 | 0,033 | 0,042 | 0,028 | 71,9 | 80,3 | 71 |
| 244 | 0,032564 | 0,030556 | 0,035800 | 0,041 | 0,045 | 0,029 | 79,8 | 112,9 | 73,9 |
| 305 | 0,033239 | 0,035679 | 0,036192 | 0,041 | 0,045 | 0,029 | 81,2 | 125,3 | 80,1 |
| 366 | 0,039689 | 0,042874 | 0,037646 | 0,048 | 0,047 | 0,029 | 101,3 | 137,4 | 81,2 |
| 427 | 0,041734 | 0,045840 | 0,039218 | 0,084 | 0,075 | 0,0306 | 131,1 | 235,6 | 92,3 |
| 488 | 0,051 | 0,056 | 0,041 | 0,088 | 0,103 | 0,032 | 201,2 | 240,7 | 238 |
| 528 | 0,057 | 0,066 | 0,043296 | 0,216 | 0,108 | 0,081 | 322,7 | 290,1 | 466,5 |
| 538 | 0,066929 | 0,079 | 0,044793 | 0,2780 | 0,187 | 0,209 | 500,5 | 302,2 | 487,2 |
| 602 | 0,070 | 0,101894 | 0,045 | 0,6305 | 0,308 | 0,303 | 705,4 | 524,1 | 868,6 |

Таблиця 2.7

Експериментальні дані, які характеризують мікропластичну деформацію наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом II (група II)

| σ_i , МПа | Деформація | | | Середньоквадратичне відхилення деформації | | | Коефіцієнт варіації дефо- рмації, % | | |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|---|----------------|----------------|---|------------|------------|
| | $\bar{\varepsilon}_i$ | $+\bar{\varepsilon}_i$ | $-\bar{\varepsilon}_i$ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | γ_1 | γ_2 | γ_3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 59 | 0,007 | 0,005313 | 0 | 0,006 | 0,0056 | 0 | 25 | 0 | 0 |
| 119 | 0,008 | 0,006 | 0,001493 | 0,006 | 0,00604 | 0 | 69 | 70 | 0 |
| 188 | 0,008329 | 0,008 | 0,008 | 0,011 | 0,007 | 0,000504 | 75 | 70 | 63 |
| 240,2 | 0,010599 | 0,009175 | 0,009 | 0,013 | 0,0173 | 0,0067 | 80 | 89,8 | 68 |
| 300 | 0,010668 | 0,009833 | 0,009091 | 0,021 | 0,018 | 0,011 | 85 | 100 | 74 |

Продовження таблиці 2.7

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|-----------|----------|----------|-------|-------|-------|-----|-----|------|
| 359 | 0,0133301 | 0,013591 | 0,010165 | 0,021 | 0,021 | 0,017 | 122 | 117 | 96 |
| 419 | 0,016631 | 0,016632 | 0,013132 | 0,023 | 0,023 | 0,021 | 132 | 131 | 122 |
| 481 | 0,017676 | 0,019566 | 0,016879 | 0,024 | 0,024 | 0,022 | 135 | 150 | 167 |
| 537 | 0,0226523 | 0,025 | 0,017148 | 0,027 | 0,025 | 0,023 | 154 | 183 | 207 |
| 601 | 0,026 | 0,030271 | 0,023797 | 0,035 | 0,034 | 0,035 | 162 | 250 | 266 |
| 659 | 0,032868 | 0,033985 | 0,024 | 0,036 | 0,045 | 0,035 | 196 | 490 | 1008 |
| 718 | 0,055 | 0,065 | 0,032216 | 0,055 | 0,055 | 0,038 | 270 | 571 | 2545 |

Таблиця 2.8

Експериментальні дані, які характеризують мікропластичну деформацію наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом III (група III)

| σ_i , МПа | Деформація | | | Середньоквадратичне відхилення деформації | | | Коефіцієнт варіації деформації, % | | |
|------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|---|-------|--------|-----------------------------------|------------|------------|
| | $\bar{\varepsilon}_i$ | $+\bar{\varepsilon}_i$ | $-\bar{\varepsilon}_i$ | S_1 | S_2 | S_3 | γ_1 | γ_2 | γ_3 |
| 201 | 0,027 | 0,026 | 0,011 | 0,013 | 0,017 | 0 | 47 | 60 | 0 |
| 249 | 0,03 | 0,026 | 0,027 | 0,017 | 0,018 | 0,017 | 69 | 65,4 | 48,6 |
| 361 | 0,031 | 0,027 | 0,031 | 0,022 | 0,018 | 0,018 | 70 | 65,5 | 53,1 |
| 400 | 0,031 | 0,029 | 0,032 | 0,022 | 0,019 | 0,021 | 75 | 69,2 | 65,63 |
| 449 | 0,031 | 0,03 | 0,032 | 0,024 | 0,024 | 0,025 | 75 | 73 | 69,63 |
| 500 | 0,032 | 0,03 | 0,032 | 0,024 | 0,025 | 0,025 | 77,4 | 73 | 75,7 |
| 549 | 0,033 | 0,031 | 0,035 | 0,024 | 0,026 | 0,027 | 78 | 78 | 77,1 |
| 604 | 0,036 | 0,032 | 0,036 | 0,025 | 0,028 | 0,028 | 79 | 86 | 80,9 |
| 645 | 0,039 | 0,04 | 0,037 | 0,031 | 0,033 | 0,029 | 80 | 88 | 89,6 |
| 659 | 0,041 | 0,045 | 0,037 | 0,037 | 0,043 | 0,0302 | 88 | 90,3 | 94,3 |
| 748 | 0,087 | 0,089 | 0,042 | 0,066 | 0,065 | 0,034 | 94 | 107 | 107,4 |

Таблиця 2.9

Експериментальні дані, які характеризують мікропластичну деформацію наварених зразків зі сталі 40 після нормалізації (група В)

| σ_i , МПа | Деформація | | | Середньоквадратичне відхилення деформації | | | Коефіцієнт варіації деформації, % | | |
|------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|---|--------|-------|-----------------------------------|------------|------------|
| | $\bar{\varepsilon}_i$ | $+\bar{\varepsilon}_i$ | $-\bar{\varepsilon}_i$ | S_1 | S_2 | S_3 | γ_1 | γ_2 | γ_3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 151 | 0,02 | 0,026 | 0,01 | 0,031 | 0,0301 | 0,013 | 65,77 | 54,8 | 47,50 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|
| 200 | 0,025 | 0,032 | 0,014 | 0,032 | 0,034 | 0,013 | 71,4 | 63,48 | 59,3 |
| 251 | 0,028 | 0,032 | 0,016 | 0,032 | 0,035 | 0,016 | 91,4 | 83,3 | 92,9 |
| 301 | 0,029 | 0,035 | 0,016 | 0,036 | 0,039 | 0,018 | 100 | 86 | 94,7 |
| 351 | 0,031 | 0,035 | 0,017 | 0,037 | 0,0403 | 0,019 | 103,2 | 94,4 | 96,08 |
| 401 | 0,031 | 0,035 | 0,019 | 0,037 | 0,0403 | 0,0201 | 127,6 | 115,14 | 125,6 |
| 452 | 0,035 | 0,042 | 0,02 | 0,043 | 0,044 | 0,029 | 144 | 125,9 | 130 |
| 502 | 0,07 | 0,084 | 0,041 | 0,05 | 0,046 | 0,035 | 153,6 | 137,5 | 145 |
| 533 | 0,111 | 0,115 | 0,051 | 0,073 | 0,073 | 0,049 | 185 | 150 | 225 |

Результати експериментальних досліджень мікропластичності наварених електрореконтантним методом зразків у вигляді графіку наведено на рис.2.3.

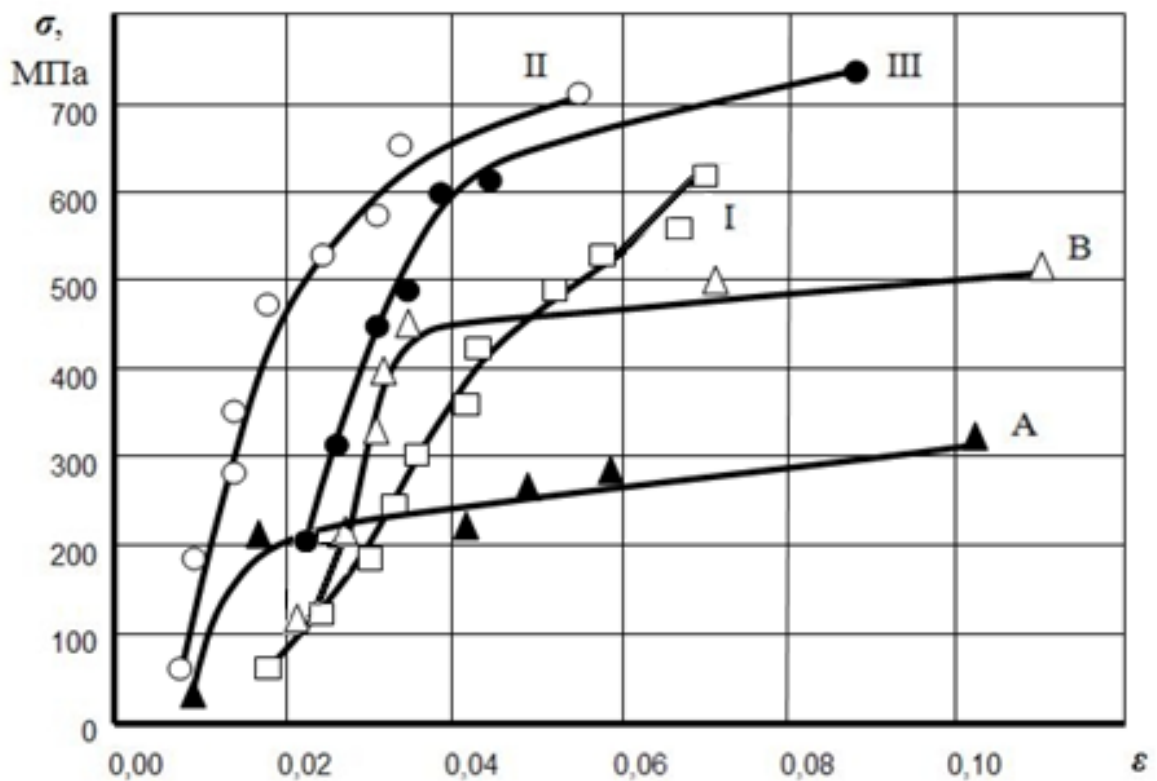


Рисунок 2.3 – Експериментальні дані змінення величини мікропластичної деформації ε у наварених зразках після термічної обробки (згідно табл.2.4) при збільшенні напруження σ

Для кожної серії експериментальних даних в результаті моделювання за допомогою програмного середовища STATISTICA StatSoft 10 визначено основні статистики для значень мікропластичної деформації та напруження (табл.2.10).

Таблиця 2.10

Результати статистичної обробки експериментальних даних

| Група | Параметр | Середнє значення вибірки | Мінімальне значення | Максимальне значення |
|-------|-----------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| А | ε_i | 0,0297 | 0,00900 | 0,1030 |
| | σ_i | 182,5583 | 30,50000 | 341,5000 |
| І | ε_i | 0,0334 | 0,0160 | 0,0510 |
| | σ_i | 279,9625 | 60,7000 | 488,0000 |
| ІІ | ε_i | 0,0191 | 0,0070 | 0,0550 |
| | σ_i | 373,3500 | 59,0000 | 659,0000 |
| ІІІ | ε_i | 0,0314 | 0,0270 | 0,0360 |
| | σ_i | 414,1250 | 201,0000 | 604,0000 |
| В | ε_i | 0,0336 | 0,0200 | 0,0700 |
| | σ_i | 326,1250 | 151,0000 | 502,0000 |

Перевірка вибірки напружень при розтягуванні наварених зразків на належність нормальному закону розподілення виконана з використанням критерію Колмогорова-Смірнова (рис. 2.4-2.8, табл. 2.11-2.12).

Розраховані значення критерію Колмогорова-Смірнова при 5%-му рівні значущості для всіх груп зразків не перевищують критичного ($d=1,358$). Розрахунок розподілу за критерієм Ліллієфорса підтверджує відповідність розподілу нульовій гіпотезі (для рівня значущості 0,05 критичне значення критерію Ліллієфорса складає 0,886). Графіки нормального розподілу досліджуваних характеристик мають незначне зміщення, згідно зміні значень коефіцієнту асиметрії, та відрізняються пологим характером кривої. Таким чином, одержані гістограми розподілу, а також значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу свідчать про відповідність експериментальних даних нормальному закону розподілення.

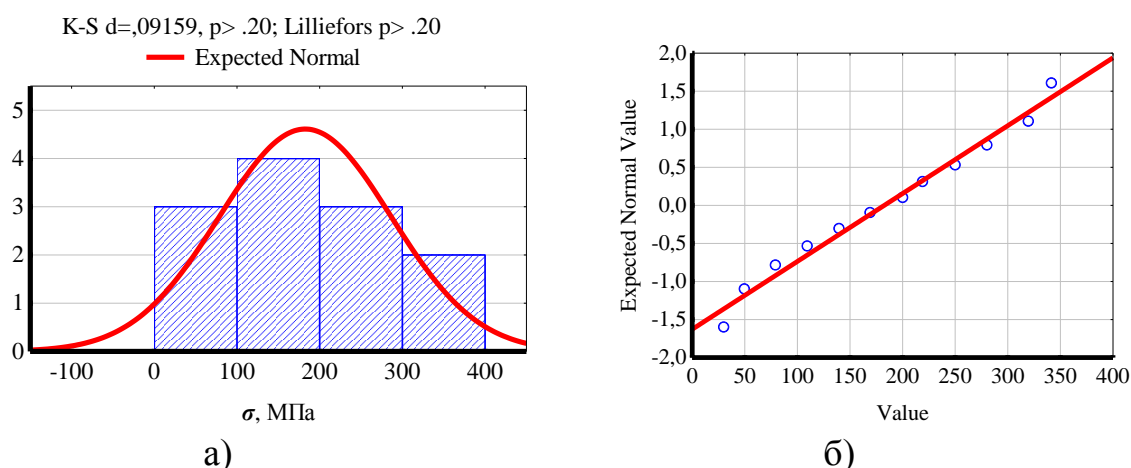


Рисунок 2.4 – Гістограма розподілу експериментальних значень напружень із накладеною кривою очікуваного нормального розподілу (а) та графік нормального розподілу (б) для наварених зразків групи А

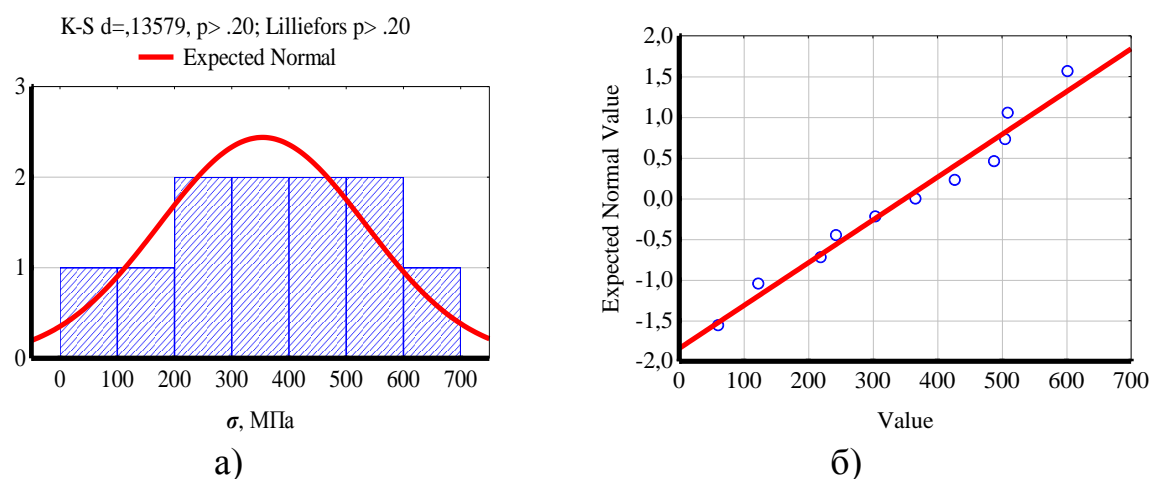


Рисунок 2.5 – Гістограма розподілу експериментальних значень напруження з накладеною кривою очікуваного нормального розподілу (а) і графік нормального розподілу (б) для наварених зразків групи І

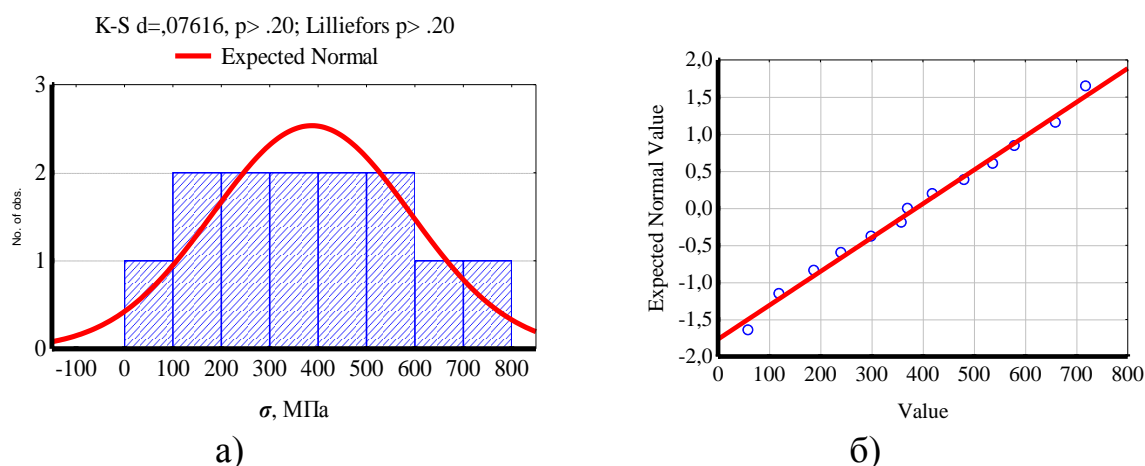
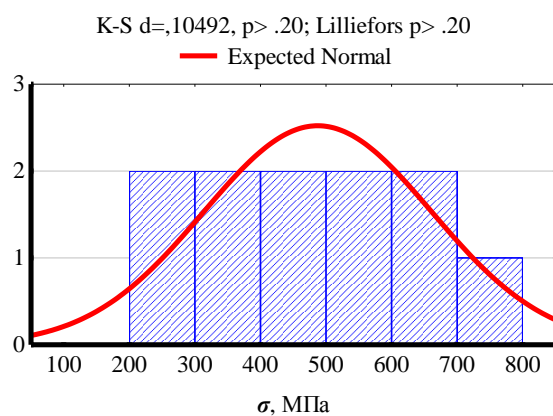
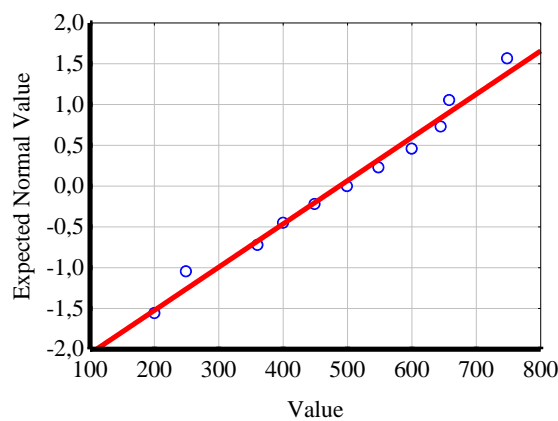


Рисунок 2.6 – Гістограма розподілу експериментальних значень напруження з накладеною кривою очікуваного нормального розподілу (а) і графік нормального розподілу (б) для наварених зразків групи ІІ

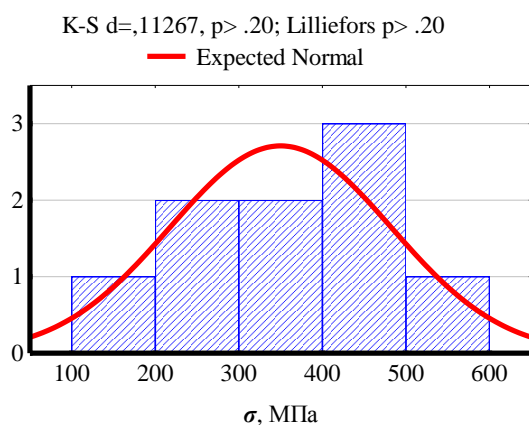


а)

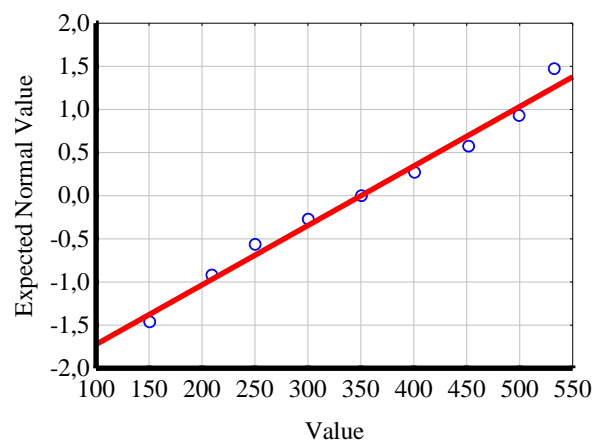


б)

Рисунок 2.7 – Гістограма розподілу експериментальних значень напруження з накладеною кривою очікуваного нормального розподілу (а) і графік нормального розподілу (б) для наварених зразків групи III



а)



б)

Рисунок 2.8 – Гістограма розподілу експериментальних значень напруження з накладеною кривою очікуваного нормального розподілу (а) і графік нормального розподілу (б) для наварених зразків групи B

Таблиця 2.11

Результати перевірки вибірки на нормальність за тестом Колмогорова-Смірнова та Ліллієфорса

| Група | Критерій Колмогорова-Смірнова, d | Рівень значимості, p | Критерій Ліллієфорса, p |
|-------|------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| A | 0,09159 | >0,20 | >0,20 |
| I | 0,13579 | >0,20 | >0,20 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----|---------|-------|-------|
| II | 0,07616 | >0,20 | >0,20 |
| III | 0,10492 | >0,20 | >0,20 |
| B | 0,11267 | >0,20 | >0,20 |

Таблиця 2.12

Значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу

| Група | Коефіцієнт асиметрії | Коефіцієнт ексцесу |
|-------|----------------------|--------------------|
| A | 0,048806 | -1,18870 |
| I | -0,239882 | -1,27903 |
| II | -0,004958 | -1,18292 |
| III | -0,267814 | -0,870051 |
| B | -0,074895 | -1,30778 |

Для встановлення статистичних залежностей зміни експериментальних даних застосовували апроксимацію показниковою функцією (табл.2.13, 2.14).

Таблиця 2.13

Рівняння, що апроксимують залежність між напруженням і сумарною мікропластичною деформацією наварених зразків після різної термічної обробки

| Метал наварювання | Вид термообробки | Група | Структура | Рівняння $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ | $\sigma_{розр}$, МПа |
|-------------------|--------------------------------|-------|-----------|--|-----------------------|
| 25 | нормалізація | A | Ф+П | $\sigma_i = 253,250 + 5504,243\varepsilon_i - \frac{5,017}{\varepsilon_i}$ | 30,56 |
| 40 | нормалізація | B | П+Ф | $\sigma_i = 953,72 - 3160,09\varepsilon_i - \frac{15,59}{\varepsilon_i}$ | 111,02 |
| 40X | відпал | I | П+Ф | $\sigma_i = 253,250 + 5504,243\varepsilon_i - \frac{5,017}{\varepsilon_i}$ | 57,35 |
| 40X | термопокращення за режимом II | II | C | $\sigma_i = 501,968 + 4323,546\varepsilon_i - \frac{2,817}{\varepsilon_i}$ | 79,804 |
| 40X | термопокращення за режимом III | III | T | $\sigma_i = 1767,33 - 1117,25\varepsilon_i - \frac{41,31}{\varepsilon_i}$ | 207,16 |

Результати розрахунку регресій

| Група | Рівняння $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ | R | R^2 | F | p |
|-------|--|------|-------|-------|----------|
| A | $\sigma_i = 253,250 + 5504,243\varepsilon_i - \frac{5,017}{\varepsilon_i}$ | 0,96 | 0,93 | 61,5 | 0,0006 |
| B | $\sigma_i = 953,72 - 3160,09\varepsilon_i - \frac{15,59}{\varepsilon_i}$ | 0,93 | 0,87 | 17,25 | 0,00066 |
| I | $\sigma_i = 253,72 + 5504,243\varepsilon_i - \frac{5,017}{\varepsilon_i}$ | 0,96 | 0,93 | 49,4 | 0,000074 |
| II | $\sigma_i = 501,968 + 4323,546\varepsilon_i - \frac{2,817}{\varepsilon_i}$ | 0,86 | 0,74 | 12,64 | 0,0024 |
| III | $\sigma_i = 1767,33 - 1117,25\varepsilon_i - \frac{41,31}{\varepsilon_i}$ | 0,95 | 0,90 | 44,59 | 0,000021 |

За приведеними рівняннями розраховані найменші напруження, які визивають перші акти мікропластичної деформації $\sigma_{кр}$. За розрахованими статистичними рівняннями побудовано графічні залежності, які демонструють характер зміни значень мікропластичної деформації при збільшенні прикладеного розтяжного напруження (рис.2.9-2.13).

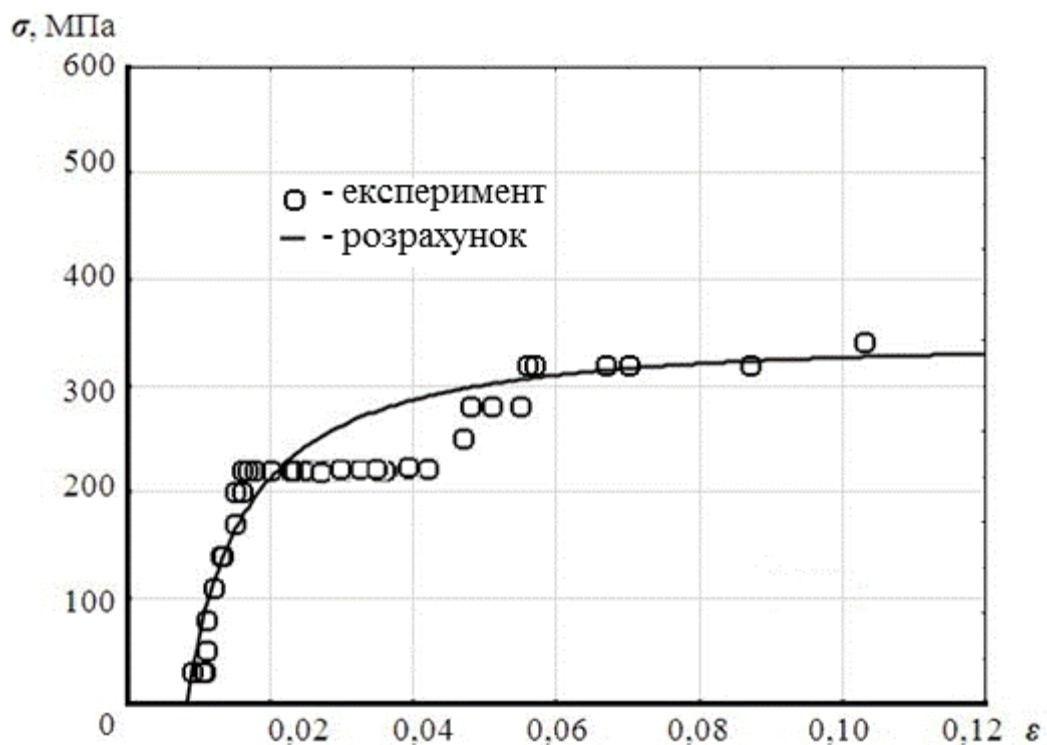


Рисунок 2.9 – Залежність між середньою величиною мікропластичної деформації та прикладеним розтяжним напруженням у наварених зразках зі сталі 25 у нормалізованому стані (група А)

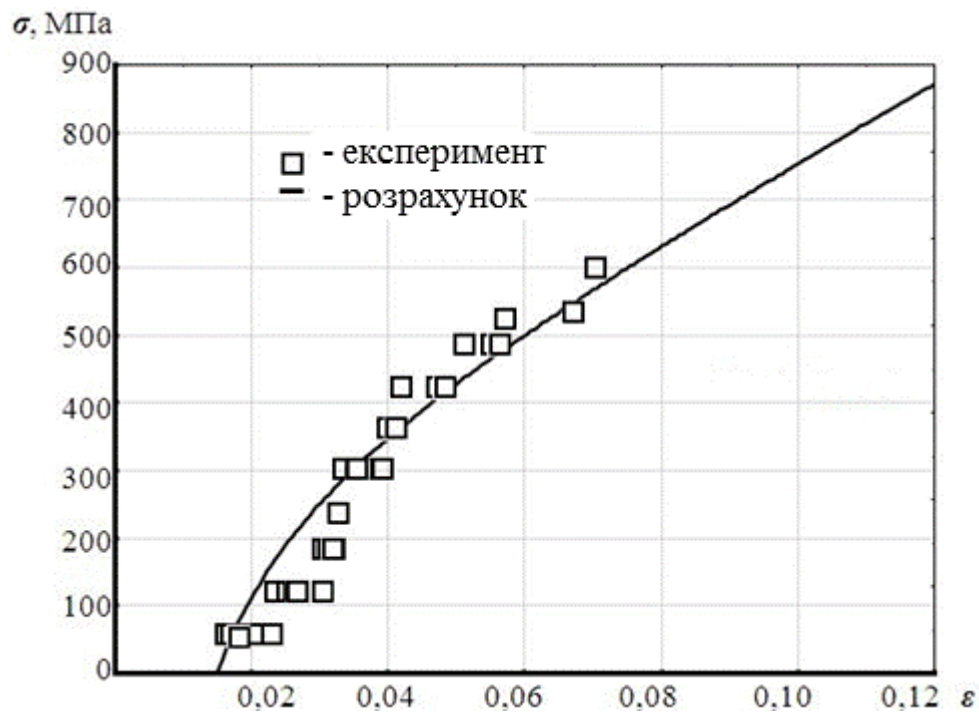


Рисунок 2.10 – Залежність між середньою величиною мікропластичної деформації та прикладеним розтяжним напруженням у наварених зразках зі сталі 40X після відпалу (група I)

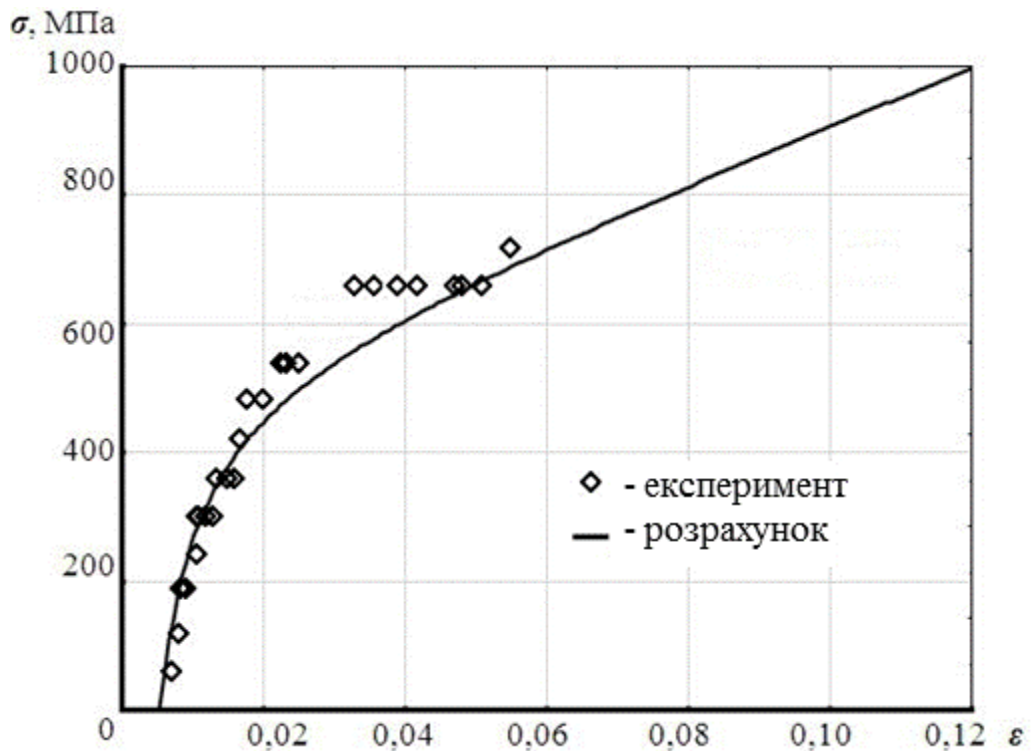


Рисунок. 2.11 – Залежність між середньою величиною мікропластичної деформації та прикладеним розтяжним напруженням у наварених зразках зі сталі 40X після термічного покращення за режимом II (група II)

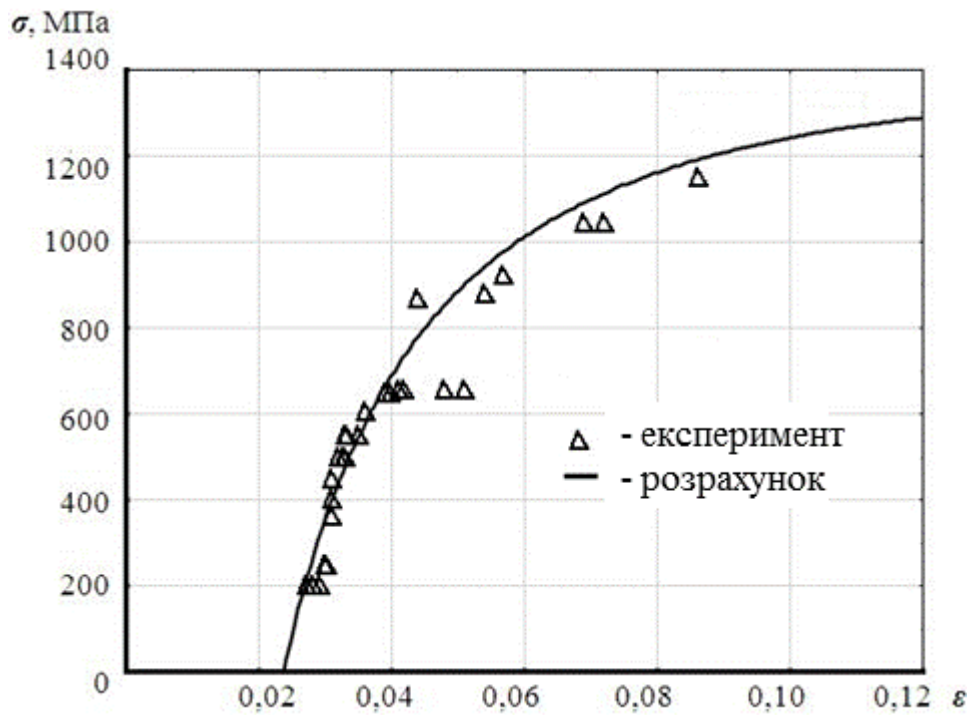


Рисунок 2.12 – Залежність між середньою величиною мікропластичної деформації та прикладеним розтяжним напруженням у наварених зразках зі сталі 40X після термічного покращення за режимом III (група III)

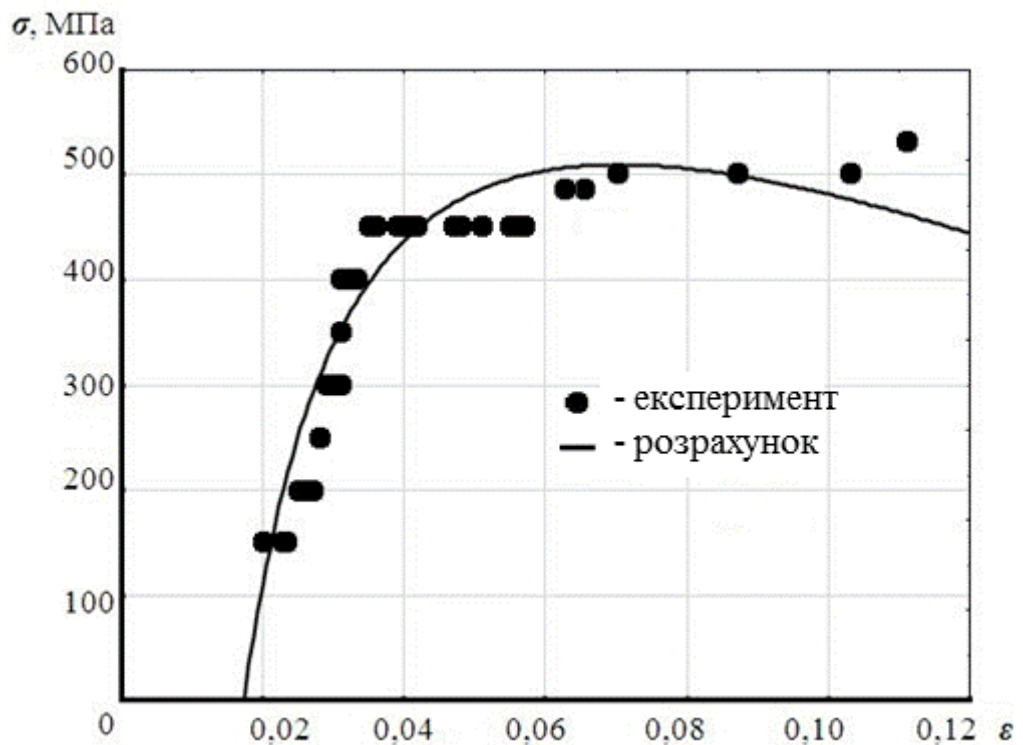
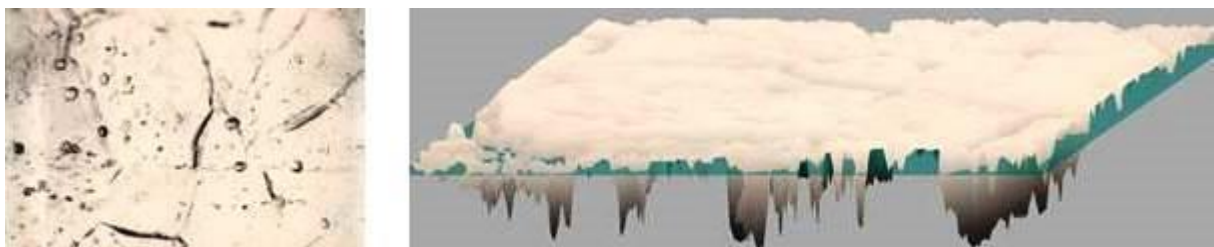


Рисунок 2.13 – Залежність між середньою величиною мікропластичної деформації та прикладеним розтяжним напруженням у наварених зразках зі сталі 40 після нормалізації (група B)

За одержаними даними (див. табл. 2.14) та зміною графічних залежностей (див. рис. 2.9-2.13) можна стверджувати, що регресійні рівняння мають достатньо високий коефіцієнт кореляції, що говорить про тісний лінійний зв'язок.

В залежності від досліджуваної групи зразків статистичні моделі пояснюють від 74 до 90% вихідних даних. Враховуючи низький рівень значущості критерія Фішера, в середньому з 80%-м рівнем довіри можна стверджувати, що одержані моделі є адекватними.

Морфологію поверхні нанесеного шару відносно номінальної площини залежно від прикладеного навантаження (див. табл. 2.5-2.9) зручно прослідити (рис. 2.14-2.23) за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке базується на методі пошарової мікроскопії та дозволяє одержувати топографічні рельєфи об'ємних об'єктів.



а)

б)

Рисунок 2.14 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профіля поверхні (б) наварених зразків зі сталі 25 у нормалізованому стані (група А) при мінімальному напруженні 30,56 МПа



а)

б)

Рисунок 2.15 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 25 у нормалізованому стані (група А) при максимальному напруженні 341,5 МПа

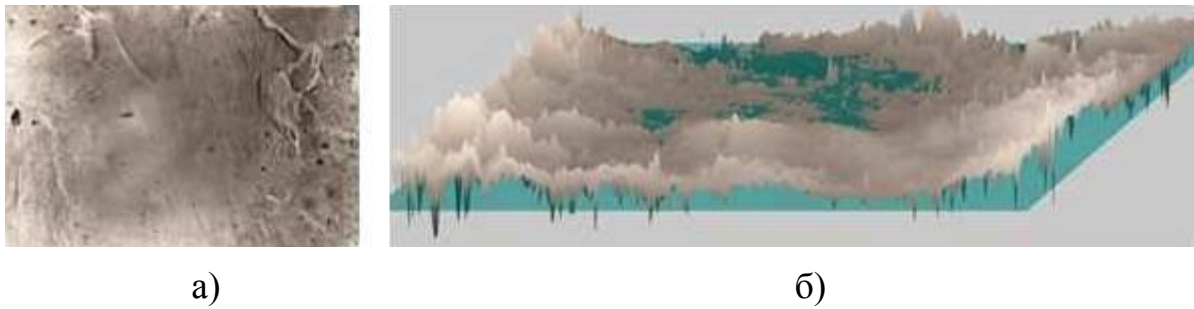


Рисунок 2.16 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40X після відпалу (група I) при мінімальному напруженні 60,7 МПа

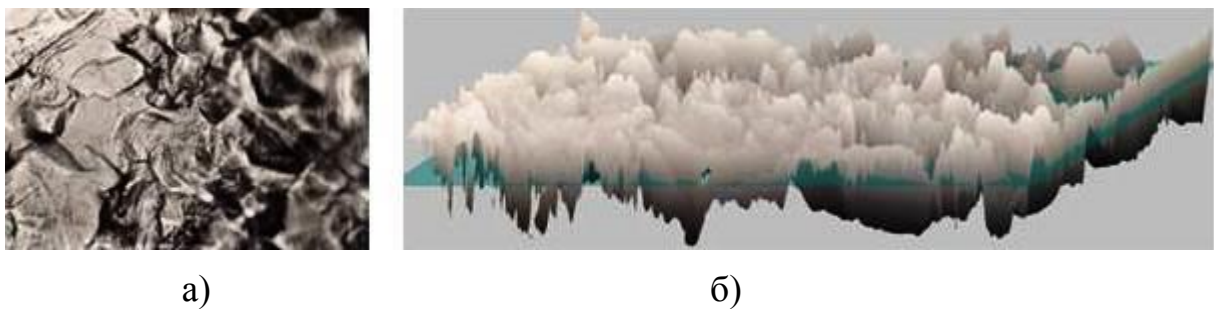
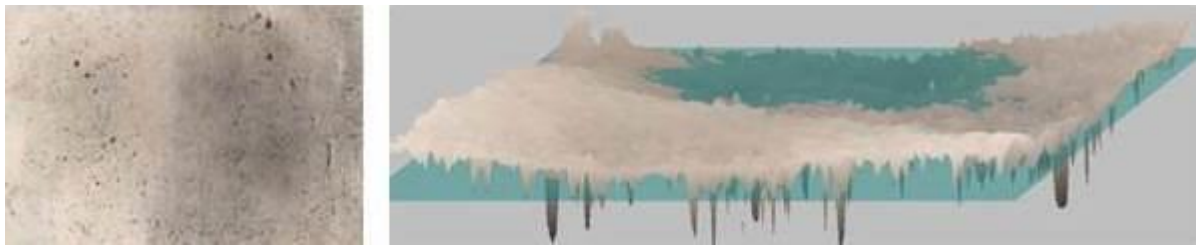


Рисунок 2.17 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40X після відпалу (група I) при максимальному напруженні 602 МПа

При дослідженні мікропластичної деформації вже при найменших напруженнях виникали залишкові мікродеформації. Характерно, що це напруження підвищується зі збільшенням об'ємного вмісту перліту і разом із пониженням температури відпуску при термічному поліпшенні. Вид ліній ковзання також відрізняється залежно від структури деформованого зразку. В наварених зразках зі сталі 25 після нормалізації виникаючі лінії ковзання паралельні. З появою великої кількості перліту змінюється й форма ліній ковзання, вони набувають вигнутого характеру. Це має місце тим більше, чим більший об'ємний вміст перліту.

Лінії ковзання в сорбітоподібних структурах (після термічного покращення) вигнуті, виникають поступово в широкому діапазоні напружень (рис. 2.18-2.19). При високих напруженнях, зростає й кількість об'ємів із високою щільністю ліній. Таким чином, форма ліній ковзання залежить від перешкод для вільного розповсюдження пластичних зсувів (приграничних об'ємів, внутризеренних структурних порушень).



а)

б)

Рисунок 2.18 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом II (група II) при мінімальному напруженні 59,804 МПа



а)

б)

Рисунок 2.19 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом II (група II) при максимальному напруженні 718 МПа

Якщо в навареному зразку міститься відносно великий об'єм зерен надлишкового фериту, то перешкод для зсувів менше, а лінії ковзання прямолінійні. В сорбітних структурах із розвинутою міжзеренною поверхнею перешкод для ковзання значно більше, що й обумовлює вигнутість ліній. Наварені зразки зі сталі 25 вимагають найменших напружень для виникнення мікропластичної деформації. В умовах випробування ці напруження складають 30,5 МПа. В наварених зразках із більшим вмістом у структурі цементиту ці напруження вищі, а лінії зсуву більш вигнуті (рис.2.20-2.21).

Найбільш високі напруження мають місце у зразках, які після наварювання піддавались термічному поліпшенню на сорбіт і троостит відпуску [252]. Саме в такому структурному стані зразки найбільш чутливі до концентрації напружень в умовах циклічних навантажень (в умовах роботи, коли виникають мікропластичні деформації). Пластична деформація пов'язана з рухом дислокацій.



Рисунок 2.20 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом III (група III) при мінімальному напруженні 201,16 МПа

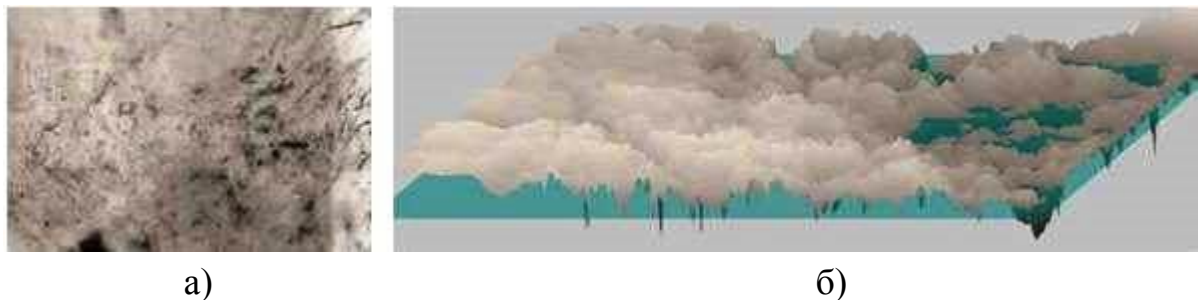


Рисунок 2.21 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом III (група III) при максимальному напруженні 748 МПа

Експериментально встановлені величини напружень, які визивають перші акти мікропластичної деформації, визначають середню необхідну величину напружень для старту дислокацій, що обумовлюють мікропластичну деформацію. В наварених зразках, малочутливих до концентрації напружень в умовах циклічного навантаження, малою виявляється необхідна середня величина напружень для страту дислокацій. Отже, чим менша величина напружень, необхідна для початку руху дислокацій, тим менш чутливий зразок до концентрації напружень.

Як і у випадку макрооцінки впливу пластичної деформації на властивості наварених зразків, ті ж закономірності виявлено й у мікронах: зі збільшенням ступеню пластичної деформації зміцнення в мікронах зростає, але по-різному у зразків, які мають різну мікроструктуру.

Найбільш високою схильністю до мікропластичної деформації володіють наварені зразки зі сталі 25, основна структурна складова яких – ферит. Це обумовлене найбільш високою схильністю до руху дислокацій під впливом прикладених напружень. У вказаних зразках найлегше виникає деформація, необхідні порівняно малі напруження і для старту й для руху дислокацій у мікрооб'ємах. Зі збільшенням кількості цементитної складової (перліту) зростає опір зразків мікропластичній деформації (рис. 2.22-2.23).



Рисунок 2.22 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40 після нормалізації (група В) при мінімальному напруженні 151,02 МПа

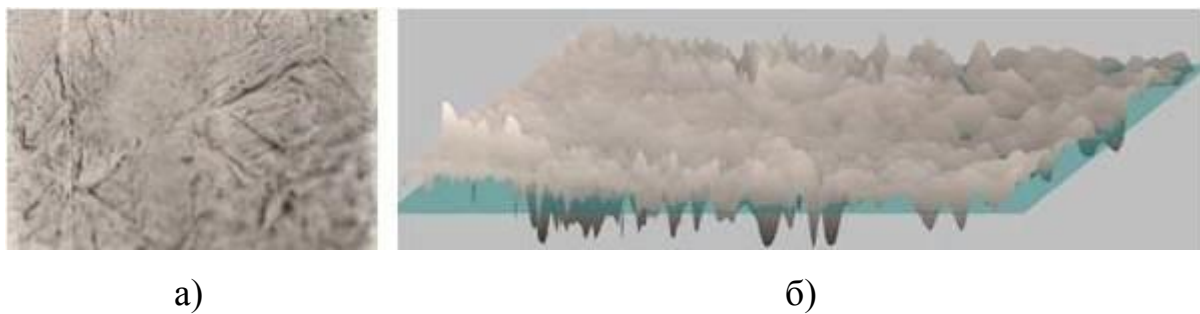


Рисунок 2.23 – Змінення структури (а) ($\times 500$) і 3D профілю поверхні (б) наварених зразків зі сталі 40 після нормалізації (група В) при максимальному напруженні 533 МПа

Найбільш високий опір мікропластичній деформації проявляють наварені зразки після термічного покращення. Наприклад, для наварених зразків зі сталі 40Х, поліпшених на сорбіт відпуску (II група), необхідні середні напруження 373МПа, щоби визвати залишкову мікропластичну деформацію, яка дорівнює 4%, а в тих же зразках із трооститом відпуску (III група) – 497 МПа. Отже, термічне

покращення, визиваючи подрібнення мікроструктури, обумовлює підвищений і навіть високий опір мікропластичній деформації, або руху дислокацій. Це може бути пов'язане з виникненням значного числа перешкод руху дислокацій.

Зразки в термічно поліпшеному стані володіють також найбільш високою чутливістю до концентрації напружень в умовах циклічного навантаження. Ця особливість поведінки наварених зразків при циклічному навантаженні пов'язана зі схильністю до мікропластичної деформації [259].

2.3. Вплив структури нанесеного шару на змінення коефіцієнту зміцнення

Коефіцієнт зміцнення є важливим фізичним параметром, який характеризує закони зміцнення та структуроутворення [260, 261]. Зв'язок між напруженням і деформацією вперше був установлений Н.Н. Давіденковим і Н.І. Спірідоною [262], які запропонували визначати коефіцієнт зміцнення (модуль пластичності) наступним чином з використанням дійсних значень напружень:

$$D = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.6)$$

При цьому саме дійсні значення напруження деформації найбільш точно характеризують механічну поведінку деформованого матеріалу в кожний момент часу [261]. Так як існує зв'язок між поведінкою дислокацій (їх рухом, накопиченням у перешкод) і модулем пластичності, то, відповідно, чим більше модуль пластичності, тим скоріше накопичуються дислокації і тим вища чутливість матеріалу до концентрації напружень. Визначали модуль пластичності (коефіцієнт зміцнення) з використанням методів моделювання в програмному середовищі STATISTICA StatSoft 10 (табл.2.15).

Рівняння, які апроксимують залежність експериментальних даних коефіцієнта зміцнення від ступеню відносної деформації

| Метал наварювання | Вид термообробки | Група | Структура | Вид рівняння |
|-------------------|--------------------------------|-------|-----------|--|
| 25 | нормалізація | А | Ф+П | $D = 4,6226 - 27,1629\varepsilon_i + \frac{0,0068}{\varepsilon_i}$ |
| 40 | нормалізація | В | П+Ф | $D = 6,7773 - 42,8378\varepsilon_i + \frac{0,0121}{\varepsilon_i}$ |
| 40X | відпал | І | П+Ф | $D = 6,643 - 45,5734\varepsilon_i + \frac{0,0068}{\varepsilon_i}$ |
| 40X | термопокрощення за режимом II | II | С | $D = 6,7291 - 48,2929\varepsilon_i + \frac{0,0023}{\varepsilon_i}$ |
| 40X | термопокрощення за режимом III | III | Т | $D = 5,2241 - 6,10107\varepsilon_i + \frac{0,0074}{\varepsilon_i}$ |

Таким чином, величини коефіцієнту зміцнення при мікропластичній деформації не однакові для різних структурних станів та ступеню деформації (прикладених напружень). Зразки групи А характеризуються найменшим коефіцієнтом зміцнення з досліджених, найбільший коефіцієнт зміцнення мають наварені зразки в стані після термічного покращення (рис. 2.24-2.28).

Аналогічна залежність має місце й для чутливості до концентрації напружень: у наварених зразків зі сталі 25 із феритною структурою вона найменша, у зразків після термічного покращення (групи II, III) – найбільша.

Проведені експерименти свідчать про вплив модулю пластичності в мікроб'ємах на чутливість до концентрації напружень: кожен із них зростає разом зі збільшенням іншого. Зі збільшенням ступеню деформації коефіцієнт зміцнення знижується у всіх досліджуваних структурних станах, що вказує на залежність процесу пластичної плинності від ступеню мікрореформації.

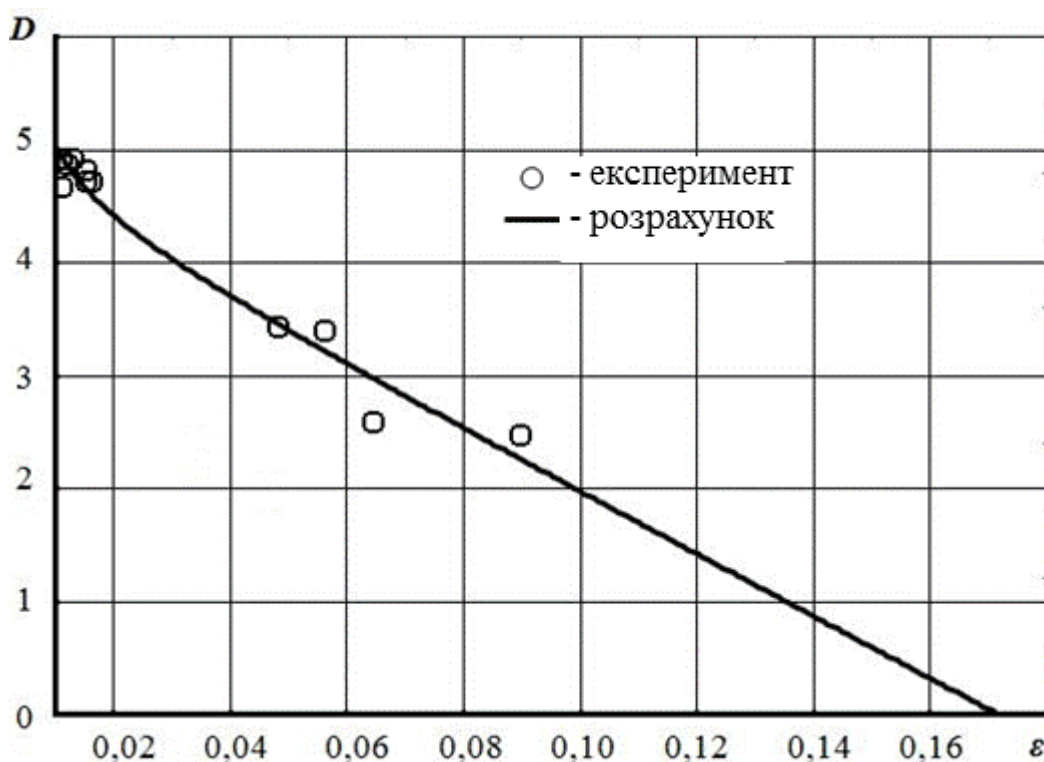


Рисунок 2.24 – Змінення коефіцієнту зміцнення D залежно від середньої сумарної мікропластичної деформації ε наварених зразків зі сталі 25 у нормалізованому стані (група А)

Оскільки зміцнення при пластичній деформації обумовлене накопиченням недосконалостей кристалічної будови, накопиченням перешкод для руху дислокацій, то темп збільшення кількості перешкод для руху дислокацій і кількість цих перешкод у значній мірі залежать від вихідної структури. Так, якщо в структурі міститься великий об'єм вільного фериту, то дислокації в ході мікропластичної деформації накопичуються значно слабше, перешкод для руху дислокацій менше. Дислокації в цьому випадку рухаються легко, малим ε і стартовим напруженням. Ці зразки найменш чутливі до концентрації напружень.

Збільшення в структурі вмісту цементиту (зміцнюючої фази) приводить до зміни схильності до накопичення дислокацій в ході мікрореформацій, а саме: накопичення дислокацій протікає швидше.

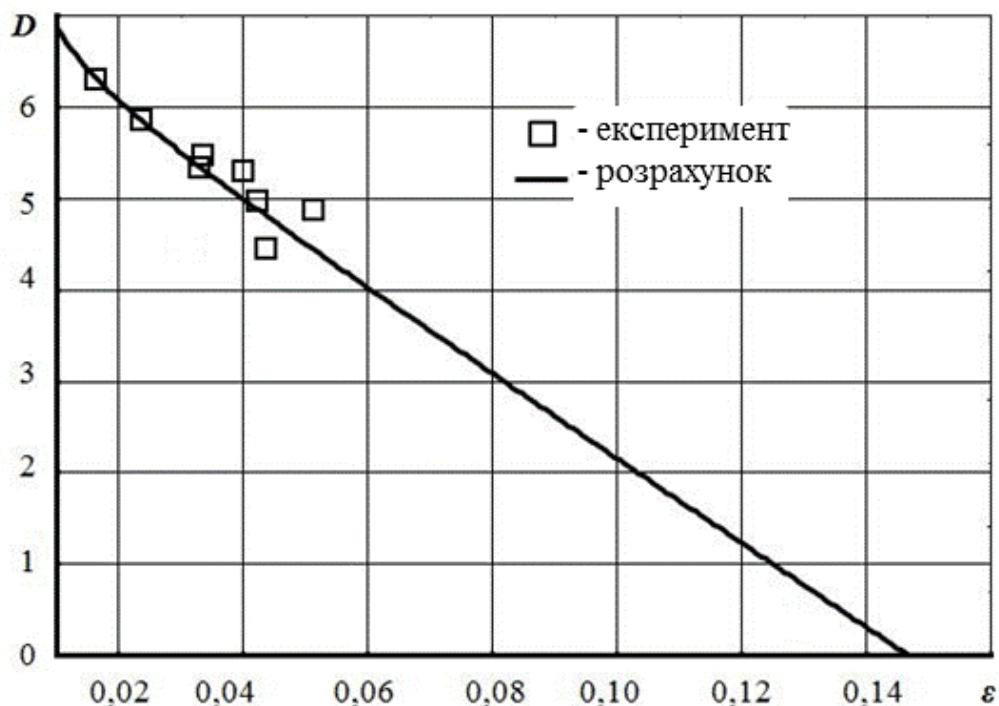


Рисунок 2.25 – Змінення коефіцієнту зміцнення D залежно від середньої сумарної мікропластичної деформації ϵ наварених зразків зі сталі 40X після відпалу (група I)

Швидке зростання щільності дислокацій пов'язане зі збільшенням числа перешкод, що викликане, з одного боку, збільшенням довжини границь через подрібнення зерна, а з іншого – збільшенням початкової щільності дислокацій, у тому числі й зафіксованих (які є перешкодами), через особливості технології термообробки. Крім того, дислокацій біля перешкод накопичується більше.

Все це обумовлює більшу чутливість сорбітних структур до концентрації напружень, що кореспондується з установленим фактором більшої чутливості до концентрації напружень сорбітних структур і пов'язану з ним низьку, при певних умовах, втомну міцність високоміцних сталей порівняно з високопластичними [263-267].

Аналіз експериментальних даних свідчить про тенденції зменшення неоднорідності мікропластичної деформації зі збільшенням рівню прикладених напружень.

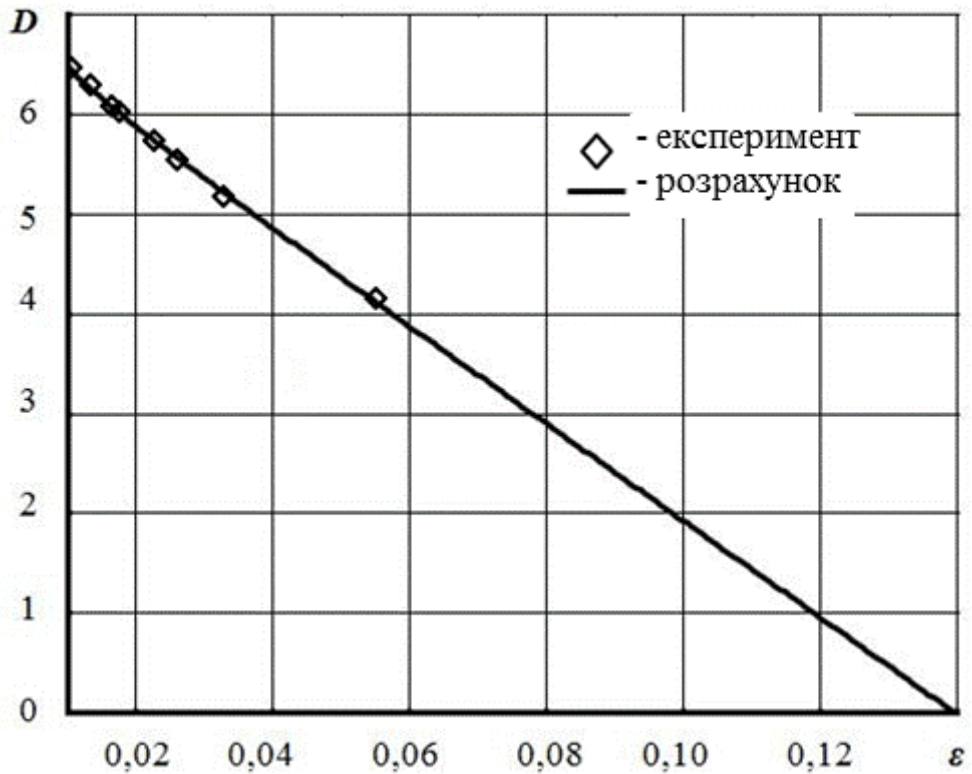


Рисунок 2.26 – Змінення коефіцієнту зміцнення D залежно від середньої сумарної мікропластичної деформації ε наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом II (група II)

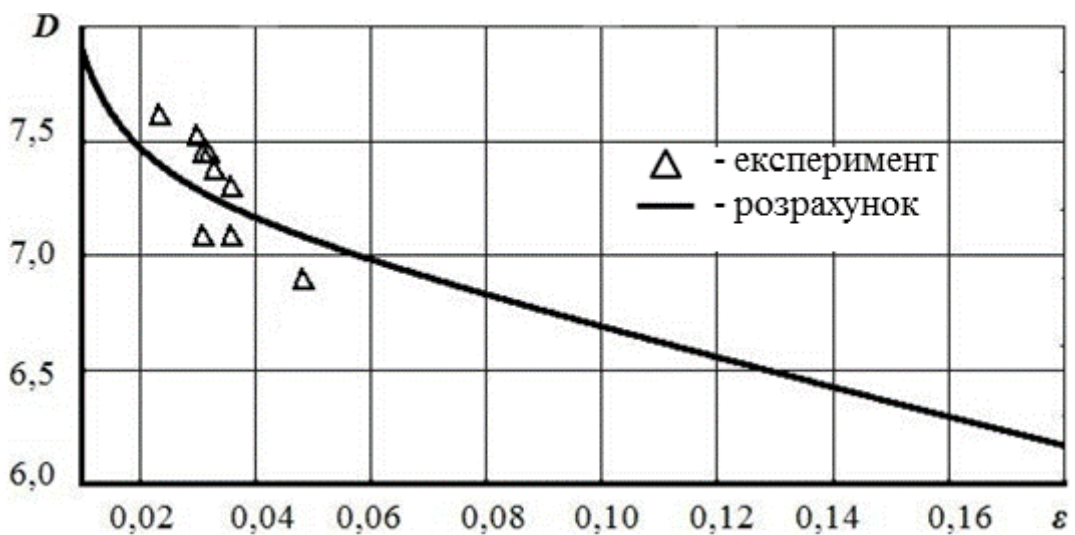


Рисунок 2.27 – Змінення коефіцієнту зміцнення D залежно від середньої сумарної мікропластичної деформації ε наварених зразків зі сталі 40X після термічного покращення за режимом III (група III)

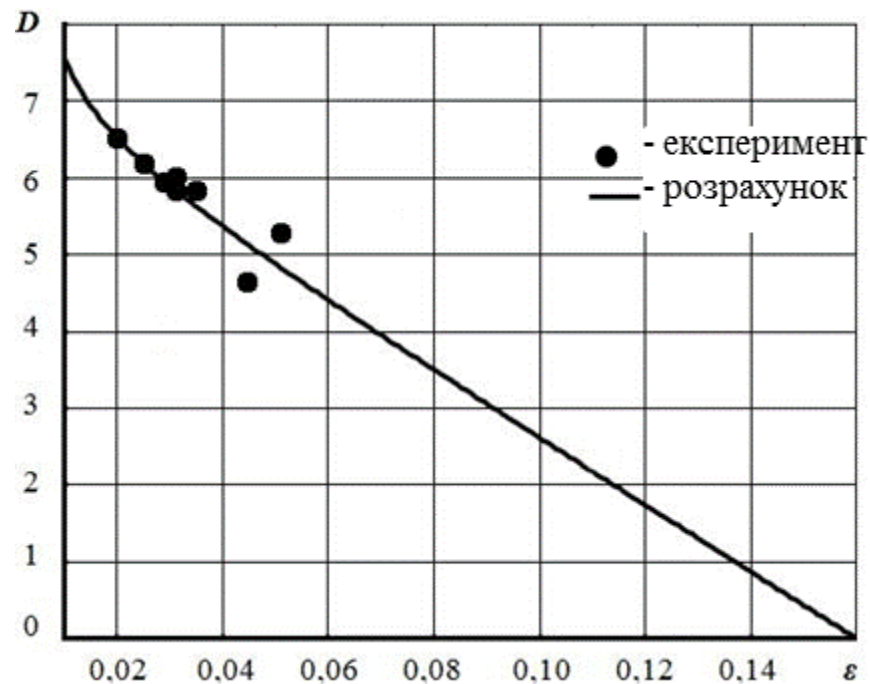


Рисунок 2.28 – Змінення коефіцієнту зміцнення D залежно від середньої сумарної мікропластичної деформації ε наварених зразків зі сталі 40 після нормалізації (група В)

Неоднорідність мікропластичної деформації зростає також зі збільшенням дисперсності структури та ростом об'ємного вмісту зміцнюючої фази (цементиту). Це можна прослідкувати за коефіцієнтом варіації.

Середній коефіцієнт варіації сумарної мікропластичної деформації наварених зразків групи А оцінюється величиною 118%, у зразків групи В і І цей коефіцієнт зростає до 122%, а у зразків групи ІІ – коефіцієнт варіації мікропластичної деформації збільшується до 135%. Аналогічна тенденція просліджується і по середньоквадратичному відхиленню.

Висновки до розділу 2

1. Досліджено структурний фактор мікропластичності зразків, наварених стрічками з вуглецевих конструкційних сталей, у зв'язку з різною чутливістю навареного металу до концентрації напружень.

2. Експериментально підтверджено вплив коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно зразків, наварених стрічками з конструкційних

вуглецевих сталей з наступною термічною обробкою. Встановлено, що найбільш високий опір мікропластичній деформації має місце у наварених зразках після їх термічної обробки з утворенням сорбіту та трооститу у зв'язку з розвинутою міжзеренною поверхнею та збільшенням кількості перешкод для ковзання, що обумовлює більш високі стартові напруження (для групи II – 59 МПа; для групи III – 201 МПа). Наварені зразки, що містять більший об'єм зерен надлишкового фериту, відрізняються більшою кількістю перешкод для зсувів, а стартові напруження у зразках складають 30,5 МПа.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «ВАЛ», ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Для підвищення ефективності використання можливостей, які закладено у конструкційних матеріалах, доцільно оцінити вплив технологічних прийомів та особливостей термічної обробки з комплексним впливом на структуру та експлуатаційні властивості одержаних покриттів.

3.1. Теплотехнічний розрахунок режиму індукційного нагріву з регламентованими параметрами

3.1.1. Обґрунтування режиму нагріву

В якості термічної обробки зварних з'єднань для середньовуглецевистих сталей рекомендують [268] використовувати або високий відпуск при 620...640°C, або нормалізацію з високим відпуском. В результаті такої термообробки утворюється дрібнодисперсна сорбітна структура, знижується твердість і підвищуються механічні властивості. Однак, як було встановлено в ході проведених експериментів (див. розд.2), для деталей, що працюють в умовах циклічного навантажування, така структура є найбільш чутливою до концентрації напружень. Також було встановлено, що наварені зразки, які містять в структурі надлишковий ферит, мають менший опір мікропластичній деформації та значно меншу схильність до деформаційного зміцнення, ніж зразки зі структурою сорбіту відпуску.

При виборі режиму та способу термічної обробки необхідно враховувати, що відновленню наварюванням піддається не весь виріб, а тільки зношені ділянки, а товщина стрічки та глибина зони термічного впливу не перевищує декількох міліметрів [269, 270]. Тому найбільш оптимальним у даному випадку стане використання

локального поверхневого методу нагріву струмами високої частоти [271, 272], який відрізняється економічністю, оскільки відсутня необхідність нагрівати весь виріб. До переваг індукційної обробки відноситься висока швидкість нагріву, що скорочує час нагріву у порівнянні з полум'яним способом у 2,5 рази та більше, а також значне зменшення окалиноутворення, яке складає в середньому 0,5-0,8% від маси металу, що нагрівається, та зниження знеуглецювання сталей, яке практично відсутнє при нагріві до 1100-1200 °C [273].

Проведені попередні експерименти [274-276], а також дані [277] свідчать про те, що істотне покращення структури навареного шару та зниження напружень після механічної обробки (шліфування та поліровки) досягається при нормалізації індукційним нагрівом із наступними параметрами: швидкість зростання поверхневої температури не більше 50 °C/c із кінцевим значенням $T_0 = 880$ °C, при цьому прогрів у глибину $x_{к1} = (3...5)$ мм не повинен відрізнятися більше, ніж на 50 °C, тобто $T_{к1} = 830$ °C [278]. Час досягнення даного значення поверхневої температури складає не менше $t_k = 18$ с.

На практиці застосовують три основних режими індукційного нагріву деталей:

- з постійною питомою потужністю, зокрема наскрізний та гартівний режими;
- з постійною поверхневою температурою;
- прискорений в нагрівачах методичної дії.

При гартівному та двох останніх режимах нагріву з постійною поверхневою температурою [279] або прискореному в нагрівачах методичної дії [280] швидкість нагріву поверхні деталі досягає 150...200 °C/c, що є неприйнятним за умовами поставленої задачі. Вочевидь, найбільш підходить режим з постійною питомою потужністю. При цьому значення останньої має бути зменшено у порівнянні з гартівним нагрівом, що призведе до збільшення часу досягнення заданої поверхневої температури. Глибина шару, що прогривається, визначається питомою потужністю p_0 , частотою індуктора f та часом нагріву t_k . Режим є оптимальним при рівності часу нагріву до заданих значень температури на поверхні та вглиб деталі. Розрахунок базується на моделі поетапного наскрізного нагріву [279], в якій увесь цикл розбито на наступні етапи:

1. Холодний режим – початок нагріву.

2. Перший перехідний – розпочинається коли поверхнева температура досягає значення $T_{01} \approx 650 \dots 700^\circ\text{C}$.

3. Початок другого перехідного етапу відповідає глибині прогрітого шару $x_{к2} = 0,5\Delta_k$ та температурі на його внутрішній межі $T_{к2}$, яка дорівнює 750°C , тобто вище точки магнітних перетворень. В межах шару магнітна проникність $\mu=1$ та питомий опір $\rho=10^{-6}$ Ом·м, що є справедливим для більшості конструкційних сталей.

Глибина активного (відносно виділення тепла) шару $\zeta=0,55\Delta_k$ при виконанні додаткової умови [279]:

$$\zeta \leq 0,2D, \quad (3.1)$$

де $D=2R$ – діаметр деталі, в подальшому $D=5 \cdot 10^{-2}$ м;

Δ_k – гаряча глибина проникнення струму, яка дорівнює:

$$\Delta_k \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} = \frac{0,503}{\sqrt{f}}, \quad (3.2)$$

де f – частота, Гц.

4. На початку гарячого режиму глибина x_k відповідає $T_k=750^\circ\text{C}$ та

$$x_k = \Delta_k \geq \zeta. \quad (3.3)$$

Режим продовжується до закінчення наскрізного нагріву, при цьому глибина прогрітого шару $x_k > \Delta_k$. Значення μ , ρ та умова (3.1) ті ж, що і на попередньому етапі. Оцінка глибини прогрітого шару x_k у припущенні лінійної залежності від x змінення температури в межах від 880 до 750°C та при урахуванні величин $x_{к1}$ і $T_{к1}$ дасть значення:

$$x_k = x_{к1} \frac{(T_0 - T_k)}{(T_0 - T_{к1})} = (8 \dots 13) \cdot 10^{-3}, \quad (3.4)$$

що істотно більше значень x_k , які відповідають поверхневому гартуванню деталей.

Отже, шуканий режим нагріву займе перехідне положення між гартівним та наскрізним прогрівом, а за значенням x_k відповідає початку гарячого режиму [281]. При цьому розподіл температури в даному шарі може бути отримано з вирішення рівняння теплопровідності при урахуванні умов (3.1) та (3.3). Відносна глибина поверхневого шару x_k/Δ_k задається параметром k_1 у співвідношенні $x_k/\Delta_k = k_1 x_k$. З виразу (3.3) витікає, що $k_1 x_k = 1$.

Глибина активного шару ζ пов'язана з Δ_k співвідношенням:

$$\zeta = M \Delta_k, \quad (3.5)$$

де значення параметру M визначається за табличною залежністю M від $k_1 x_k$ та параметру $m = \frac{(1 - \sqrt{\mu_2})}{(1 + \sqrt{\mu_2})}$ [279].

Оскільки глибина нагріву порівняно велика, а питома потужність мала, в якості середнього значення приймається $m = -0,8$. Тоді відносна магнітна проникність ферромагнітного осердя циліндру $\mu_2 = 81$ та $M = 0,944$ і

$$\zeta = M \Delta_k = 0,944 \Delta_k. \quad (6)$$

При такому усередненні впливає, що електричні параметри не залежать від потужності, а змінення значень m у межах від $-0,75$ до $-0,95$ не приводить до істотних помилок.

3.1.2. Основні розрахункові співвідношення

Значення температури T на відстані x від поверхні може бути отримане з рішення рівняння теплопровідності з правою частиною, не рівною нулю [282]:

$$T(x) = 2 \frac{p_0 R}{\lambda} [Fo + S(\alpha, \beta, Fo)], \quad (3.7)$$

де $\alpha = 1 - \xi/R$ – відносна глибина активного шару;

$\beta = 1 - x/R$ – відносна координата;

$Fo = at/R^2$ – критерій Фур'є.

Експериментально перевірено та рекомендовано значення коефіцієнту теплопровідності $\lambda = 41,87$ Вт/(м·град) в діапазоні температур від 0 до 800°C і температуропровідності $a = 6,25 \cdot 10^{-6}$ м²/с, які відповідають приблизно 800°C. Вираз для $S(\alpha, \beta, \tau)$ має наступний вигляд:

$$S(\alpha, \beta, Fo) = -\frac{2\alpha}{1-\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [I_0(v_n)]^2} I_0(v_n \beta) (1 - e^{-v_n^2 Fo}), \quad (3.8)$$

де I_0 та I_1 – символи функцій Бесселя нульового та першого порядку першого роду;

v_n – корені рівняння $I_1(v_n) = 0$, значення яких містяться у [283].

Розбиваючи останній вираз на дві суми та виражаючи першу з них у кінцевому вигляді, отримаємо для області всередині активного шару ξ ($\beta > \alpha$):

$$S(\alpha, \beta, Fo) = \frac{2\alpha}{1-\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [I_0(v_n)]^2} I_0(v_n \beta) e^{-v_n^2 Fo} - \frac{2\alpha^2}{8(1-\alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta) \quad (3.9)$$

Відповідно, для області по-за активним шаром ξ ($\beta < \alpha$):

$$S(\alpha, \beta, Fo) = \frac{2\alpha}{1-\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [I_0(v_n)]^2} I_0(v_n \beta) e^{-v_n^2 Fo} + \frac{\beta^2}{4} + \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha^2)} \ln \alpha. \quad (3.10)$$

На межі активного шару, тобто при $\beta=\alpha$, обидва вирази дають однаковий результат. При $Fo < 0,2$ значення допоміжної функції $S(\alpha, \beta, Fo)$ наведені в табл.3.1-3.2 [279]. Для $Fo > 0,2$ вирази для $S(\alpha, \beta, Fo)$ не залежать від Fo , приймають наступний вигляд:

$$S(\alpha, \beta, Fo) \approx S(\alpha, \beta) = -\frac{\alpha^2}{8(1-\alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta) \quad \text{при } \beta > \alpha; \quad (3.11)$$

$$S(\alpha, \beta, Fo) \approx S(\alpha, \beta) = \frac{\beta^2}{4} + \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^2 \ln \alpha}{2(1-\alpha^2)} \quad \text{при } \beta < \alpha; \quad (3.12)$$

Таблиця 3.1

Значення допоміжної функції $S(\alpha, \beta, Fo)$ для циліндру при $\beta=1,0 \dots 0,6$ [279]

| Fo | α | β | | | | |
|-------|----------|---------|--------|--------|---------|---------|
| | | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| 0,20 | 1,0 | 0,1250 | 0,0775 | 0,0350 | -0,0025 | -0,0350 |
| | 0,9 | 0,1013 | 0,0788 | 0,0363 | -0,0012 | -0,0337 |
| | 0,8 | 0,0800 | 0,0708 | 0,0417 | 0,0042 | -0,0283 |
| | 0,7 | 0,0613 | 0,0563 | 0,0404 | 0,0125 | -0,0200 |
| | 0,6 | 0,0450 | 0,0421 | 0,0329 | 0,0164 | -0,0087 |
| 0,15 | 1,0 | 0,1175 | 0,0705 | 0,0297 | -0,0050 | -0,0339 |
| | 0,9 | 0,0939 | 0,0720 | 0,0312 | -0,0037 | -0,0336 |
| | 0,8 | 0,0732 | 0,0645 | 0,0369 | 0,0019 | -0,0273 |
| | 0,7 | 0,0553 | 0,0508 | 0,0362 | 0,0105 | -0,0192 |
| | 0,6 | 0,0400 | 0,0375 | 0,0294 | 0,0147 | -0,0080 |
| 0,10 | 1,0 | 0,1093 | 0,0630 | 0,0241 | -0,0077 | -0,0328 |
| | 0,9 | 0,0860 | 0,0646 | 0,0310 | -0,0063 | -0,0316 |
| | 0,8 | 0,0658 | 0,0576 | 0,0318 | -0,0006 | -0,0263 |
| | 0,7 | 0,0488 | 0,0448 | 0,0314 | 0,0083 | -0,0183 |
| | 0,6 | 0,0347 | 0,0329 | 0,0260 | 0,0131 | -0,0073 |
| 0,05 | 1,0 | 0,0906 | 0,0458 | 0,0120 | -0,0122 | -0,0283 |
| | 0,9 | 0,0677 | 0,0480 | 0,0137 | -0,0110 | -0,0272 |
| | 0,8 | 0,0491 | 0,0426 | 0,0209 | -0,0049 | -0,0227 |
| | 0,7 | 0,0345 | 0,0317 | 0,0221 | 0,0043 | -0,0155 |
| | 0,6 | 0,0233 | 0,0220 | 0,0179 | 0,0094 | -0,0054 |
| 0,025 | 1,0 | 0,0712 | 0,0289 | 0,0018 | -0,0133 | -0,0205 |
| | 0,9 | 0,0490 | 0,0317 | 0,0037 | -0,0120 | -0,0201 |
| | 0,8 | 0,0362 | 0,0278 | 0,0115 | -0,0068 | -0,0169 |
| | 0,7 | 0,0211 | 0,0196 | 0,0138 | 0,0016 | -0,0117 |
| | 0,6 | 0,0132 | 0,0129 | 0,0110 | 0,0063 | 0,0036 |

З виразу (3.7) випливає, що значення температури T_0 на поверхні деталі ($x = 0$, $\beta = 1$) та T_k на її глибині ($x = x_k$, $\beta = \beta_k$) складатимуть:

$$T_0 = 2 \frac{p_0 R}{\lambda} [\tau + S(\alpha, 1, Fo)]; \quad (3.13)$$

$$T_k = 2 \frac{p_0 R}{\lambda} [Fo + S(\alpha, \beta_k, Fo)]; \quad (3.14)$$

Таблиця 3.2

Значення допоміжної функції $S(\alpha, \beta, Fo)$ для циліндру при $\beta=0,5...0,0$ [279]

| Fo | α | β | | | | | |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| 0,20 | 1,0 | -0,0625 | -0,0850 | -0,1025 | -0,1150 | -0,1225 | -0,1250 |
| | 0,9 | -0,0612 | -0,0837 | -0,1012 | -0,1137 | -0,1212 | -0,1237 |
| | 0,8 | -0,0558 | -0,0783 | -0,0958 | -0,1083 | -0,1158 | -0,1183 |
| | 0,7 | -0,0475 | -0,0700 | -0,0875 | -0,1000 | -0,1075 | -0,1100 |
| | 0,6 | -0,0362 | -0,0587 | -0,0762 | -0,0887 | -0,0962 | -0,0987 |
| 0,15 | 1,0 | -0,0574 | -0,0758 | -0,0895 | -0,0990 | -0,1045 | -0,1063 |
| | 0,9 | -0,0562 | -0,0747 | -0,0885 | -0,0980 | -0,1036 | -0,1054 |
| | 0,8 | -0,0512 | -0,0699 | -0,0840 | -0,0937 | -0,0995 | -0,1013 |
| | 0,7 | -0,0434 | -0,0626 | -0,0771 | -0,0872 | -0,0932 | -0,0951 |
| | 0,6 | -0,0329 | -0,0526 | -0,0667 | -0,0782 | -0,0845 | -0,0864 |
| 0,10 | 1,0 | -0,0519 | -0,0658 | -0,0754 | -0,0816 | -0,0850 | -0,0861 |
| | 0,9 | -0,0508 | -0,0649 | -0,0748 | -0,0811 | -0,0849 | -0,0856 |
| | 0,8 | -0,0462 | -0,0609 | -0,0712 | -0,0779 | -0,0817 | -0,0829 |
| | 0,7 | -0,0391 | -0,0547 | -0,0659 | -0,0734 | -0,0776 | -0,0790 |
| | 0,6 | -0,0295 | -0,0461 | -0,0584 | -0,0667 | -0,0715 | -0,0731 |
| 0,05 | 1,0 | -0,0382 | -0,0439 | -0,0470 | -0,0485 | -0,0495 | -0,0497 |
| | 0,9 | -0,0373 | -0,0435 | -0,0469 | -0,0485 | -0,0494 | -0,0497 |
| | 0,8 | -0,0342 | -0,0412 | -0,0453 | -0,0474 | -0,0485 | -0,0488 |
| | 0,7 | -0,0289 | -0,0376 | -0,0428 | -0,0456 | -0,0472 | -0,0476 |
| | 0,6 | -0,0214 | -0,0322 | -0,0391 | -0,0433 | -0,0454 | -0,0460 |
| 0,025 | 1,0 | -0,0234 | -0,0247 | -0,0249 | -0,0250 | -0,0250 | -0,0250 |
| | 0,9 | -0,0233 | -0,0247 | -0,0249 | -0,0250 | -0,0250 | -0,0250 |
| | 0,8 | -0,0217 | -0,0236 | -0,0244 | -0,0246 | -0,0247 | -0,0248 |
| | 0,7 | -0,0191 | -0,0224 | -0,0238 | -0,0244 | -0,0246 | -0,0247 |
| | 0,6 | -0,0141 | -0,0119 | -0,0227 | -0,0240 | -0,0245 | -0,0247 |

При заданій T_0 з (3.13) визначається необхідна питома потужність p_0 :

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{2R [Fo + S(\alpha, 1, Fo)]}, \quad (3.15)$$

При діленні T_0 на T_k із виразів (3.13) та (3.14) визначається час нагріву t_k :

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{Fo + S(\alpha, 1, Fo)}{Fo + S(\alpha, \beta_k, Fo)} = f(t_k). \quad (3.16)$$

Для $Fo > 0,2$ підставлення τ з виразу (3.16) у критерій Фур'є дасть час прогріву t_k :

$$t_k = \frac{R^2}{a} Fo = \frac{R^2}{a} \cdot \frac{S(\alpha, 1) - \frac{T_0}{T_k} S(\alpha, \beta_k)}{\frac{T_0}{T_k} - 1}. \quad (3.17)$$

Приведені співвідношення дозволяють для обраного режиму за заданим значенням $x_k = \Delta_k$, $T_0/T_k = 880/750 = 1,173$ та R розрахувати питому потужність p_0 , час нагріву t_k , частоту f , швидкість зростання поверхневої температури та її розподіл по перетину деталі.

3.1.3. Розрахунок параметрів нагріву

В заданому діапазоні діаметрів наведено докладний розрахунок для $D=50$ мм, при якому значення критерію Фур'є $Fo > 0,2$ та $D=120$ мм при $Fo < 0,2$ [284].

1. Для $D=50$ мм $= 5 \cdot 10^{-2}$ м із урахуванням виразів (3.1) і (3.4) визначається значення допустимих x_k . При $\zeta \leq 0,2D = 10^{-2}$ м $\zeta = 0,944 \Delta_k$ отримаємо $\Delta_k = x_k \leq 11 \cdot 10^{-3}$ м. Отже, діапазон для x_k обмежується та складатиме $x_k = \Delta_k = (8 \dots 11) \cdot 10^{-3}$ м. Для визначення оптимальних параметрів нагріву розрахунок необхідно проводити для кожного значення x_k .

При $x_k = \Delta_k = 8 \cdot 10^{-3}$ м значення $\beta_k = 1 - x_k/R = 1 - 0,32 = 0,68$. Згідно з (3.4) $\xi = M\Delta_k = 0,944 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 7,55 \cdot 10^{-3}$ м та $\alpha = 1 - \xi/R = 1 - 0,302 = 0,698$.

Задаємося $Fo = 0,2$. З табл.1-2 методом інтерполювання визначаються $S(\alpha; \beta; Fo) = S(0,698; 1; 0,2) = 0,061$ – для поверхні, та $S(\alpha; \beta_k; Fo) = S(0,698; 0,68; 0,2) = 0,006$ – для глибини x_k .

З виразу (3.16) отримаємо $T_0/T_k = (0,2 + 0,061)/(0,2 + 0,006) = 1,27$. Це більше заданого значення $T_0/T_k = 1,173$. Задаємо $Fo = 0,3$ і використовуємо вираз (6), так як $\beta > \alpha$:

$$\begin{aligned} S(\alpha, \beta, Fo) \approx S(\alpha, \beta) = S(0,698; 1) &= -\frac{\alpha^2}{8(1-\alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta) = \\ &= -\frac{0,698^2}{8(1-0,698^2)} (2 \cdot 1^2 + 0,698^2 - 3 - 4 \ln 1) = 0,061. \end{aligned} \quad (3.18)$$

$S(\alpha; \beta_k; Fo) \approx S(\alpha; \beta_k) = S(0,698; 0,68)$ – в цьому випадку $\beta < \alpha$, і необхідно використовувати вираз (3.12):

$$S(0,698; 0,68) = \frac{\beta^2}{4} + \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^2 \ln \alpha}{2(1-\alpha^2)} = \frac{0,68^2}{4} + \frac{0,698^2}{8} + \frac{0,698^2 \ln 0,698}{2(1-0,698^2)} = 0,0056. \quad (3.19)$$

Значення T_0/T_k визначається співвідношенням (3.16) або:

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{Fo + S(\alpha, 1)}{Fo + S(\alpha, \beta_k)} = \frac{0,3 + 0,061}{0,3 + 0,0056} = 1,18, \quad (3.20)$$

що є близьким до заданого значення $T_0/T_k = 1,173$.

Підставляючи це значення в останній вираз, маємо:

$$\frac{T_0}{T_k} = 1,173 = \frac{Fo + S(\alpha, 1)}{Fo + S(\alpha, \beta_k)} = \frac{Fo + 0,061}{Fo + 0,0056}. \quad (3.21)$$

Вирішуючи це рівняння відносно Fo , маємо $Fo=0,3143$. Необхідне значення питомої потужності p_0 та час нагріву t_k поверхні деталі до температури T_0 визначаються за (3.15) і (3.17):

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{2R[\tau + S(\alpha, 1, Fo)]} = \frac{41,87 \cdot 880}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} (0,3143 + 0,061)} = 1,964 \cdot 10^6; \quad (3.22)$$

$$t_k = \frac{R^2}{a} Fo = \frac{R^2}{a} \cdot \frac{6,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3143}{6,25 \cdot 10^{-6}} = 31,4. \quad (3.23)$$

Згідно з виразом (3.2) визначається частота індуктора $f=0,503^2/\Delta_k^2=0,503^2/(8 \cdot 10^{-3})^2=3950$ Гц.

Графічна залежність змінення температури в межах шару x_k задається значенням T_1 на глибині $x_1=x_k/2=4 \cdot 10^{-3}$ м. В цьому випадку $\beta_1=1-x_1/R=0,78$; α і Fo – мають ті ж значення. Оскільки $\beta_1 > \alpha$ з урахуванням (3.11), отримаємо:

$$\begin{aligned} S(\alpha, \beta_1) &= S(0,698; 0,78) = -\frac{\alpha^2}{8(1-\alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta) = \\ &= -\frac{0,698^2}{8(1-0,698^2)} (2 \cdot 0,78^2 + 0,698^2 - 3 - 4 \ln 0,78) = 0,048. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Підставляючи в (3.16) замість T_k та $S(\alpha; \beta_k)$ відповідні значення T_1 і $S(\alpha; \beta_1)$, маємо:

$$T_1 = T_0 [Fo + S(\alpha; \beta_k)] / [Fo + S(\alpha, 1)] = 880(0,3143 + 0,048) / (0,3143 + 0,061) \approx 849,7. \quad (3.25)$$

Аналогічно визначаються параметри для $x_k=(9; 10 \text{ і } 11) \cdot 10^{-3}$ м.

Для глибини прогріву $x_k=\Delta_k=9 \cdot 10^{-3}$ м:

$$\begin{aligned} \zeta &= 8,496 \cdot 10^{-3}; \quad \alpha = 1 - \zeta/R = 0,6602; \quad \beta = 1 - x_k/R = 0,64; \\ S(0,6602; 0,64) &= (\alpha > \beta) = -0,00351; \quad S(0,6602; 1) = (\alpha < \beta) = 0,05448; \\ Fo &= 0,3387; \quad p_0 = 1,874 \cdot 10^6; \quad t_k = 33,9; \quad x_1 = 4,5 \cdot 10^{-3}; \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\beta_1=1-x_1/R=0,82; S(\alpha; \beta_1)=S(0,6602; 0,82)=0,0411;$$

$$T_1=T_0[Fo+S(\alpha; \beta_1)]/[Fo+S(\alpha; 1)]=850,1; f \approx 3120.$$

При $x_k=\Delta_k=10^{-2}$ м отримаємо:

$$\zeta=9,44 \cdot 10^{-3}; \alpha=1-\zeta/R=0,6224; \beta=1-x_k/R=0,6;$$

$$S(0,6224; 0,6)=(\alpha > \beta)=-0,0115; S(0,6224; 1)=(\alpha < \beta)=0,0484;$$

$$Fo=0,3577; p_0=1,814 \cdot 10^6; t_k=35,8; x_1=5 \cdot 10^{-3}; \quad (3.27)$$

$$\beta_1=1-x_1/R=0,8; S(\alpha; \beta_1)=S(0,6224; 0,8)=0,0348;$$

$$T_1=T_0[Fo+S(\alpha; \beta_1)]/[Fo+S(\alpha; 1)]=850,6; f=2530.$$

Для $x_k=\Delta_k=11 \cdot 10^{-3}$ м:

$$\zeta=10,384 \cdot 10^{-3}; \alpha=1-\zeta/R=0,5846; \beta=1-x_k/R=0,56;$$

$$S(0,5846; 0,56)=(\alpha > \beta)=-0,01825; S(0,5846; 1)=(\alpha < \beta)=0,04273;$$

$$Fo=0,3701; p_0=1,783 \cdot 10^6; t_k=37,1; x_1=5,5 \cdot 10^{-3}; \quad (3.28)$$

$$\beta_1=1-x_1/R=0,78; S(\alpha; \beta_1)=S(0,5846; 0,78)=0,02905;$$

$$T_1=T_0[Fo+S(\alpha; \beta_1)]/[Fo+S(\alpha; 1)]=850,9; f \approx 2090.$$

За заданими та розрахованими значеннями T_0 при $x=0$, T_1 і T_k відповідно для $x=x_1$ і $x=x_k$ побудовано графічні залежності розподілу температури в шарі x_k (криві 1-4 на рис.3.1).

З результатів розрахунків і графічних залежностей витікає:

- Значення питомої потужності $\sim (1,8 \dots 2,0) \cdot 10^6$ Вт/м² при часі прогріву $t_k=31 \dots 37$ с істотно менше, ніж при гартуванні ($\sim 5,5 \dots 6,0 \cdot 10^6$ Вт/м² і $t_k \sim 10 \dots 15$ с) та більше, ніж при наскрізному нагріві ($\sim 0,5 \dots 0,6 \cdot 10^6$ Вт/м²) [26], що свідчить про перехідний характер пропонованого режиму.

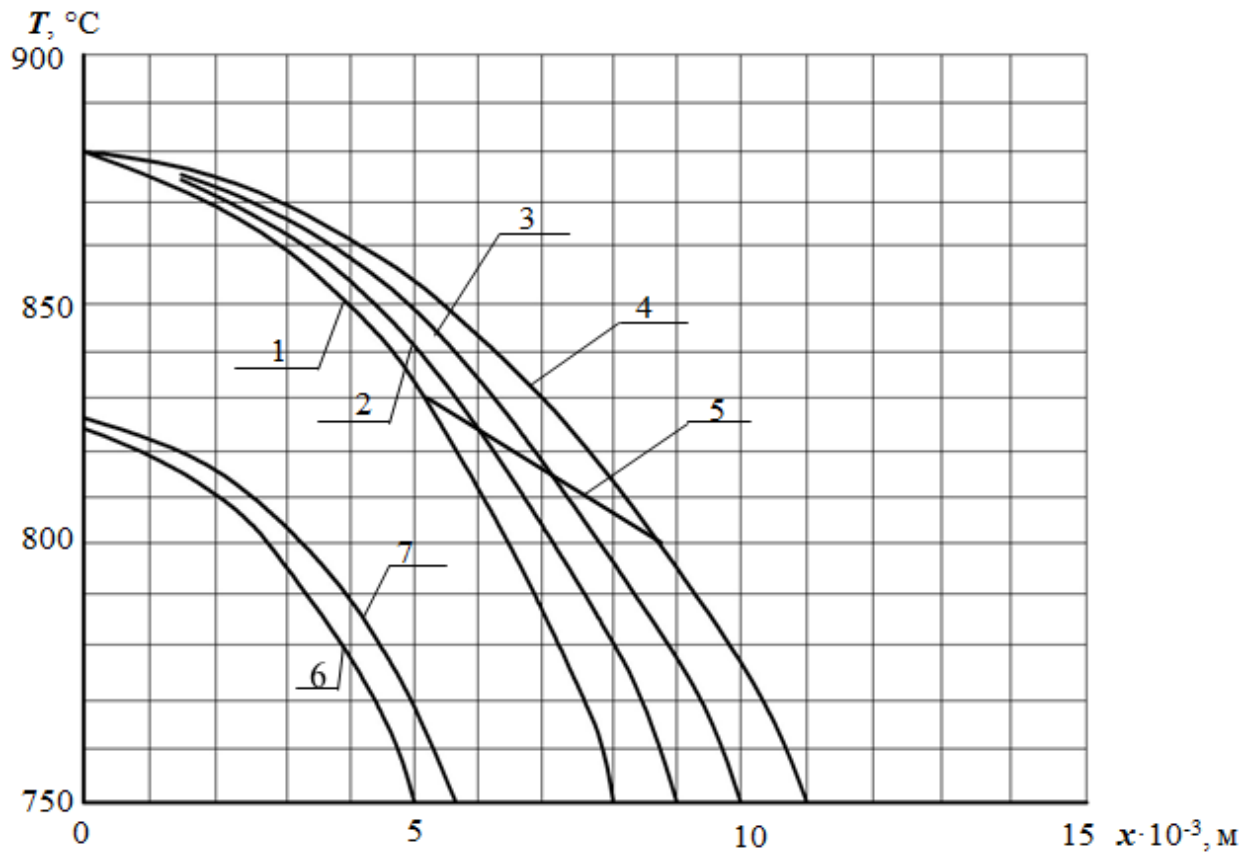


Рисунок 3.1 – Розподіл температури в поверхневому шарі при різних глибинах прогріву x_k : 1 – $8 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $9 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – 10^{-2} м; 4 – $11 \cdot 10^{-3}$ м; 5 – лінійна залежність граничних значень $T(x)$; 6 та 7 – на стадії перехідного нагріву при $x_{k2}=x_k/2$ для $x_k=(10 \text{ і } 11) \cdot 10^{-3}$ м відповідно

- Зростання поверхневої температури до 880°C відбувається за час, не менший 30с, тобто зі швидкістю, меншою 30°C/s , що нижче зданого значення 50°C/s [285].

- Припущення про лінійну залежність $T(x)$ у прогрітому шарі може бути використане тільки для попередньої оцінки значення x_k .

- Збільшення глибини x_k приводить до зменшення питомої потужності при збільшенні часу прогріву, що сприяє вирівнюванню характеристики $T(x)$ у межах поверхневого шару. Максимальна величина x_k обмежена умовою (1), тобто $x_k \leq 11 \cdot 10^{-3}$ м (крива 4 на рис.3.1).

- Заміна графічних залежностей $T(x)$ ламаними лініями з кроком $\Delta x = 1 \text{ мм}$ (10^{-3} м) дозволяє визначити різницю температур ΔT в межах цього інтервалу. Підсумовування цих значень на суміжних ділянках (від 3-х до 5-ти) визначить загальну різницю

на обраній ділянці шару x_k . Лінія 5 (див. рис.3.1) дає граничне значення глибини прогріву, при якій різниця температур нагріву у межах шару 3мм не перевищує 50°C . Для більш глибоких шарів ця різниця зростає, досягаючи 65°C для кривої 3 та 60°C , відповідно, для кривої 4, що є близьким до заданого значення (див. рис.3.1).

- Для кривих 3 та 4 частота нагріву дорівнює 2100-2500 Гц, причому, частоти 2400-2500 Гц є одними з основних у широкій номенклатурі тиристорних перетворювачів, що випускаються.

Для перевірки відповідності заданим параметрам нагріву розраховується поверхнева температура для середини прогрітого шару на початку другого перехідного етапу нагріву [284]. Вважаючи $x_k = \Delta_k = 10 \cdot 10^{-2}$ м та $p_0 = 1,814 \cdot 10^6$ Вт/м², отримаємо глибину прогрітого шару $x_{k2} = 0,5 \Delta_k = 5 \cdot 10^{-3}$ м, активного шару $\xi_2 = 0,55 \Delta_k = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м і $T_{k2} = 750^\circ\text{C}$. В цьому випадку $\alpha_2 = 1 - \xi_2/R = 0,78$ і $\beta_{k2} = 1 - \Delta_{k2}/R = 0,8$. Використовуючи вираз (3.11) для $\beta_{k2} > \alpha_2$ отримаємо $S(\alpha_2; \beta_{k2}) = S(0,78; 0,8) = 0,04254$ та $S(\alpha_2; 1) = S(0,78; 1) = 0,07605$. Зі співвідношення (3.14) $T_{k2} = 2p_0R[Fo_2 + S(\alpha_2; \beta_{k2})]/\lambda$ за заданим значенням T_{k2} на межі шару x_{k2} визначається критерій Фур'є, який дорівнює $Fo_2 = 0,3036$. З (3.16) і (3.17) витікає значення поверхневої температури $T_{02} = T_{k2}[Fo_2 + S(\alpha_2; 1)]/[Fo_2 + S(\alpha_2; \beta_{k2})] = 822,6^\circ\text{C}$ та час її досягнення $t_{k2} = R^2 Fo_2/a = 30,4$ с.

Значення T_2 на глибині $x_2 = x_{k2} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м і графічну залежність змінення температури нагріву в межах шару x_k визначають з урахуванням $\beta_2 = 1 - x_2/R = 0,9$. При цьому α_2 та Fo_2 мають ті ж значення. Використовуючи співвідношення (3.11), визначимо:

$$S(\alpha_2; \beta_2) = S(0,78; 0,9) = 0,068. \quad (3.29)$$

Підставляючи в (3.16) замість T_k та $S(\alpha; \beta_k)$ відповідні значення T_2 та $S(\alpha_2; \beta_2)$, маємо:

$$T_2 = T_{02}[Fo_2 + S(\alpha_2; \beta_2)]/[Fo_2 + S(\alpha_2; 1)] = 822,6(0,3036 + 0,068)/(0,3036 + 0,07605) = 805,2. \quad (3.30)$$

Залежність зміни температури в межах шару $x_k/2=5 \cdot 10^{-3}$ м представлена кривою 6 (див. рис.3.1). Аналогічно виконується розрахунок поверхневої температури в середині прогрітого шару на перехідному етапі, коли глибина складає $x_{k2}=0,5A_k=0,5x_k=0,5 \cdot 11 \cdot 10^{-3}=5,5 \cdot 10^{-3}$ м при $p_0=1,783 \cdot 10^6$ Вт/м². В цьому випадку:

$$\begin{aligned} \xi_2 &= 0,55A_k = 6,05 \cdot 10^{-3}; T_{k2} = 750; \alpha_2 = 1 - \xi/R = 0,758; \\ \beta_{k2} &= 1 - x_{k2}/R = 0,78; S(\alpha_2; \beta_{k2}) = S(0,758; 0,78) = 0,03626; \\ S(\alpha_2; 1) &= S(0,758; 1) = 0,07182; Fo_2 = 0,316074; \\ T_{02} &= T_{k2}[Fo_2 + S(\alpha_2; 1)]/[Fo_2 + S(\alpha_2; \beta_{k2})] = 825,6; t_{k2} = R^2 Fo_2/a = 31,6. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Для середини шару x_{k2} маємо:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_{k2}/2 = 2,75 \cdot 10^{-3}; \beta_2 = 1 - x_2/R = 0,89; \\ S(\alpha_2; \beta_2) &= S(0,758; 0,89) = 0,06332; \\ T_2 &= T_{02}[Fo_2 + S(\alpha_2; \beta_2)]/[Fo_2 + S(\alpha_2; 1)] = 807,5. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Розподіл температури в межах шару $x_k/2=5,5 \cdot 10^{-3}$ м на перехідному етапі нагріву представлено кривою 7 (див. рис.3.1), яка свідчить про те, що параметри нагріву деталі аналогічні попередньому випадку.

З результатів розрахунків випливає, що для менших із заданого діапазону діаметрів деталі (50...60 мм) оптимальною є глибина прогріву $x_k=10...11$ мм. При цьому від середини та до межі шару x_k змінення температури зростає від заданого значення до 60...65°C на 3 мм глибини прогріву. Зростання поверхневої температури за час нагріву знаходиться у межах заданих значень.

Друге граничне значення для заданого діапазону діаметрів деталей – $D=120$ мм=0,12 м. Критерій τ визначається методом добору таким чином, щоб співвідношення складало $T_0/T_k=1,173$. Розрахунок приведено для $x_k=10$ мм= 10^{-2} м як мінімально допустимого значення, яке забезпечує найменший час нагріву та витрачувану енергію.

Для $x_k = \Delta_k = 10^{-2} \text{ м}$, $\beta_k = 1 - x_k/R = 0,8333$ та $\alpha = 1 - \xi/R = 1 - 0,944 \cdot 10^{-2}/0,06 = 0,8427$
з виразу (3.16):

$$T_0 / T_k = \frac{Fo + S(\alpha, 1, Fo)}{Fo + S(\alpha, \beta_k, Fo)} = 1,173. \quad (3.33)$$

Значення допоміжної функції S визначаються інтерполюванням даних (табл.3.1-3.2). Значення $S(\alpha; 1; 0,2)$ визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} S_1(0,8; 1; 0,2) &= 0,8; \\ S_2(0,9; 1; 0,2) &= 0,1013; \\ S(0,8427; 1; 0,2) &= (S_2 - S_1) \cdot 0,0427/0,1 = 0,0891 \text{ – для поверхні деталі.} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Для $S(\alpha; \beta_k; Fo) = S(0,8427; 0,8333; 0,2)$ та глибини прогріву x_k необхідно проводити інтерполювання за α та β_k . Порядок розрахунку наступний. Згідно з табл.3.1-3.2 значення допоміжної функції: $S(0,8; 0,8; 0,2) = 0,0417$; $S(0,8; 0,9; 0,2) = 0,0708$. Інтерполювання за β_k дає: $S(0,8; 0,8333; 0,2) = 0,05139$; $S(0,9; 0,8333; 0,2) = 0,05045$. Далі інтерполювання за α дає: $S(0,8427; 0,8333; 0,2) = 0,09$. Підставляючи отримані $S(0,8427; 1; 0,2)$ та $S(0,8427; 0,8333; 0,2)$ у співвідношення для T_0/T_k , отримаємо при $Fo = 0,2$ $T_0/T_k = 1,1518$. Це значення менше заданого, отже шукане $Fo < 0,2$.

Подібним чином при $Fo = 0,15$ визначаються $S(0,8427; 1; 0,15) = 0,08204$; $S(0,8427; 0,8333; 0,15) = 0,04554$ та $T_0/T_k = 1,18656 > 1,173$. Отже, $0,15 < Fo < 0,2$.

Для отриманих значень допоміжної функції $S(0,8427; 1; 0,15)$, $S(0,8427; 1; 0,2)$, $S(0,8427; 0,8333; 0,15)$ та $S(0,8427; 0,8333; 0,2)$ підбирається Fo , при якому виконується умова $T_0/T_k = 1,173$.

При $Fo = 0,18$ маємо:

$$S(0,8427; 1; 0,18) = [S(0,8427; 1; 0,2) - S(0,8427; 1; 0,15)] \cdot (0,18 - 0,15) / (0,2 - 0,15) = 0,0863. \quad (3.35)$$

Аналогічно для другої пари значень допоміжної функції визначимо $S(0,8427; 0,8333; 0,18)=0,04882$. Співвідношення складатиме:

$$T_0/T_k=(0,18+0,0863)/(0,18+0,04882)=1,1638, \quad (3.36)$$

що значно ближче до потрібного значення.

При $Fo=0,17$: $S(0,8427; 1; 0,17)=0,08464$ і $S(0,8427; 0,8333; 0,17)=0,047724$ та $T_0/T_k=1,17058$. Для $Fo=0,168$ відповідно маємо: $S(0,8427; 1; 0,168)=0,08458$; $S(0,8427; 0,8333; 0,168)=0,047506$ і $T_0/T_k=1,172$. Продовжуючи інтерполювання, остаточно отримаємо $Fo=0,16672$ и $S(\alpha; 1; Fo)=S(0,8427; 1; 0,166672)=0,0844$.

За допомогою виразів (3.15) і (3.17) визначаються час нагріву:

$$t_{k2}=R^2 Fo_2/a=0,16672 \cdot 36 \cdot 10^{-4}/6,25 \cdot 10^{-6}=96. \quad (3.37)$$

та значення питомої потужності:

$$P_0 = \frac{\lambda T_0}{2R[Fo + S(\alpha, 1, Fo)]} = \frac{41,87 \cdot 880}{2 \cdot 0,06(0,316672 + 0,0844)} = 1,233 \cdot 10^6 \quad (3.38)$$

і частота $f=2530$ Гц.

Для отриманої графічної залежності змінення температури в межах шару x_k визначається значення T_1 на глибині $x_1=x_k/2=5 \cdot 10^{-3}$ м. В цьому випадку $\beta_1=1-x_1/R=1-5/60=0,916667$; α і τ мають ті ж самі значення. Підставляючи в (3.16) T_1 замість T_k , отримаємо співвідношення, яке визначає значення $T_1=T_0[Fo+S(\alpha;\beta_1;Fo)]/[Fo+S(\alpha;1;Fo)]$. Оскільки $S(\alpha;1;Fo)=S(0,8427;1;0,16672)=0,0844$ визначено вище, залишається розрахувати $S(\alpha;\beta_1;Fo)$. Використовуючи дані (табл.3.1-3.2), для $Fo=0,2$ маємо:

$$S(0,8; 0,9; 0,2)=0,0708; \quad S(0,8; 1; 0,2)=0,0800. \quad (3.39)$$

Інтерполюванням отримаємо:

$$S(0,8; 0,916667; 0,2)=0,072333. \quad (3.40)$$

Аналогічно:

$$\begin{aligned} S(0,9; 0,9; 0,2) &= 0,0788; \\ S(0,9; 1; 0,2) &= 0,1013; \\ S(0,9; 0,916667; 0,2) &= 0,08255. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Інтерполюючи за α , маємо $S(0,8427; 0,916667; 0,2)=0,0766956$. Виконуючи ті ж операції для $Fo=0,15$ отримаємо:

$$\begin{aligned} S(0,8; 0,9; 0,15) &= 0,0645; \quad S(0,8; 1; 0,15) = 0,0732; \\ S(0,8; 0,916667; 0,15) &= 0,06595; \quad S(0,9; 0,9; 0,15) = 0,072; \\ S(0,9; 1; 0,15) &= 0,0939; \quad S(0,9; 0,916667; 0,15) = 0,07565. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Після інтерполювання за α :

$$S(0,8427; 0,916667; 0,15)=0,0701. \quad (3.43)$$

Після інтерполювання для $Fo=0,16672$ маємо:

$$S(0,8427; 0,916667; 0,16672)=0,0723. \quad (3.44)$$

Підставляючи отримані значення допоміжної функції у вираз для T_1 , визначимо:

$$T_1=880(0,16672+0,0703)/(0,16672+0,0844)=837,6. \quad (3.45)$$

Графічна залежність зміння температури від глибини прогрітого шару для діаметру деталі $D=120\text{мм}$ представлені у вигляді кривої 1 (рис.3.2).

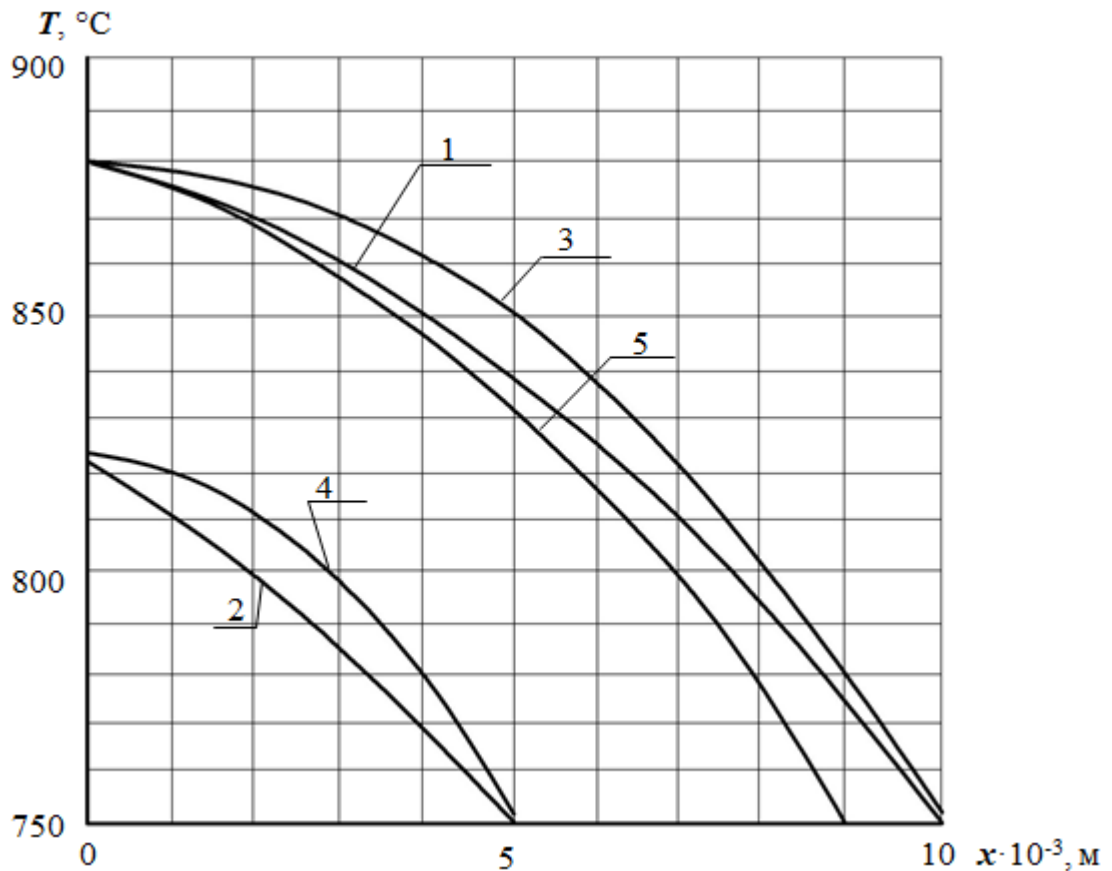


Рисунок 3.2 – Розподіл температури в поверхневому шарі при глибині прогріву 10 мм для діаметрів деталі: 1 – 120 мм і 3 – 50 мм; та на перехідному етапі: 2 – 120 мм і 4 – 50 мм; а також 5 – приблизний вигляд розподілу для діаметра 120мм при глибині 9 мм.

Аналогічно розглянутому вище алгоритму розрахунку визначається зміна температури в шарі, що прогрівається, на початку другого перехідного етапу нагріву. В цьому випадку:

$$x_{k2}=0,5\Delta_k=5\cdot 10^{-3}; \zeta_2=0,55\Delta_k=5,5\cdot 10^{-3}; \beta_{k2}=1-5/60=0,91667; p_0=1,223\cdot 10^6. \quad (3.46)$$

Значення температури на межі шару x_{k2} є вихідним для розрахунку, дорівнює $T_{k2}=750^\circ\text{C}$, та задається співвідношенням (3.14).

Звідси отримаємо співвідношення, яке дозволяє розрахувати τ_2 :

$$Fo_2 + S(\alpha_2; \beta_{k2}; Fo_2) = T_{k2} \cdot \lambda / 2p_0 R = 0,75 \cdot 10^3 \cdot 41,87 / 2 \cdot 6 \cdot 10^{-2} \cdot 1,223 \cdot 10^6 = 0,214024. \quad (3.47)$$

Значення Fo_2 визначається методом добору. Оскільки $t_{k2} = Fo_2 R^2 / a$ та явно менше t_k , то Fo_2 буде менше розрахованого вище $Fo = 0,16672$. Отже добір значення τ_2 починається з $Fo_2 = 0,15$. З використанням даних (табл.3.1-3.2) визначено:

$$S(1; 0,9; 0,15) = 0,0705; S(1; 1; 0,15) = 0,1175. \quad (3.48)$$

Інтерполюванням вище було отримане:

$$S(1; 0,916667; 0,15) = 0,0783334; S(0,9; 0,916667; 0,15) = 0,07565. \quad (3.49)$$

Для $Fo_2 = 0,15$ маємо $S(0,908333; 0,916667; 0,15) = 0,0758736$.

Аналогічно для $Fo_2 = 0,1$:

$$S(0,9; 0,9; 0,1) = 0,0646; S(0,9; 1; 0,1) = 0,086, \quad (3.50)$$

звідки:

$$S(0,9; 0,916667; 0,1) = 0,0681667. \quad (3.51)$$

Таким же чином:

$$S(1; 0,9; 0,1) = 0,063; S(1; 1; 0,1) = 0,1093, \quad (3.52)$$

звідки:

$$S(1; 0,916667; 0,1) = 0,0707168. \quad (3.53)$$

Отже, при $Fo_2=0,1$ $S(0,908333; 0,916667; 0,1)=0,0683791$.

Значення допоміжної функції для $Fo_2=0,1$ і $Fo_2=0,15$ є вихідними для визначення Fo_2 . При $Fo_2=0,15$ отримаємо:

$$Fo_2+S(\alpha_2; \beta_{k2}; Fo_2)=0,15+0,0758736=0,22587, \quad (3.54)$$

що більше заданого значення.

Для $Fo_2=0,14$ маємо:

$$S(0,908333; 0,916667; 0,14)=0,074075; \quad Fo_2+S(\alpha_2; \beta_{k2}; Fo_2)=0,14+0,074075=0,214075, \quad (3.55)$$

що практично співпадає з заданим (помилка менше 0,024%).

Знаючи τ_2 , отримаємо час нагріву:

$$t_{k2}=Fo_2R^2/a=80,6. \quad (3.56)$$

Поверхнева температура може бути отримана з виразу (3.16). Знаменник цього виразу відомий, тому залишається визначити значення допоміжної функції $S(\alpha_2; 1; Fo_2)=S(0,908333; 1; 0,14)=0,074075$. Аналогічно алгоритму, приведенному вище, з використанням даних (табл.3.1-3.2), визначено:

$$S(0,9; 1; 0,15)=0,0939; \quad S(1; 1; 0,15)=0,1175, \quad (3.57)$$

звідки:

$$S(0,908333; 1; 0,15)=0,0958665. \quad (3.58)$$

Відповідно:

$$S(0,9; 1; 0,1)=0,086; S(1; 1; 0,15)=0,1093, \quad (3.59)$$

звідки:

$$S(0,908333; 1; 0,1)=0,0879415. \quad (3.60)$$

Остаточно, $S(0,908333; 1; 0,14)=0,0942815$ та $T_{02}=750(0,14+0,0942815)/0,214024=821^{\circ}\text{C}$.

Для побудови графічної залежності температури від глибини на перехідному етапі нагріву необхідно визначити значення T_2 на відстані $x_2=x_{к2}/2=2,5 \cdot 10^{-3}$ м від поверхні деталі. В цьому випадку α_2 і F_{O_2} мають ті ж значення: $\alpha_2=0,908333$, $F_{O_2}=0,14$ та $\beta_2=1-x_2/R=0,958333$. При підставленні T_2 замість T_k у вираз (3.16), отримаємо:

$$T_2=T_{02}[F_{O_2}+S(\alpha_2;\beta_2;F_{O_2})]/[F_{O_2}+S(\alpha_2;1;F_{O_2})]. \quad (3.61)$$

Значення $S(\alpha_2;1;F_{O_2})=S(0,908333;1;0,14)=0,0942815$ визначене вище. Методом інтерполювання за даними (табл.3.1-3.2) знаходимо $S(\alpha_2;\beta_2;F_{O_2})=S(0,908333;0,958333;0,14)$. Визначаємо:

$$S(0,9; 0,9; 0,1)=0,0646; S(0,9; 1; 0,1)=0,086, \quad (3.62)$$

звідки інтерполюванням знаходимо:

$$S(0,9; 0,958333; 0,1)=0,0770832. \quad (3.63)$$

Аналогічно для $\alpha=1$:

$$S(1; 0,9; 0,1)=0,063; S(1; 1; 0,1)=0,1093, \quad (3.64)$$

звідки інтерполюванням визначається:

$$S(1; 0,958333; 0,1)=0,090008. \quad (3.65)$$

Інтерполювання за α дає $S(0,908333; 0,958333; 0,1)=0,0781602$. Виконавши ті ж самі розрахунки для $F_{O_2}=0,15$, визначено:

$$S(0,9; 0,9; 0,15)=0,072; S(0,9; 1; 0,15)=0,0939, \quad (3.66)$$

звідки:

$$S(0,9; 0,958333; 0,15)=0,0847749. \quad (3.67)$$

Аналогічно:

$$S(1; 0,9; 0,15)=0,0705; S(1; 1; 0,15)=0,1175, \quad (3.68)$$

звідки:

$$S(1; 0,958333; 0,15)=0,0979165. \quad (3.69)$$

Інтерполювання за α_2 дає $S(0,908333; 0,958333; 0,15)=0,0858699$. Шукане значення складатиме $S(0,908333; 0,958333; 0,14)=0,085651$. Підставляючи отримані данні у вираз для T_2 , визначимо:

$$T_2=821[0,14+0,08565]/[0,14+0,0942815]=790,8. \quad (3.70)$$

Розподіл температури в поверхневому шарі на етапі попереднього прогріву представлено графічною залежністю у вигляді кривої 2 (див. рис.3.2).

Для наочності та порівнюваності результатів розрахунку повторно приведено криві 3 та 4, які відносяться до $x_k=10\text{мм}$ для діаметру деталі 50мм. Як видно з наведених графічних залежностей (див. рис.3.2) задана умова зміни температури, яка дорівнює 50°C на 3 мм глибини прогріву, виконується в діапазоні від поверхні деталі до $0,8x_k$ та зростає до $60\dots65^\circ\text{C}$ у межах $(0,8\dots1,0)x_k$. З приведених залежностей випливає, що в обраному діапазоні діаметрів деталей від 50 до 120 мм залежності $T(x)$ знаходяться між кривими 2 та 4 на перехідному етапі та між кривими 1 і 3 для скінчення прогріву.

Глибина прогріву $x_k=\Delta_k=10\text{мм}$ є оптимальною, та для режиму нагріву, що розглядається, визначить верхню межу діапазону частот $f_b=2530\text{Гц}\approx 2500\text{Гц}$. Слід відмітити, що при виробничій необхідності знизити час нагріву деталей діаметром 120мм глибина прогріву x_k може бути зменшена до 9мм. Приблизний вигляд залежності $T(x)$ для даного випадку представлено у вигляді кривої 5 (див. рис.3.2). В цьому випадку частота складатиме $f_b=3100\text{Гц}$ при зростанні питомої потужності нагріву.

Відповідно, для середини заданого діапазону діаметрів ($\approx 80\dots 90\text{мм}$) частота f_b складатиме 2800Гц при глибині прогріву $x_k=\Delta_k=9,5\text{мм}$. Нижня межа частот визначається співвідношеннями (3.1)-(3.4) і складає для діаметра деталі 120мм $f_n=400\text{Гц}$ при $x_k=\Delta_k\approx 25\text{мм}$, що є близьким до наскрізного прогріву та недоцільним з точки зору енергоефективності. Таким чином, діапазон частот складатиме: $2100\leq f\leq 2500\text{Гц}$ – для $D_2=50\text{мм}$; $2500\leq f\leq 3100\text{Гц}$ – для $D_2=120\text{мм}$; $2300\leq f\leq 2800\text{Гц}$ – приблизний діапазон частот для середніх значень діаметрів деталей $D=80\dots 90\text{мм}$.

При розрахунку індукторів разом із частотою $f=2500\text{Гц}$ та глибиною прогріву $x_k=10\text{мм}=10^{-3}\text{м}$ важливими параметрами є питома потужність p_0 та час нагріву t_k . Тому необхідно визначити їх значення для діаметрів 60, 80 і 100 мм, щоб визначити весь заданий діапазон від 50 до 120мм. Для $D=60\text{мм}$:

$$R=D/2=0,03; \alpha=1-\zeta/R=1-0,944\cdot 10^{-2}/0,03^2=0,68533;$$

$$\beta=1-x_k/R=0,66667; Fo=0,2; S(0,68533; 1; 0,2)=0,05891; \quad (3.71)$$

$$S(0,68533; 0,66667; 0,2)=0,0026; Fo>0,2; S(0,68533; 0,66667)=0,0025;$$

$S(0,68533; 1)=0,05871; T_0/T_k=1,2779>1,173$ – випадок відповідає розрахунку за (3.6) і (3.7).

3 $T_0/T_k=[Fo+S(0,68533; 1)]/[Fo+S(0,68533; 0,66667)]$ отримаємо $Fo=0,3224;$
 $t_k=46,4с; p_0=1,61 \cdot 10^6$ Вт/м². Для $D=80$ мм:

$$R=D/2=0,04; \alpha=1-\zeta/R=1-0,944 \cdot 10^{-2}/0,03^2=0,764; \beta=1-x_k/R=0,75;$$

$$Fo=0,2; S(0,764; 1; 0,2)=0,07327; S(0,764; 0,75; 0,2)=0,024; \quad (3.72)$$

$T_0/T_k=1,2188>1,173$ – відповідає розрахунку для $D=50$ мм;

$$S(0,764; 1)=0,072962; S(0,764; 0,75)=0,0248744;$$

$$Fo=0,2531; t_k=64,8; p_0=1,4125 \cdot 10^6.$$

Для $D=100$ мм:

$$R=D/2=0,05; \alpha=1-\zeta/R=1-0,944 \cdot 10^{-2}/0,03^2=0,8112;$$

$$\beta=1-x_k/R=0,8; Fo=0,2; S(0,8112; 0,8; 0,2)=0,041095; \quad (3.73)$$

$S(0,8112; 1; 0,2)=0,082; T_0/T_k=1,171265>1,173$ – відповідає випадку для $D=120$ мм;

$$Fo=0,197; S(0,8112; 0,8; 0,197)=0,040805;$$

$$S(0,8112; 1; 0,197)=0,081974; t_k=78,8; p_0=1,321 \cdot 10^6.$$

Залежності часу t_k досягнення необхідного розподілу температури нагріву (лінія 1) та питомої потужності p_0 (лінія 2) від діаметру деталі D представлені на рис.3.3.

Згідно [284], для нагріву при постійній питомій потужності під гартування параметри нагріву складають: $p_0=(5...8) \cdot 10^6$ Вт/м² і $t_k=10...20$ с. Для режиму наскрізного нагріву дані параметри відповідно складають: $p_0=0,54 \cdot 10^6$ Вт/м² і t_k до 100с при $D=100$ мм.

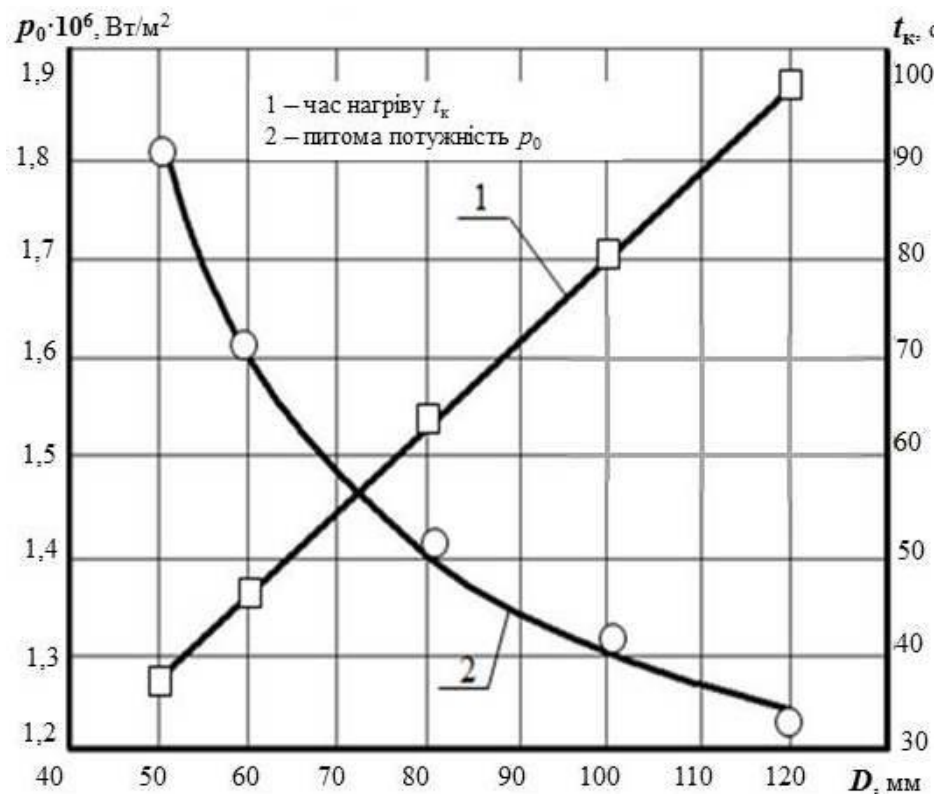


Рисунок 3.3 – Залежності часу нагріву (1) та питомої потужності (2) від діаметру відновленої деталі

Порівняння з розрахованими значеннями, які представлені на рис.3.3, показує, що пропонувані режим є перехідним між відомим наскрізним та нагрівом під гартування циліндричних деталей. При цьому даний режим забезпечує необхідне значення зростання поверхневої температури та близьке до заданого її розподілення вглиб прогрітого шару.

3.2. Дослідження впливу теплоізолюючого середовища на структуру нанесеного шару

Структура після високочастотної нормалізації відрізняється від структури після нормалізації з пічного нагріву [272]. При звичайній нормалізації з нагрівом у печі структура складається із зерен перліту, рівномірно розподілених між зерен фериту. Обидві структурні складові представлені у вигляді доволі великих зерен. При високочастотному нагріві загальна кількість вільного фериту в структурі дещо менша,

ніж при звичайному пічному. Зменшення кількості структурно вільного фериту слід пояснити, вочевидь, тим, що після нагріву з більшою швидкістю, який приводить до утворення дрібнозернистого аустеніту, відособлення фериту при охолодженні дещо утруднене. В перліті залишається дещо більше фериту, ніж є необхідним для утворення евтектоїду. В окремих ділянках може утворюватися більш тонкий перліт, близький до будови сорбіту. Крім того, охолодження на повітрі приводить до утворення окалини, що вимагає збільшення припусків на механічну обробку, а, отже, й збільшення товщини стрічки, що приварюється. З метою усунення вказаних недоліків і одержання необхідної структури охолодження після індукційного нагріву слід проводити в середовищі, яке б забезпечувало більш повільну швидкість охолодження та перешкождала б окисленню поверхні.

За даними [286], температура та тривалість перлітного перетворення залежать від швидкості охолодження сталі з температури аустенізації до температури початку перлітного перетворення, а саме, чим вища швидкість охолодження, тим нижча температура перетворення та менше його тривалість. Для всіх умов охолодження (з піччю, на повітрі та в графіті (рис.3.4)) [287] характерні чотири стадії: 1 – охолодження з температури аустенізації до температури початку відокремлення фериту; 2 – охолодження з температури початку відокремлення фериту до початку перлітного перетворення; 3 – власне перлітне перетворення; 4 – охолодження з температури завершення перлітного перетворення до температури 200 °С.

Отриманий характер змінення структури пов'язаний, в першу чергу, зі швидкістю охолодження зразків до початку перлітного перетворення. Збільшення швидкості охолодження приведе до зниження температури перлітного перетворення та зменшення його тривалості. У всіх випадках перлітне перетворення відбувається при постійній температурі, тобто має ізотермічний характер. Це вказує на те, що перлітне перетворення відбувається за рахунок власної внутрішньої енергії. Оскільки ця енергія компенсує втрати в навколишнє середовище, тривалість перетворення залежить від температури охолоджуючого середовища.

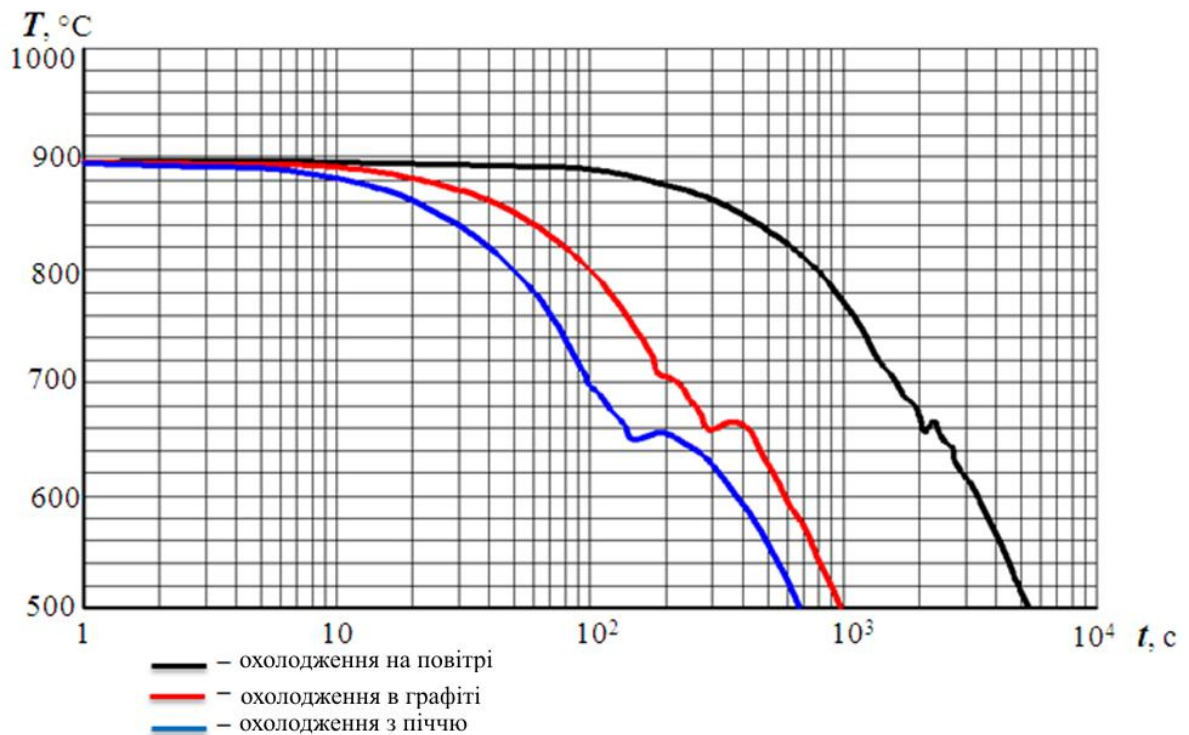
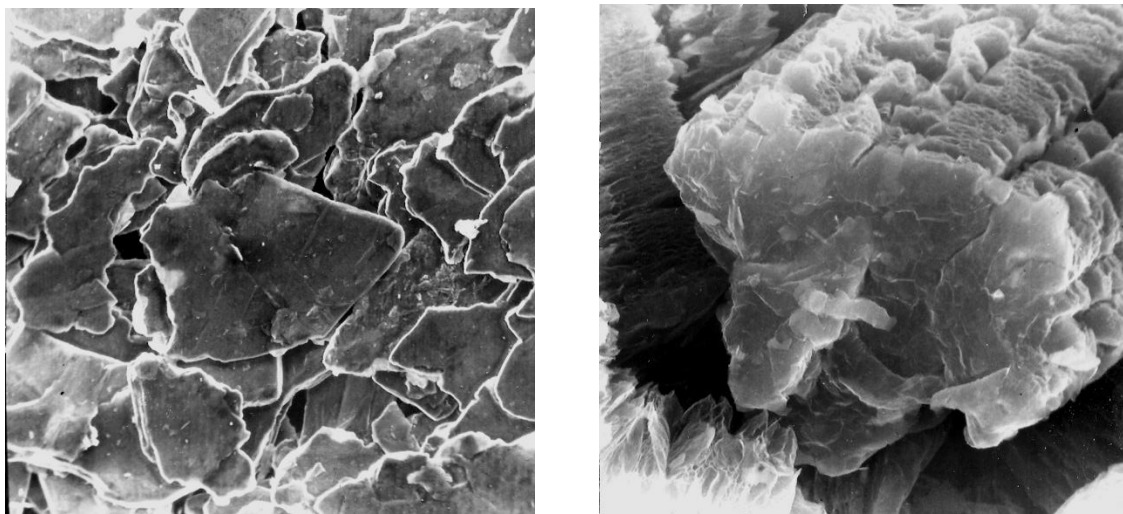


Рисунок 3.4 – Змінення температури наварених зразків зі сталі 45 діаметром 20мм при різних умовах охолодження після термообробки [287]

При більш низькій температурі переохолодження перетворення швидко завершується через те, що внутрішнє тепло інтенсивно витрачається на нагрів навколишнього середовища, а тому не може тривало підтримувати власне перлітне перетворення. При менших ступенях переохолодження, які мають місце при охолодженні у графіті або з піччю, зменшуються втрати тепла в навколишнє середовище, а тому створюються умови для збільшення тривалості перетворення. Оскільки при нормалізації в поверхневому шарі перлітне перетворення протікає при більш низькій температурі, ніж у центральній частині, то структура в поверхневому шарі повинна бути дрібнішою, а в центральній частині більшою. При індукційному нагріві виріб прогріватиметься тільки на визначену глибину, тому відведення тепла протікатиме ще інтенсивніше й тривалість перетворення ще більше знизиться. У випадку охолодження у графіті перлітне перетворення починається при температурі на 30 °C вищій, ніж при охолодженні на повітрі, проте при цій же температурі й завершується. З цього виходить, що після завершення перлітного перетворення структура зразків після охолодження у графіті повинна бути більш однорідною.

Випробування проводили на наварених зразках зі сталі 45 діаметром 40мм стрічкою зі сталі 45 (режим наварювання: $I=6\text{кА}$, $P=1,25\text{кН}$, $t_{\text{имп}}=0,04\text{с}$) після ТВЧ згідно рекомендацій (див. рис. 3.3). Довжина навареного зразку 50 мм, діаметр 55мм.

Охолодження зразків проводили на спокійному повітрі (19°C) і в теплоізолюючому середовищі, яке містить наступні складові: сріблястий сипкий графіт ГЛ1 ГОСТ 5279-74 із технологічною домішкою низькотемпературного з'єднання інтеркальованного графіту, який має вигляд кристалічного порошку чорного кольору (рис.3.5, а).



а)

б)

Рисунок 3.5 – Шарувате з'єднання графіту у вихідному стані (а) та після термоудару (б) ($\times 30$)

Низькотемпературне з'єднання інтеркальованного графіту загальною формулою SnO одержували з природного графіту марки ГТ-2 наступним чином [282]*. Порошок графіту засипали в анодний простір електролізера, відділений від катодного простору скляною діафрагмою, ущільнювали його до щільності, яка перевищує в 1,3-1,5 рази щільність вихідного порошку. На поверхні ущільненого порошку розміщували графітовий струмовід, на який встановлювали вантаж для покращення електричного контакту між частками графіту. В катодний простір електролізера заливали електроліт.

*Автор висловлює подяку співробітникам ІнФОРУ ім. Л.М. Литвиненко НАН України за надану допомогу у виготовленні шаруватих з'єднань графіту.

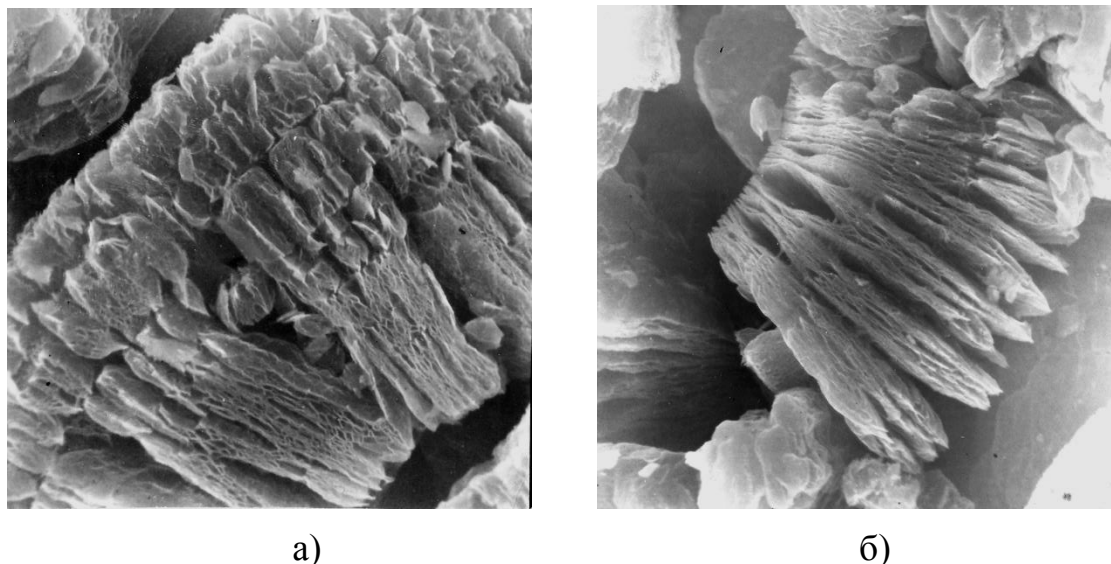


Рисунок 3.6 – Шарувате з'єднання графіту після термоудару ($\times 60$) (а)
і ($\times 100$) (б)

Після змочування крізь електролізер пропускали постійний струм. Електроліз проводили при температурі не вище 30°C протягом часу, необхідного для зниження величини початкового струму електролізеру на 90-95%. Отриману масу виймали з комірки, ретельно промивали доки вода не містила кислоти (її концентрацію визначали ваговим методом BaOH).

Одержане низькотемпературне з'єднання інтеркальованного графіту має наступні характеристики: насипна щільність $0,3-0,4 \text{ г/см}^3$, температура ефективного розширення $200-250^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт терморозширення $150-170 \text{ см}^3/\text{г}$. При нагріванні до 200°C відбувається термодеструкція з'єднання інтеркальованного графіту до пінографіту (див. рис.3.5), який має гадану щільність $0,002\pm 0,001 \text{ г/см}^3$. Пінографіт утворюється в результаті розшарування кристалів графіту у міжшарових просторових продуктах піролізу кисневих комплексів поліаренових шарів [289]. Коефіцієнт терморозширення визначали як співвідношення об'єму розширеного низькотемпературного з'єднання інтеркальованного графіту після нагріву до заданої температури (см^3) до маси вихідного зразку (г). Для цього у верхній отвір вертикальної трубчастій печі вносили навішування синтезованого низькотемпературного з'єднання інтеркальованного графіту, що при збільшенні обсягу через нижній отвір печі потрапляла у циліндр для вимірювання об'єму.

Характер нагріву теплоізолюючої суміші при знаходженні в ньому наварених зразків після нагріву ТВЧ фіксували за допомогою термопари ТХА, розташованої на відстані 10мм від навареної поверхні на рівні середини її довжини. Експериментально встановлено, що при використанні оксиду графіту в кількості 0,5-0,7 мас.% нагрів суміші не перевищував 30°C , у той час як при використанні 100% сріблястого графіту ГЛ-1 нагрів досягає 240°C за той же час [287]. Встановлено, що при меншій кількості оксиду графіту в суміші захисний ефект не є істотним, а при вмісті більше 0,7 мас.% – є технологічно неефективним [290]. Таким чином, застосування розробленого теплоізолюючої суміші знижує енерговитрати при термообробці наварених зразків, підвищуючи ефект теплоізоляції з наближенням до умов обробки в печі (рис.3.7).

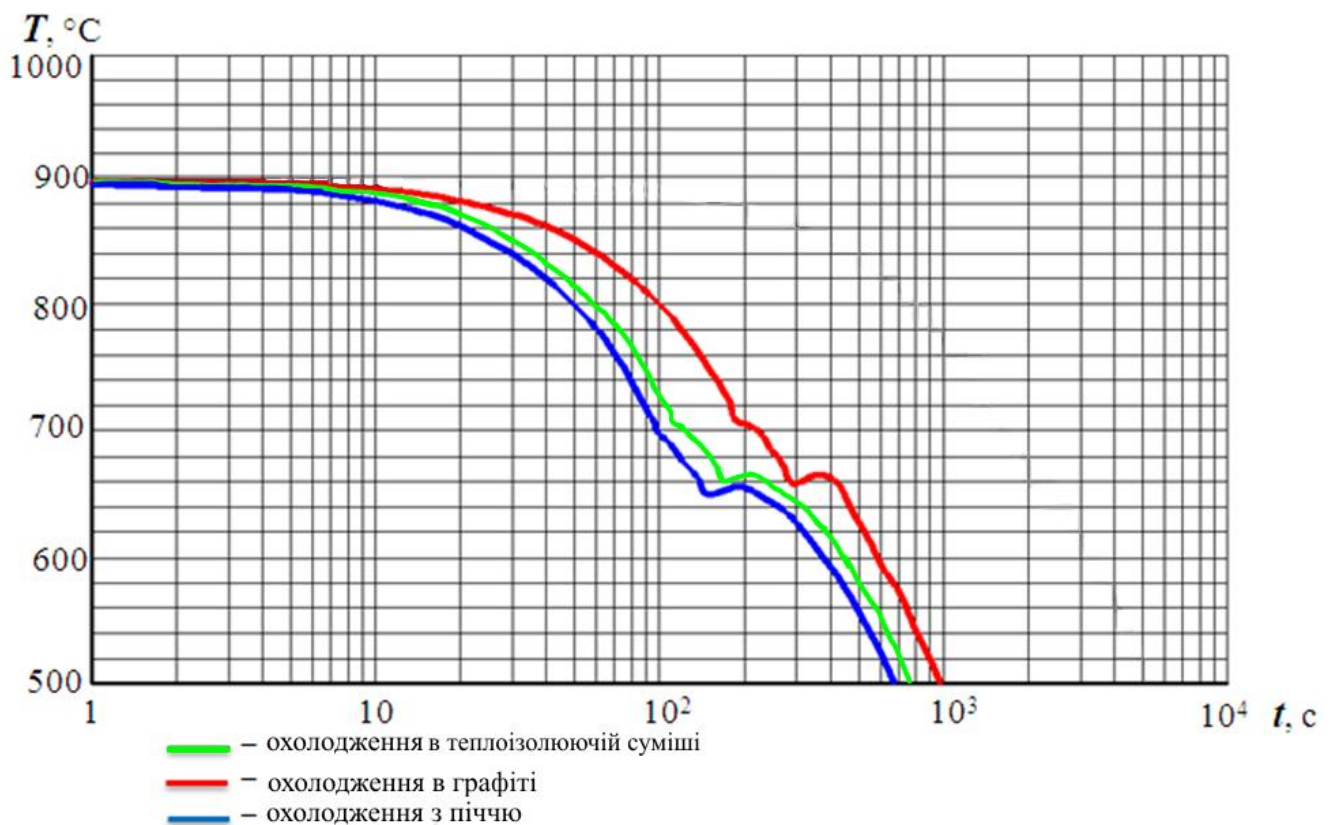


Рисунок 3.7 – Змінення температури наварених зразків зі сталі 45 діаметром 20мм при витримці у теплоізолюючій суміші порівняно із стандартними методами охолодження

Після комбінованої обробки наварені зразки для забезпечення заданої розмірної точності шліфували на круглошліфувальному верстаті електрокорундовим шліфувальним кругом ПП300×25 марки 14A40СМ2К5 на режимі: робоча швидкість круга 35 м/с, колова швидкість навареної деталі 35 м/хв, радіальна подача 0,001мм/об. Для охолодження застосовували 2%-вий розчин емульсолу Аквол-6, подача поливом з об'ємною витратою 10 л/хв.

Кількісний фазовий аналіз і аналіз розмірів зерна одержано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Мікроструктури зразків, що піддавалися нормалізації з охолодженням на повітрі і в теплоізолюючій суміші наведені на рис. 3.8.

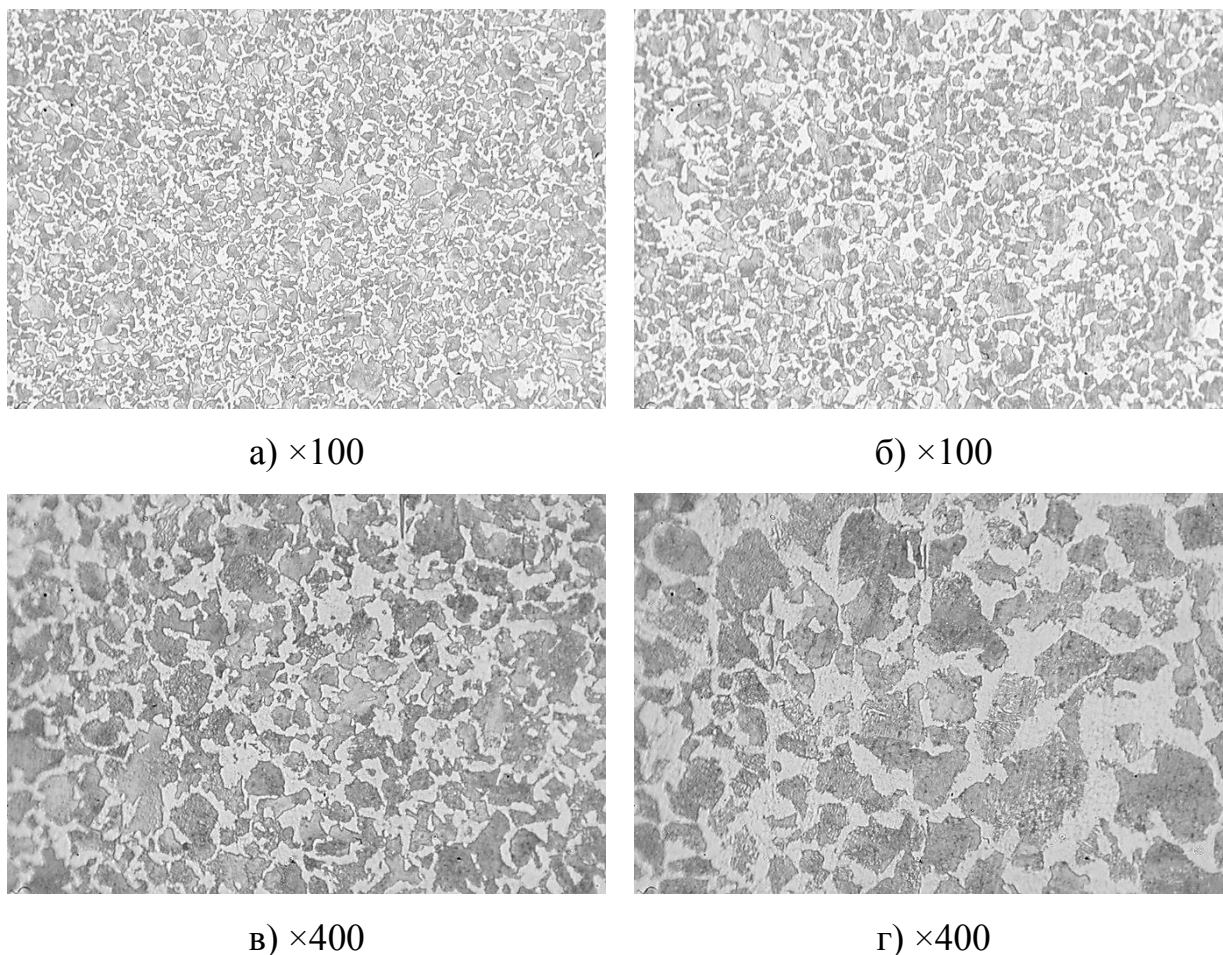


Рисунок 3.8 – Мікроструктура навареного зразку зі сталі 45 після нормалізації з індукційного нагріву до 880°C на повітрі (а, в) і в теплоізолюючій суміші (б, г)

В результаті кількісного металографічного аналізу різних полів зору вздовж наварених зразків було встановлено, що витримка навареного електро-

контактним методом зразку після ТВЧ в теплоізолюючій суміші (рис.3.9) забезпечила збільшення вмісту надлишкового фериту [290].

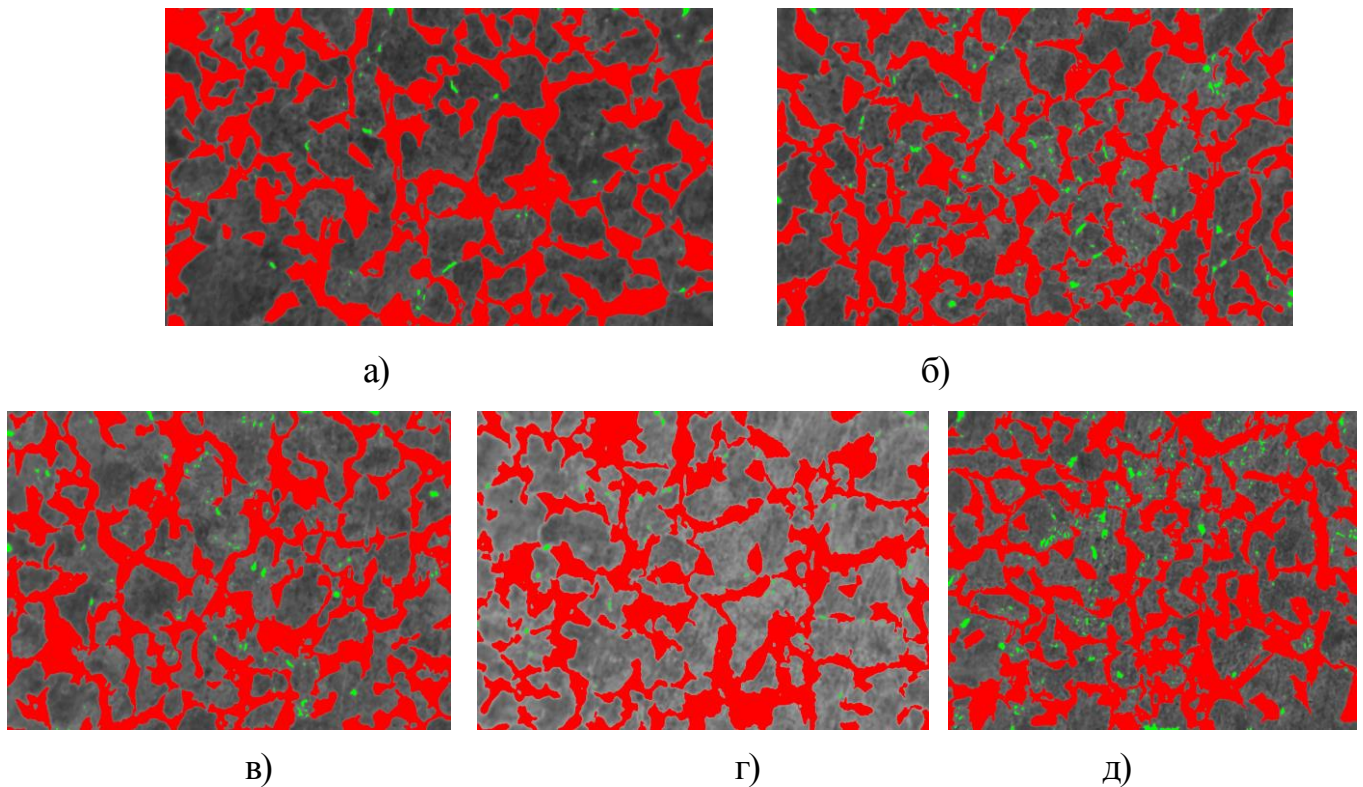


Рисунок 3.9 – Кількісний аналіз структурних елементів при витримці в теплоізолюючій суміші у полі зору №1 – концентрація надлишкового фериту 32,6751% (а); №2 – концентрація надлишкового фериту 33,5124% (б); №3 – концентрація надлишкового фериту 35,7860 % (в); №4 – концентрація надлишкового фериту 33,7661 % (г); №5 – концентрація надлишкового фериту 37,7756 % (д) ($\times 400$)

Крім того спостерігається загальне збільшення розмірів зерна у структурі наварених зразків після комбінованої методики відновлення, що сприяє зменшенню перешкод для руху дислокацій при роботі в умовах циклічного навантаження, а отже, підвищенню втомної міцності відновлених деталей.

Таким чином, загальна концентрація надлишкового фериту у навареному зразку після ТВЧ і витримці у теплоізолюючій суміші складає 33,5899% при мінімальній концентрації 28,4167% і максимальній – 37,7756% [290]. Одержані результати представлено на рис.3.10.

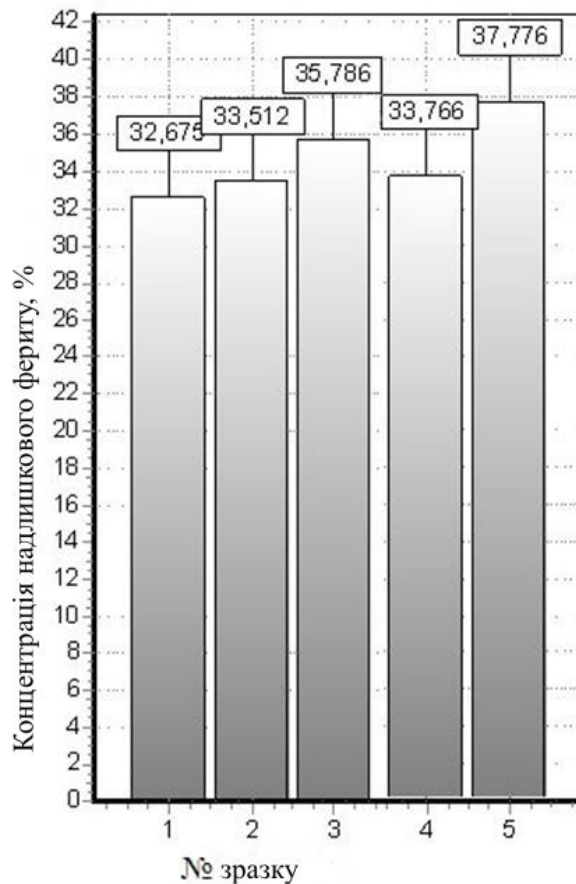


Рисунок 3.10 – Розподіл кількості надлишкового фериту у наварених зразках зі сталі 45 після ТВЧ і нормалізації у теплоізолюючій суміші

Середній вміст надлишкового фериту при охолодженні наварених електроконтактним методом зразків на повітрі в середньому на 4,7% нижче (рис.3.11), порівняно з охолодженням наварених зразків у теплоізолюючій суміші. Таким чином, загальна концентрація надлишкового фериту у навареному зразку після ТВЧ та охолодженні на повітрі складає 30,0077% при мінімальній концентрації надлишкового фериту у кількості 28,5952% і максимальній – 31,4373%. При цьому мінімальна концентрація надлишкового фериту у зразках після комбінованої технології відновлювання, що включає електроконтактне наварювання, локальну обробку струмами високої частоти та охолодження у теплоізолюючій суміші становить 32,675 %

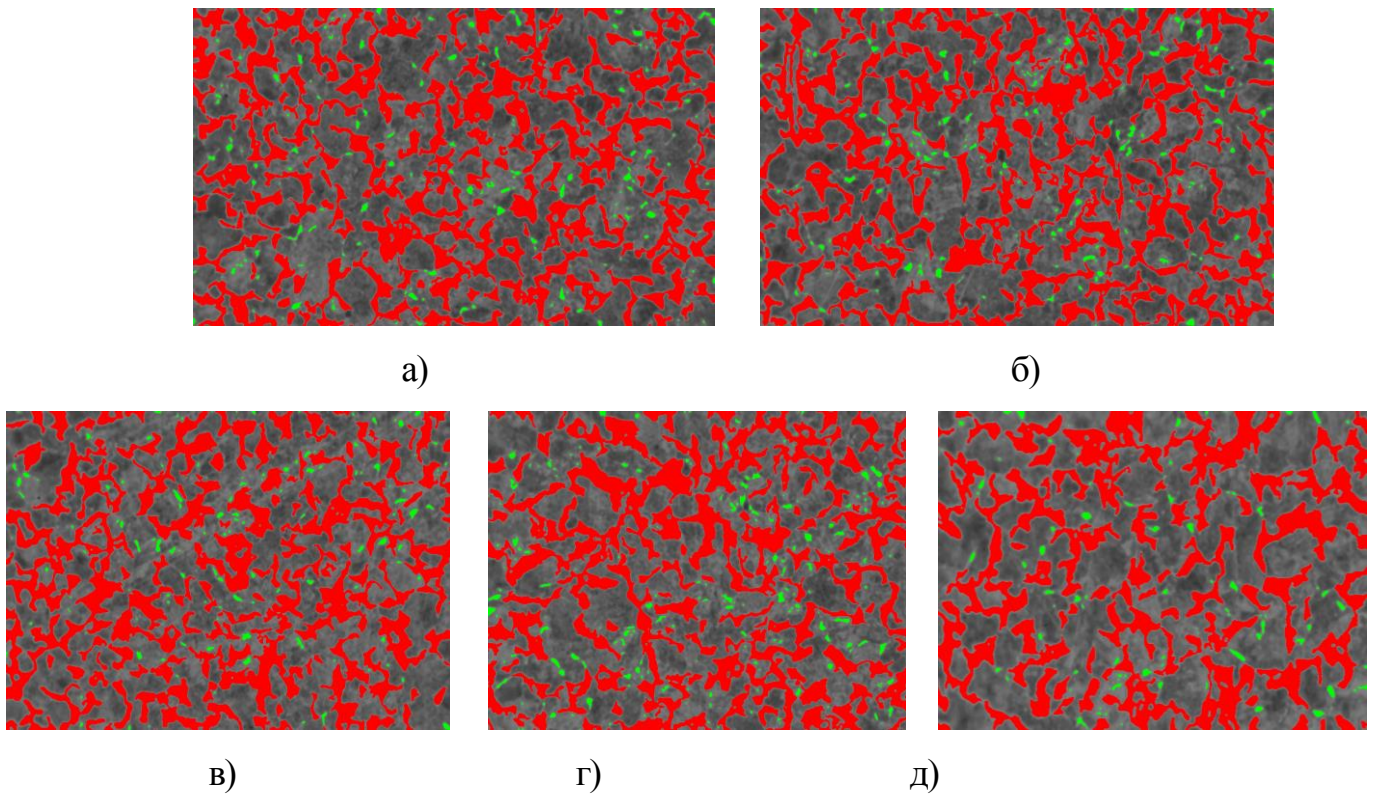


Рисунок 3.11 – Кількісний аналіз структурних елементів при охолодженні на повітрі у полі зору №1 – концентрація надлишкового фериту 28,8504 % (а); №2 – концентрація надлишкового фериту 29,9103 % (б); №3 – концентрація надлишкового фериту 31,2454 % (в); №4 – концентрація надлишкового фериту 31,4373 % (г); №5 – концентрація надлишкового фериту 28,5952 % (д) ($\times 400$)

Одержані результати розподілу кількості надлишкового фериту у наварених зразках після ТВЧ та охолодження на повітрі свідчать про зниження цього показника у 1,12 разів порівняно зі зразками після комбінованої технології відновлення (рис. 3.12). Така тенденція зберігається при кількісному металографічному аналізі всіх наварених зразків у різних полях зору (рис. 3.13). Як витікає з результатів вимірювань розмірів зерна, уповільнене охолодження при витримці у теплоізолюючій суміші також приводить до збільшення розмірів зерен.

Таке зміння розмірів зерен у структурі наварених електроконтактним методом зразків викликане тим, що дифузійне перетворення аустеніту в феритно-цементитну суміш при охолодженні у теплоізолюючій суміші протікає більш повільно та при більш високих температурах.

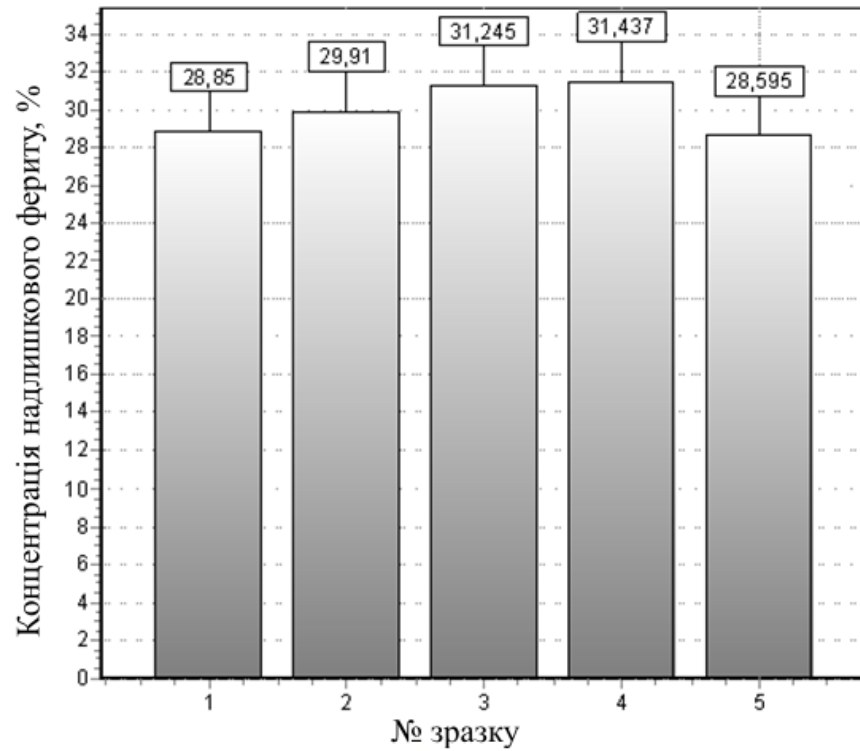


Рисунок 3.12 – Розподіл кількості надлишкового фериту у наварених зразках зі сталі 45 після ТВЧ і охолодження на повітрі

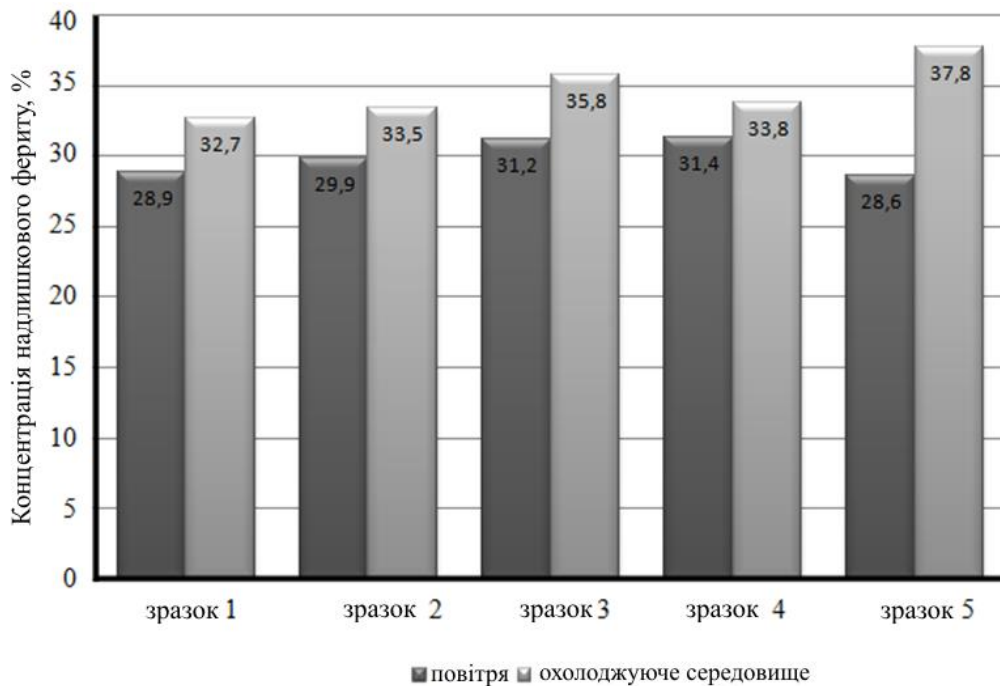


Рисунок 3.13 – Розподіл кількості надлишкового фериту у наварених зразках з сталі 45 після охолодження на повітрі та охолодженні у теплоізолюючій суміші

Згідно з результатами досліджень, середній розмір зерна структури навареного шару, який одержано при уповільненому охолодженні, на 11 мкм більше порівняно із зерном, отриманим при охолодженні наварених зразків на повітрі (табл. 3.3-3.6; рис.3.14-3.15).

При різних варіаціях за хімічним складом навареного та основного металу вибір режимів комбінованої обробки після електроконтактного наварювання слід здійснювати виходячи зі схильності матеріалів до концентрації напружень.

Таблиця 3.3

Показники розмірів зерна наварених зразків зі сталі 45 після ТВЧ
при охолодженні на повітрі

| № | Тип | Min | Max | Кількість | % |
|----|-----|----------|-----------|-----------|--------|
| 1 | -3 | 723,6010 | 1023,3270 | 0 | 0,000 |
| 2 | -2 | 511,6630 | 723,6010 | 0 | 0,000 |
| 3 | -1 | 361,8010 | 511,6630 | 0 | 0,000 |
| 4 | 0 | 255,8320 | 361,8010 | 0 | 0,000 |
| 5 | 1 | 180,9000 | 255,8320 | 0 | 0,000 |
| 6 | 2 | 127,9160 | 180,9000 | 0 | 0,000 |
| 7 | 3 | 90,4500 | 127,9160 | 0 | 0,000 |
| 8 | 4 | 63,9580 | 90,4500 | 0 | 0,000 |
| 9 | 5 | 45,2250 | 63,9580 | 0 | 0,000 |
| 10 | 6 | 31,9790 | 45,2250 | 0 | 0,000 |
| 11 | 7 | 22,6130 | 31,9790 | 3 | 5,000 |
| 12 | 8 | 15,9890 | 22,6130 | 13 | 21,667 |
| 13 | 9 | 11,3060 | 15,9890 | 29 | 48,333 |
| 14 | 10 | 7,9950 | 11,3060 | 13 | 21,667 |
| 15 | 11 | 5,6530 | 7,9950 | 2 | 3,333 |
| 16 | 12 | 3,9970 | 5,6530 | 0 | 0,000 |
| 17 | 13 | 2,8270 | 3,9970 | 0 | 0,000 |
| 18 | 14 | 1,9990 | 2,8270 | 0 | 0,000 |

Таблиця 3.4

Показники розмірів зерен наварених зразків зі сталі 45 після ТВЧ
при охолодженні на повітрі

| Параметр | Середнє | Відхилення | Мінімум | Максимум |
|--------------|---------|------------|---------|----------|
| Довжина, мкм | 14,25 | 0,52 | 7,16 | 25,55 |

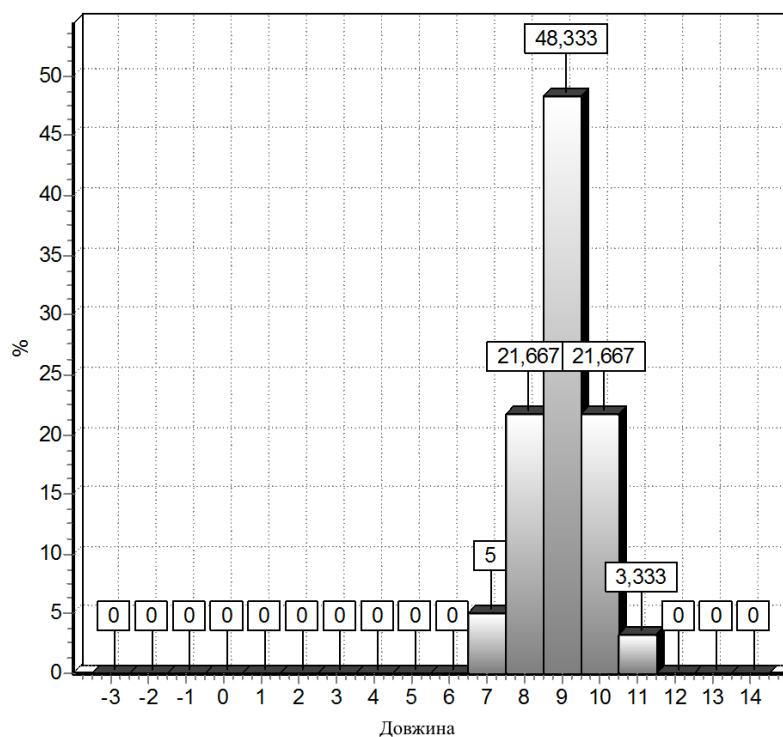


Рисунок 3.14 – Розподіл розмірів зерна наварених зразків зі сталі 45 після ТВЧ при охолодженні на повітрі

Таблиця 3.5

Показники розмірів зерен наварених зразків зі сталі 45 після ТВЧ та охолодження у теплоізолюючій суміші

| Параметр | Середнє | Відхилення | Мінімум | Максимум |
|--------------|---------|------------|---------|----------|
| Довжина, мкм | 25,21 | 0,85 | 11,92 | 51,48 |

Таблиця 3.6

Показники розмірів зерна наварених зразків зі сталі 45 після ТВЧ та охолодження у теплоізолюючій суміші

| № | Тип | Min | Max | Кількість | % |
|---|-----|----------|-----------|-----------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | -3 | 723,6010 | 1023,3270 | 0 | 0,000 |
| 2 | -2 | 511,6630 | 723,6010 | 0 | 0,000 |
| 3 | -1 | 361,8010 | 511,6630 | 0 | 0,000 |
| 4 | 0 | 255,8320 | 361,8010 | 0 | 0,000 |
| 5 | 1 | 180,9000 | 255,8320 | 0 | 0,000 |
| 6 | 2 | 127,9160 | 180,9000 | 0 | 0,000 |
| 7 | 3 | 90,4500 | 127,9160 | 0 | 0,000 |

Продовження таблиці 3.6

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|----|---------|---------|----|--------|
| 8 | 4 | 63,9580 | 90,4500 | 0 | 0,000 |
| 9 | 5 | 45,2250 | 63,9580 | 4 | 4,167 |
| 10 | 6 | 31,9790 | 45,2250 | 13 | 13,542 |
| 11 | 7 | 22,6130 | 31,9790 | 34 | 35,417 |
| 12 | 8 | 15,9890 | 22,6130 | 36 | 37,500 |
| 13 | 9 | 11,3060 | 15,9890 | 9 | 9,375 |
| 14 | 10 | 7,9950 | 11,3060 | 0 | 0,000 |
| 15 | 11 | 5,6530 | 7,9950 | 0 | 0,000 |
| 16 | 12 | 3,9970 | 5,6530 | 0 | 0,000 |
| 17 | 13 | 2,8270 | 3,9970 | 0 | 0,000 |
| 18 | 14 | 1,9990 | 2,8270 | 0 | 0,000 |

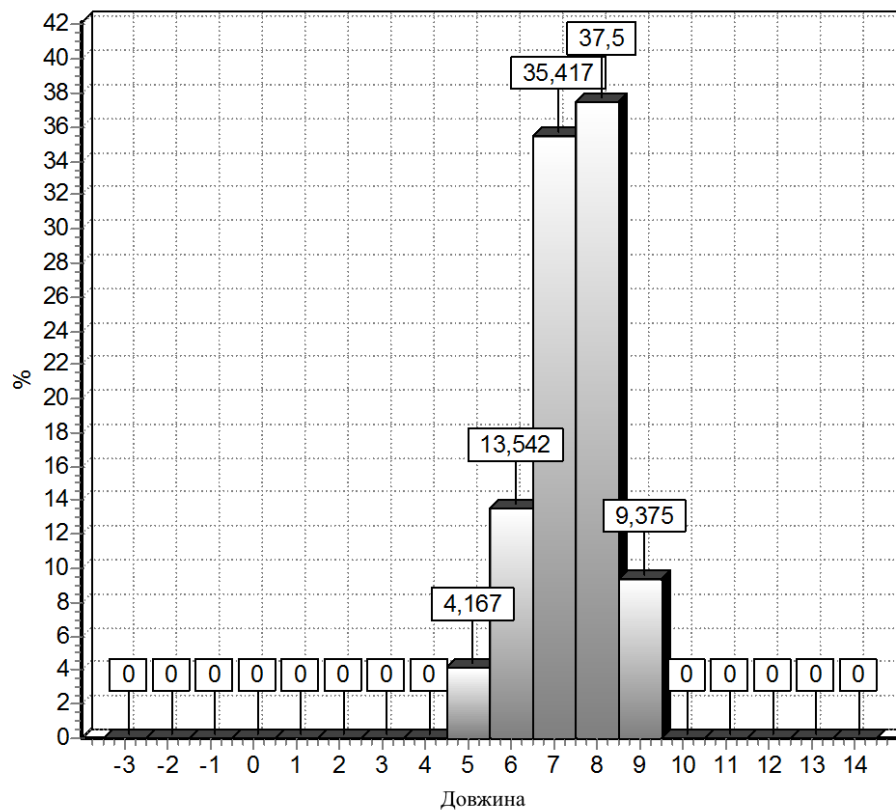


Рисунок 3.15 – Розподіл розмірів зерна наварених зразків зі сталі 45 після ТВЧ та охолодження у теплоізолюючій суміші

3.3. Дослідження впливу структури поверхневого шару на швидкість зростання тріщин і втомну міцність

Конструктивна міцність наварених електроконтактним методом деталей, тобто міцність в остаточно обробленому стані залежить від структури поверхневого шару [291, 290] (привареного покриття та зони термічного впливу), яка в широких межах може змінюватися термічною обробкою [275, 290]. Одержання необхідної міцності визначається тим, наскільки оптимальна отримана мікроструктура з точки зору опору діючим напруженням, в тому числі й залишковим напруженням, які впливають на втомну міцність. Сприятливі залишкові напруження можуть виникати в наварених деталях в результаті охолодження з підвищеною швидкістю. При цьому залишкові напруження стискування в поверхневих шарах знижують чутливість до концентрації напружень і тим самим збільшують втомну міцність. Залишкові напруження розтягування знижують втомну міцність, сприяють зародженню та розвитку тріщин втомлюваності, які зрештою приводять до руйнування. Оскільки при електроконтактному наварюванні виникає різна структура по перетину зразку, різними повинні виявлятися й міцність і чутливість до зниження втомної міцності через концентрацію напружень. Тому важливим є визначення структур, які утворюються при термообробці наварених валів із конструкційних сталей, схильних до зниження втомної міцності в умовах концентрації напружень, і встановлення на цій основі оптимальної структури нанесеного поверхневого шару.

Втомному ушкодженню передують ушкодження та розвиток тріщин і надалі відбувається крихке руйнування без видимих пластичних деформацій. Тому при виборі матеріалів для роботи в умовах циклічних навантажень, для вибору раціональної технології відновлення та зміцнення зношених виробів, велике значення мають не тільки характеристики стандартних механічних властивостей і межа витривалості, але й опір розвитку тріщин. Схильність до гальмування тріщин є однією з найважливіших характеристик металопокриття. Враховуючи, що зменшення швидкості зростання тріщин підвищує термін служби й надійність

відновлених деталей в експлуатації, оцінка ефективності конкретної технології є актуальною.

Теоретичний аналіз впливу структури поверхневого шару на швидкість зростання тріщин слід проводити з урахуванням сучасних уявлень про механізм зародження тріщин втомлюваності. Втомний процес в деталях і конструкціях завжди розпочинається й супроводжується виникненням і прогресивним розвитком тріщин втоми, однієї або декількох, у тих місцях цих елементів, у яких циклічні напруження досягають відповідно найбільших значень. Утворення втомних тріщин є наслідком появи та розвитку процесів пластичної деформації в мікрооб'ємах.

Використання в якості характеристики механічних властивостей показника швидкості зростання тріщин дозволяє визначити найбільш ефективну технологію відновлення зношених деталей відповідного призначення. Для цього необхідний не тільки якісний, але й кількісний аналіз процесу зростання втомних тріщин. Тривалість процесу руйнування, а також співвідношення між розміром тріщини й залишковою міцністю дають уявлення про живучість матеріалу та посередньо про схильність пошкодженої деталі до крихкого руйнування. При експериментальній оцінці швидкості зростання втомних тріщин вихідними даними є залежності між зміненням довжини тріщини й числом циклів прикладених навантажень. З виникненням у зразку тріщини після напружень вона зазнає істотної зміни: біля вершини тріщини виникає концентрація напружень. Для характеристики цього явища використовується параметр інтенсивності напружень K_1 , який відображає сумісний вплив прикладених навантажень і довжини тріщини на напружений стан біля вершини тріщини. Коефіцієнт K_1 відображає перерозподіл напружень у зразку внаслідок утворення тріщин і характеризує величину зусиль, які передаються крізь ділянку біля вершини тріщини.

Швидкість розповсюдження тріщин втоми досліджували на модельних зразках (рис.3.16) зі сталі 40 і 40Х, які імітували структурний стан поверхневого шару з визначеним вмістом пластичних фаз, регульованим комбінованою термічною обробкою.

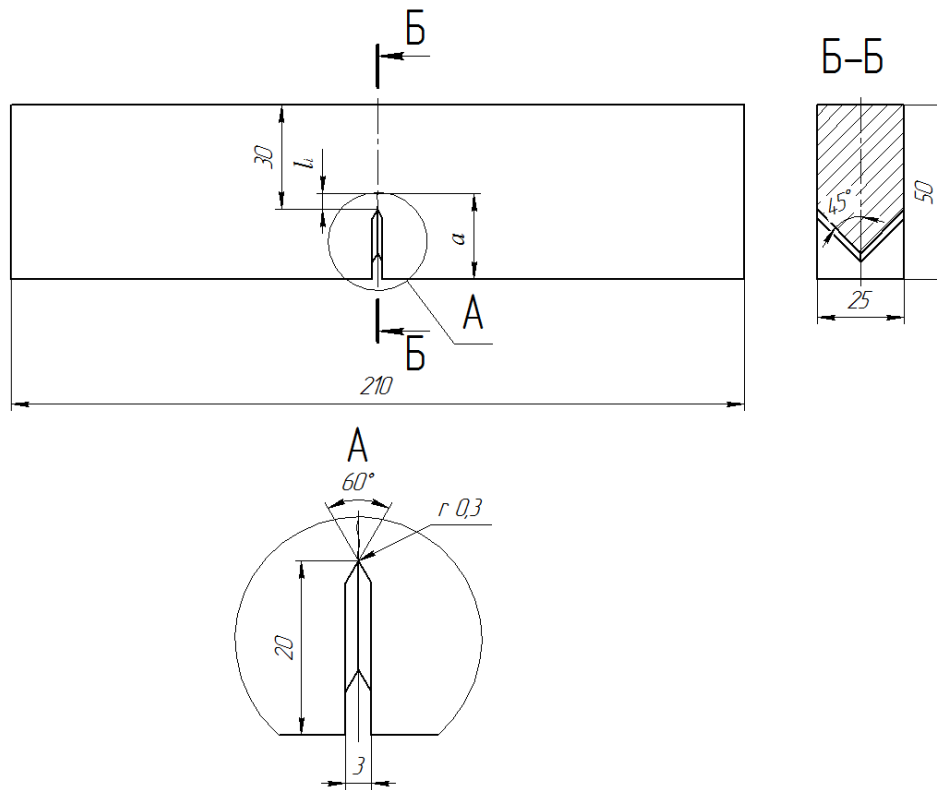


Рисунок 3.16 – Форма та розміри зразків для дослідження швидкості зростання втомної тріщини

Зразки зі сталі 40 згідно [290] нагрівали до температури 820...840°C, витримували при цій температурі і охолоджували в теплоізолюючій суміші або на повітря до повного охолодження [290]. Зразки зі сталі 40X нагрівали до температури 830...850°C, далі також слідувало охолодження у теплоізолюючій суміші або на повітрі [290].

Після термообробки заготовки стругали та шліфували до остаточних розмірів, а далі наносили надріз за допомогою спеціальної фрези. Було прийнято шевронний надріз, який виконувався фрезою, заточеною по радіусу 0,3 мм.

Застосований метод містить два етапи: утворення втомної тріщини, в процесі якого представляється можливим виміряти швидкість зростання тріщини, й розповсюдження тріщини до руйнування зразку під дією прикладених статичних сил.

Сутність випробування полягає в тому, що модельний зразок навантажують згинаючими та розтягуючими зусиллями, в якому від надрізу, нанесеного механічною обробкою, попередньо утворюється втомна тріщина. В процесі зростання трі-

щини визначається швидкість її розвитку, що потребує змінення числа циклів і умов навантаження при проходженні тріщиною певних відстаней.

Перед випробуванням зразки по площині надрізу полірували, як металографічний шліф. Біля вершини надрізу, приблизно через кожні 0,9...1,0 мм гострою рисувалкою проводили риски перпендикулярно припустимому ходу тріщин (рис. 3.17-3.18). Втомна тріщина утворювалась від надрізу. Дослідження проводили на гідравлічній машині МУП-50 з пульсатором, який забезпечує максимальне навантаження в 0,25 МН.



а)



б)



в)

Рисунок 3.17 – Підготовка зразку до випробувань на деформацію вигину: технологічне оснащення для розмічення (а); зразок в зборі (б); шліфований зразок із нанесеним надрізом (в)



Рисунок 3.18 – Зразок, підготовлений до випробувань, із нанесеною розміткою

Схема навантаження – зосереджене навантаження, утворююче деформацію вигину у зразку (рис.3.19).



Рисунок 3.19 – Встановлення зразку для випробувань на деформацію вигину

Зразки встановлювали на спеціальному опорному пристосуванні з роликками, які вільно обертаються в опорах відносно центрів. Це дозволило до мінімуму звести втрати на тертя в процесі випробувань. Діаметр опорних роликків – 25 мм. При випробуванні опорні ролики рівновіддаляли від осі прикладення навантаження (в площині надрізу) з точністю до ± 1 мм.

Зразки встановлювали так, щоби площина була паралельною осі роликків. Непаралельність не перевищували 2° (рис.3.20).

Після встановлення зразку прикладали навантаження відповідно до рекомендованої методики роботи на машині МУП-50. Мінімальне навантаження намагалися обирати таким чином, щоби воно складало біля 10% від максимального значення. Коефіцієнт асиметрії складав 0,1. Випробування проводили при частоті прикладення навантаження 11 Гц.

Через кожні 10 хв. роботи вивчали за допомогою мікроскопу МБ-2 (лупи Бриннеля) ($\times 24$) (рис.3.21) бокову поверхню зразку в зоні передбачуваної траєкторії крихкої тріщини. Після з'явлення тріщини її довжину вимірювали через рівні проміжки часу (5...10хв) за допомогою того ж мікроскопу з точністю до 0,01 мм.



Рисунок 3.20 – Зразок, встановлений на опорному пристосуванні



Рисунок 3.21 – Вимірювання довжини втомної тріщини в процесі навантаження

Після збільшення тріщини навантаження зменшували. Випробування продовжували до одержання тріщини довжиною 3,0...4,0 мм, після чого випробування припиняли, зразок із випробувальної машини виймали (рис. 3.22).

Змінні навантаження та довжина тріщин, згідно [290], узагальнюються одним параметром ΔK – зміненням інтенсивності напруження за цикл навантаження. Зале-

жність між швидкістю зростання тріщин і фактором інтенсивності напружень виражається рівнянням:

$$\Delta K = \frac{3 \cdot \Delta P \cdot L}{b \cdot w^{3/2}} \left[1,93 \left(\frac{l_i}{b} \right)^{1/2} - 3,07 \left(\frac{l_i}{b} \right)^{3/2} + 14,53 \left(\frac{l_i}{b} \right)^{5/2} - 25,11 \left(\frac{l_i}{b} \right)^{7/2} + 25,8 \left(\frac{l_i}{b} \right)^{9/2} \right], \quad (3.74)$$

де L – відстань між опорами, $L=200$ мм;

l_i – поточна сумарна довжина тріщини з надрізом;

b, w – висота й товщина зразку, відповідно (див. рис. 3.16);

ΔP визначається за формулою:

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}, \quad (3.75)$$

де P_{\max} – максимальне навантаження, прикладене до зразку в даний момент;

P_{\min} – відповідно мінімальне навантаження.



Рисунок 3.22 – Загальний вид тріщини в модельному зразку

За експериментальними даними визначали прирощення тріщини da за дане число циклів dN . Швидкість зростання тріщини визначали за співвідношенням da/dN . За результатами випробувань двох зразків з одного матеріалу встановлювали

залежність швидкості зростання тріщин da/dN від ΔK . В подвійних логарифмічних координатах, шляхом обробки даних за методом найменших квадратів одержали рівняння типу:

$$\frac{da}{dN} = C_0 \Delta K^n, \quad (3.76)$$

де C_0 , n – постійні інтегралу.

Для обчислення коефіцієнтів рівняння (3.76) приведено до лінійного виду:

$$y = a \cdot x + b, \quad (3.77)$$

де $x = \lg \Delta K$, $y = \lg \frac{da}{dN}$.

Для обчислення коефіцієнтів регресії використано функцію «ЛІНЕЙН» у MS Excel. Підставивши одержані значення коефіцієнтів у лінійне рівняння (3.77) отримаємо:

$$y = 1,183 \cdot x - 6,21 \quad (3.78)$$

або

$$\lg \frac{da}{dN} = 1,183 \cdot \lg(\Delta K) - 6,21. \quad (3.79)$$

Потенціюючи, матимемо:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-6,177} \cdot (\Delta K)^{1.183} \quad (3.80)$$

або

$$\frac{da}{dN} = 0,677 \cdot 10^{-6} \cdot (\Delta K)^{1.183} \quad (3.81)$$

Одержане рівняння (3.81) характеризує швидкість зростання тріщин в томи в залежності від зміни коефіцієнту інтенсивності напружень при циклічному навантаженні сталі 40, охолодженої після відпалу у теплоізолюючій суміші.

Виконавши розрахунки за вказаними вище формулами, аналогічно тому, як це було зроблено для сталі 40, маємо:

$$y = 2,957 \cdot x - 9,14 \quad (3.82)$$

або

$$\lg \frac{da}{dN} = 2,957 \cdot \lg(\Delta K) - 9,14 \quad (3.83)$$

Потенціюючи, матимемо:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-10,65} \cdot (\Delta K)^{2,957} \quad (3.84)$$

або

$$\frac{da}{dN} = 7,18 \cdot 10^{-10} \cdot (\Delta K)^{2,957} \quad (3.85)$$

Одержане рівняння (3.85) характеризує швидкість зростання тріщин втоми в залежності від змінення коефіцієнту інтенсивності напруження при циклічному навантаженні зразків зі сталі 40X, охолодженої після відпалу у теплоізолюючій суміші. Результати експериментальних досліджень і відповідних розрахунків приведені в табл. 3.7 і 3.8.

Таблиця 3.7

Експериментальні дані та елементи розрахунку швидкості зростання тріщин втоми в модельних зразках зі сталі 40, охолоджених після відпалу у теплоізолюючій суміші

| № зразку | ΔK | da , мм | dN , цикл. | $\frac{da}{dN}$, мм/цикл | $\lg(\Delta K)$ | $\lg \frac{da}{dN}$ | l_i , мм |
|----------|------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------------|---------------------|------------|
| 1 | 26,938387 | 0,6 | 18000 | 0,000033 | 1,4303 | -4,4771 | 23,6 |
| | 28,1344427 | 0,7 | 28000 | 0,000025 | 1,4492 | -4,6021 | 24,3 |
| 2 | 85,40154 | 2,3 | 20000 | 0,000115 | 1,9314 | -3,9393 | 25,3 |
| | 35,063007 | 0,4 | 8000 | 0,00005 | 1,5448 | -4,301 | 25,7 |

Таблиця 3.8

Експериментальні дані та елементи розрахунку швидкості зростання тріщин втоми в модельних зразках зі сталі 40X, охолоджених після відпалу у теплоізолюючій суміші

| № зразку | ΔK | da , мм | dN , цикл. | $\frac{da}{dN}$, мм/цикл | $\lg(\Delta K)$ | $\lg \frac{da}{dN}$ | l_i , мм |
|----------|------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------------|---------------------|------------|
| 1 | 58,087932 | 2 | 21000 | 0,0000952 | 1,76408592 | -4,0212 | 30 |
| | 48,462428 | 1 | 9000 | 0,00011111 | 1,68540517 | -3,9542 | 31 |
| 2 | 39,605972 | 1 | 42000 | 0,00002381 | 1,59776068 | -4,6232 | 30 |
| | 37,060051 | 1 | 26000 | 0,0000385 | 1,56890601 | -4,4150 | 31 |

Для зразків зі сталі 40, охолоджених після термообробки на повітрі, одержано наступне рівняння:

$$y = 1,25 \cdot x - 6,35 \quad (3.86)$$

або

$$\lg \frac{da}{dN} = 1,25 \cdot \lg(\Delta K) - 6,35. \quad (3.87)$$

Потенціюючи, матимемо:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-6.35} \cdot (\Delta K)^{1.25} \quad (3.88)$$

або

$$\frac{da}{dN} = 0,45 \cdot 10^{-8} \cdot (\Delta K)^{1.25}. \quad (3.89)$$

Аналогічно для зразків зі сталі 40X, які пройшли термообробку з охолодженням на повітрі:

$$y = 3,23 \cdot x - 9,65 \quad (3.90)$$

або

$$\lg \frac{da}{dN} = 3,23 \cdot \lg(\Delta K) - 9,65. \quad (3.91)$$

Потенціюючи, матимемо:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-9.74} \cdot (\Delta K)^{3.23} \quad (3.92)$$

або

$$\frac{da}{dN} = 0,22 \cdot 10^{-11} \cdot (\Delta K)^{3,23}. \quad (3.93)$$

З використанням аналогічної методики розрахунку були одержані дані для зразків зі сталей 40 і 40Х, які пройшли термообробку з охолодженням на повітрі (табл. 3.9-3.10).

Таблиця 3.9

Експериментальні дані й елементи розрахунку швидкості зростання тріщин втоми в модельних зразках зі сталі 40, охолоджених з температури відпалу на повітрі

| № зразку | ΔK | da , мм | dN , цикл. | $\frac{da}{dN}$, мм/цикл | $\lg(\Delta K)$ | $\lg \frac{da}{dN}$ | l_i , мм |
|----------|------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------------|---------------------|------------|
| 1 | 26,564848 | 0,5 | 20000 | 0,000025 | 1,42430734 | -4,602 | 23,6 |
| | 24,659494 | 0,7 | 38000 | 0,0000018 | 1,39198416 | -4,735 | 24,3 |
| 2 | 88,67684 | 2,3 | 20000 | 0,000115 | 1,94781021 | -3,939 | 25,3 |
| | 30,23422 | 0,4 | 8000 | 0,00005 | 1,48049877 | -4,30103 | 25,7 |

Таблиця 3.10

Експериментальні дані й елементи розрахунку швидкості зростання тріщин втоми в модельних зразках зі сталі 40Х, охолоджених з температури відпалу на повітрі

| № зразку | ΔK | da , мм | dN , цикл. | $\frac{da}{dN}$, мм/цикл | $\lg(\Delta K)$ | $\lg \frac{da}{dN}$ | l_i , мм |
|----------|------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------------|---------------------|------------|
| 1 | 58,087932 | 2 | 22000 | 0,00009090 | 1,76408592 | -4,0414 | 30 |
| | 48,462428 | 1 | 9000 | 0,0001111 | 1,68540517 | -3,9542 | 31 |
| 2 | 42,5684 | 1 | 42000 | 0,000002381 | 1,62908733 | -4,623 | 30 |
| | 39,6875 | 1 | 26000 | 0,000038 | 1,59865374 | -4,415 | 31 |

Експериментальні дані свідчать про більш високу швидкість зростання тріщин у модельних зразках зі сталі 40Х, ніж у зразках зі сталі 40. Причому, зі збі-

льшенням інтенсивності прикладених напружень крива $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$ зростає швидше для модельних зразків зі сталі 40X, ніж для зразків зі сталі 40 (рис. 3.23).

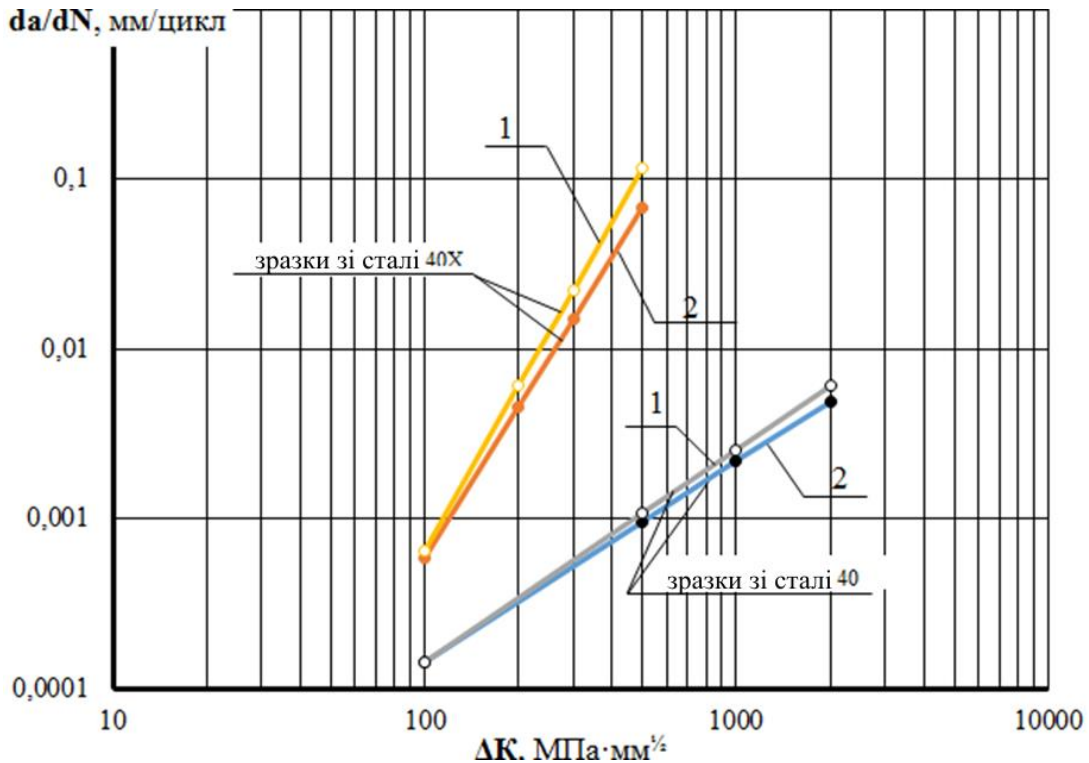


Рисунок 3.23 – Залежність швидкості зростання втомних тріщин від зміни коефіцієнту інтенсивності напружень при охолодженні зразків на повітрі (1) та при охолодженні у теплоізолюючій суміші (2)

Охолодження зразків у теплоізолюючій суміші дозволяє знизити швидкість зростання тріщин як у зразках зі сталі 40, так і у зразках зі сталі 40X [291].

Згідно отриманих даних у сталі 40X після термообробки спостерігається більший обсяг перліту, ніж у сталях 40. Причому, вміст перліту знижується в залежності від способу охолодження після відпалу: при охолодженні у теплоізолюючій суміші кількість фериту вища, ніж при охолодженні на повітрі. Отже, швидкість зростання втомних тріщин залежить від об'ємного вмісту в структурі надлишкових пластичних фаз: чим більше в структурі пластичного фериту, тим повільніше зростають тріщини. Навпаки, збільшення об'ємного вмісту перліту підвищує швидкість зрос-

тання тріщин. Спостережувана відмінність у швидкості зростання втомних тріщин у сталях із ферито-перлітною структурою з різним вмістом перліту пояснюється загальними закономірностями, що стосуються опору зародженню тріщин і чутливості до концентрації напружень.

Випробуваннями на втому (витривалість) визначали стійкість покриттів до дії змінних навантажень при скручуванні та вигині, а також оцінювали опірність руйнуванню в процесі накопичення пошкоджень в металі або зоні наварювання під дією знакозмінного навантаження за заданий проміжок часу. Втомні випробування проводили на машині МУІ-6000 (рис.3.24).



Рисунок 3.24 – Наварений зразок, закріплений у затискачах машини МУІ-6000

Машина МУІ-6000 призначена для проведення випробувань зразків з металу та його сплавів (рис.3.25), що піддаються дії повторно-змінних навантажень при чистому вигині зразку, який обертається, зі встановленням втомної міцності різних сортів металів.



Рисунок 3.25 – Наварений зразок для випробувань на втомну міцність

Спосіб навантажування здійснювали за принципом сталості заданої величини навантаження зразку протягом всього часу випробувань [292]. При цьому режим змінення напруження в досліджуваному зразку відбувався за симетричним циклом.

Випробування проводили на базі 10^6 циклів. Базу випробувань, тобто кількість циклів, при якій визначається границя витривалості, розраховували за формулою:

$$N = 60t \cdot n , \quad (3.94)$$

де t – тривалість випробування з моменту навантаження до моменту руйнування або до моменту припинення випробувань;

n – номінальна кількість обертів за хвилину випробуваного зразку.

Границю витривалості зразку визначали за формулою:

$$\sum q = \frac{M}{W} = \frac{32Pl}{\pi d^2} , \quad (3.95)$$

де M – згинальний момент, постійний вздовж усієї робочої поверхні зразку;

W – момент опору перетину зразку;

l – відстань від точки прикладення навантаження до найближчої опори;

d – діаметр зразку;

P – навантаження, прикладене до досліджуваного навареного зразку, яке визначається за формулою:

$$P = 0,5Q , \quad (3.96)$$

Q – навантаження.

Результати випробувань наварених електроконтактним методом на втомну міцність представлені на рис.3.26.

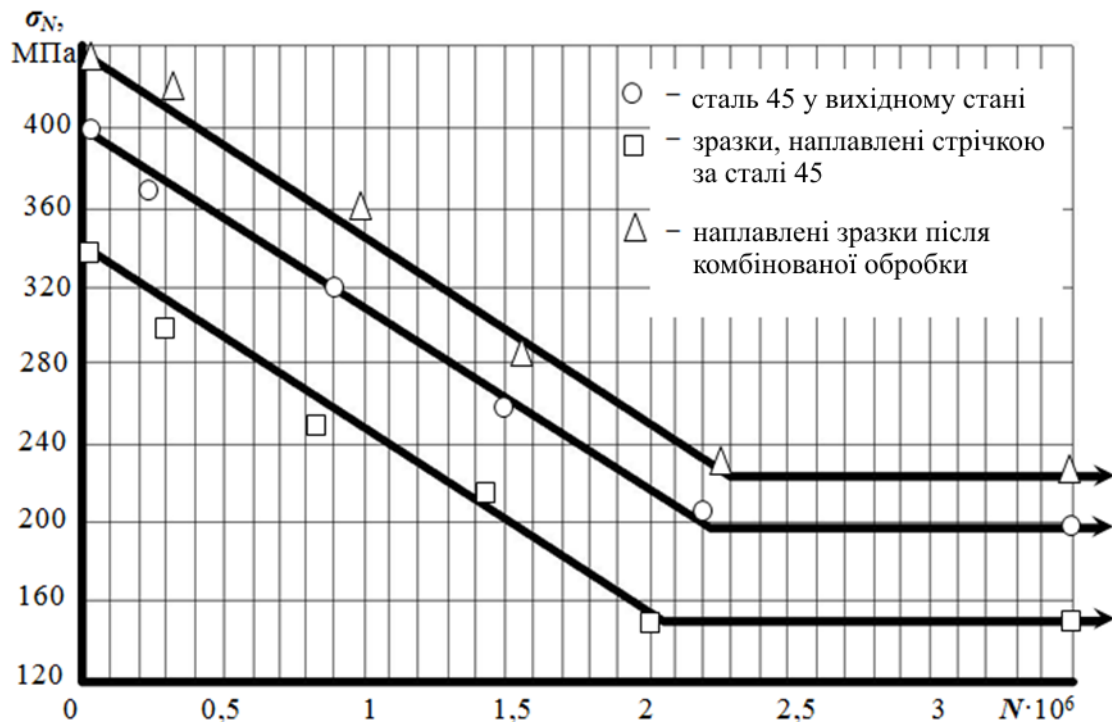


Рисунок 3.26 – Результати втомних випробувань

Результати експериментального дослідження втомної міцності сталевих зразків у вихідному стані та зразків, відновлених за стандартною технологією електроконтактного наварювання та технологією комбінованої обробки, свідчать про підвищення втомної міцності відновлених комбінованим методом зразків на 17% порівняно зі зразками зі сталі 45 у вихідному стані та на 41% порівняно зі зразками, навареними стрічкою зі сталі 45.

Дослідження швидкості зростання тріщин та втомної міцності наварених зразків підтверджують ефективність запропонованої комбінованої технології відновлення деталей типу «вал», які працюють в умовах циклічних навантажень. Застосування комбінованої обробки дозволить значно підвищити ресурс роботи деталей, вузлів та обладнання в цілому, а також зменшити енерго- та ресурсовитрати при загальному зниженні часу ремонтного простоювання машин.

Висновки до розділу 3

3. Проведені дослідження дозволили запропонувати режим індукційного нагріву, який забезпечує необхідні значення температури на поверхні та на заданій глибині прогрітого шару при нормалізації відновлених циліндричних деталей.

4. Аналітичне вирішення задачі показало, що зі збільшенням діаметру деталі понад 50 мм залежність температури у межах нагрітого шару наближується до лінійної, а запропонований режим при постійній питомій потужності є проміжним між гартувальним та наскрізним нагрівом.

5. Приведенні співвідношення дозволяють визначити основні параметри нагріву: питому потужність, частоту та час прогріву, що забезпечує розрахунок індуктора для нормалізації відновлених поверхонь циліндричних деталей.

6. Застосування розробленої комбінованої технології відновлення валів, що працюють при циклічному навантаженні (електроконтактне наварювання з наступним локальним нагрівом ТВЧ до 900°C та уповільненим охолодженням у теплоізолюючій суміші – 8-12% шарувате з'єднання графіту з коефіцієнтом терморозширення 150-170 см³/г при температурі 200-250°C, решта – графіт ГЛ1) забезпечує зниження швидкості охолодження від температури аустенізації до початку перлітного перетворення і підвищення середнього вмісту надлишкового фериту на 4,7% при збільшенні розміру зерна в середньому на 11мкм. Для деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження, така структура є найменш чутливою до концентрації напружень: швидкість зростання втомної тріщини знижується на 15,8-17,3%, а втомна міцність наварених зразків підвищується на 17% зі 198МПа до 232 МПа.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОДНИХ СТРІЧОК НА СТРУКТУРУ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ НАВАРЕНОГО ШАРУ

4.1. Вибір способу попередньої обробки електродних стрічок

Досягнення високої якості та експлуатаційної надійності машин, а також їх більш низької собівартості, є необхідною умовою забезпечення високого й стійкого рівня ринкової конкурентоспроможності та можливе лише на основі застосування прогресивних наукоємних технологій. Одним з таких напрямків є використання функціональних покриттів на поверхні зношуваних деталей машин. Поширеним та ефективним способом нанесення функціональних покриттів є електроконтактне наварювання порошкових дротів, конструкція яких дозволяє поєднувати матеріали різних класів з різними фізико-механічними властивостями [293, 294] та створювати покриття, що характеризуються високими експлуатаційними характеристиками, які неможливо одержати при застосуванні традиційних електродних матеріалів (наприклад, висока твердість та пластичність одночасно). Проте, застосування порошкових дротів має ряд недоліків, серед яких: невелика площа контакту відновлюваної поверхні з матеріалом, що приварюється; необхідність забезпечення потрібного рівня деформації для одержання заданої форми, ширини та товщини навареного шару; складність забезпечення належного контакту та зварюваності між суміжними витками навареного шару при електроконтактному наварюванні по гвинтовій лінії; низька ступінь та нерівномірність ущільнення шихти осередку порошкового дроту, що пов'язане зі складними процесами перерозподілу часток порошкоподібної шихти під дією зусилля на ролику-електроді електроконтактної машини; складність виготовлення порошкових дротів через порушення цілісності більш м'якої оболонки твердими ту-

гоплавкими частками осколкової форми в процесі ущільнення порошку при обробці тиском [295].

Для забезпечення зносостійких властивостей наварених шарів можуть використовуватися різні методи хіміко-термічної обробки [169, 170, 172]. Стосовно до виробничих умов більшості підприємств найбільший інтерес представляють процеси, які протікають в умовах нагріву у звичайних камерних печах з окислювальною атмосферою без використання спеціального обладнання та пристроїв. При цьому доцільне застосування дифузійних середовищ, які разом із хіміко-термічною обробкою забезпечують і захист поверхневих шарів від окислення та знеуглецьовування. У випадку деталей, що працюють у парах тертя або в контакті з абразивним матеріалом, коли має місце переважно зношування їх поверхневих шарів, найбільше раціональне застосування сумішей для отримання дифузійних шарів на основі високотвердих фаз. Такі дифузійні шари формуються у результаті хіміко-термічної обробки з використанням в якості насичувальних компонентів хімічних елементів у системі бор, азот, вуглець, силіцій [296].

Зносостійкість відновленої поверхні деталей та інструменту обумовлюється структурою привареного матеріалу, яка містить дифузійні шари, одержані попередньою хіміко-термічною обробкою електродної стрічки [10], що дозволяє забезпечити у покритті широкий спектр властивостей, який складно одержати у відомих конструкційних матеріалах. Так, попередня комплексна хіміко-термічна обробка сприяє створенню в електродному матеріалі такого сполучення характеристик, як висока твердість, низька схильність до тріщиноутворення та висока зносостійкість [297]. Комплексний аналіз впливу вказаних характеристик дозволить у повній мірі оцінити якість відновленої поверхні, а також відповідність її функціональних властивостей вимогам, що пред'являються до деталей і вузлів машин, які працюють в умовах інтенсивного зношування [298].

Попередній хіміко-термічній обробці у порошкових сумішах піддавали низьковуглецеві сталеві стрічки 08кп (ГОСТ 503-81) товщиною 0,5 мм. Хіміко-термічне насичування проводили при температурі 1000°C у порошкових сумішах зі змінним вмістом компонентів у контейнерах з алітованої сталі, що забезпечує одержання ди-

фузійного шару в електродному матеріалі глибиною 280 мкм. Герметизацію контейнерів здійснювали за допомогою плавкого затвору з подрібненого скла, після чого контейнер розташовували у печі, нагрітій до температури 1000 °С, не допускаючи струшування та відхилення від горизонтального положення, що сприяє одержанню рівномірного по товщині поверхневого шару, а також забезпечує герметичність контейнера. Витримка у печі складає 5 г, після чого контейнер охолоджували з піччю.

При попередній хіміко-термічній підготовці забезпечували односторонній захист електродної стрічки за рахунок застосування захисного покриття, одержаного згідно з рекомендаціями [299]. Змішували протягом 15-20 хв. в лабораторній мішалці типу LST наступні вихідні інгредієнти: буре вугілля 14 мас.%, лігносульфонат технічний 7 мас.%. Наступним етапом домішували ізопропиловий спирт 49 мас.% і воду 30 мас.%. Перемішування продовжували протягом ще 20 хв. до одержання однорідної дисперсної суспензії. За допомогою розпилювача дану суспензію наносили на попередньо очищено до металевого блиску електродну стрічку марки 08кп, що дозволяє знизити витрати суспензії, але і одержати захисний шар необхідної товщини. Протягом 25-60с вода та ізопропиловий спирт випаровуються, а на поверхні стрічки утворюється шар, товщина якого регулювалася протягом експерименту від 10 до 50 мкм. Одержаний захисний шар має високу зчіплюємість з поверхнею очищеної стрічки.

Протягом п'ятигодинної обробки при температурі 1000°С в результаті конденсаційних та полімерізаційних процесів відбувається формування захисного покриття з високою (до 2000°С) термостійкістю. Після охолодження контейнеру при вилученні оброблених сталевих стрічок захисне покриття легко видаляється з поверхні ганчір'ям. Це пов'язане з тим, що захисний шар під дією високих температури стає рихлим і легко відшаровується навіть під незначною зовнішньою дією. При цьому перед подальшим наварюванням не має необхідності у спеціальному очищенні поверхні підготовленої стрічки. Ефективність захисту поверхні електродної стрічки досліджували залежно від товщини захисного покриття (рис.4.1).

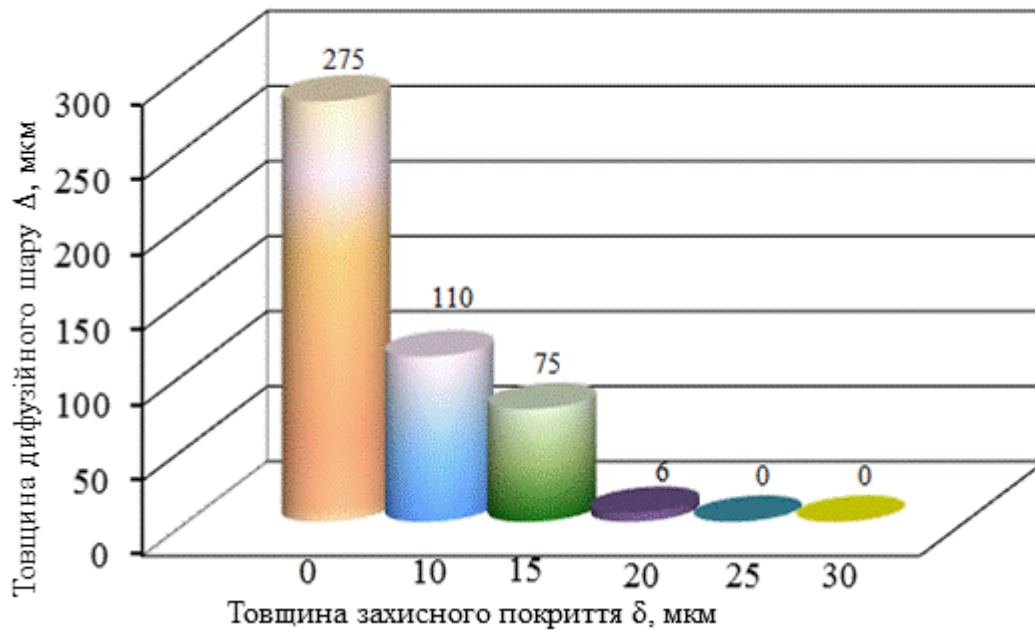


Рисунок 4.1 – Залежність товщини дифузійного шару на поверхні електродної стрічки від товщини захисного покриття

Таким чином, створення на поверхні електродної стрічки захисного покриття товщиною 25-30 мкм є достатнім і мінімально необхідним для забезпечення ефективного захисту. Застосування захисного покриття товщиною менше 25 мкм не дозволяє провести якісний односторонній захист сталеві стрічки. Крім того на ефективність захисного покриття впливає його суцільність, яка характеризує наявність або відсутність у ньому дефектів.

Для якісного визначення суцільності покриття на випробувану поверхню стрічки з захисним покриттям поміщали згідно з [300] фільтрувальний папір, змочений водним розчином, якій містить залозисто-синьородистий калій (40 г/л) і хлористий натрій (15 г/л). За наявності пор, патьоків та інших дефектів, відсутності суцільності покриття через 2 хв. з'являється синє фарбування. Виходячи зі співвідношення площ суцільність визначають за виразом [301]:

$$\Delta F = \frac{F_{\Pi} - F_{\Phi}}{F_{\Pi}}, \quad (4.1)$$

де F_{Π} – площа покриття;

F_{ϕ} – площа фарбованих ділянок.

При $\Delta F \rightarrow 1$ суцільність покриття є максимальною.

У випадку неякісного одностороннього захисту стрічки спостерігається часткова дифузія елементів насичувальної суміші в електродний матеріал з утворенням шару, товщина якого в декілька разів менша товщини дифузійного шару, що утворюється з незахищеного боку стрічки (рис.4.2). Мікроструктуру навареного матеріалу та глибину дифузійних шарів досліджували з використанням мікроскопу МІМ-8М, застосовували хімічне та теплове травлення мікрошліфів.

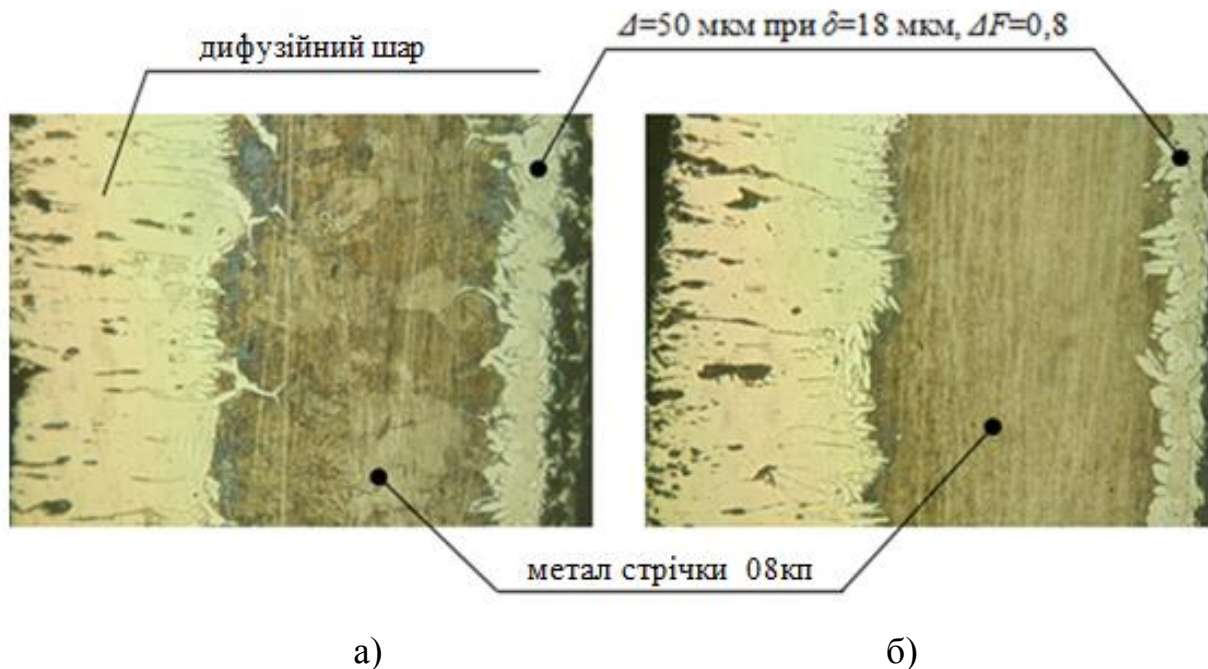


Рисунок 4.2 – Мікроструктура електродних матеріалів, одержаних при насичуванні стрічки зі сталі 08кп з неякісним одностороннім захистом ($\times 100$)

Електроконтактне наварювання підготовлених електродних стрічок проводили на різні види матеріалів (Ст3, титан, У8, 65Г) на наступних режимах: зусилля – $P = 1,5 \dots 2$ кН; струм наварювання – $I_{\text{н}} = 6,0 \dots 7,0$ кА; тривалість імпульсу струму – $t_{\text{имп}} = 0,06 \dots 0,07$ с. Перед електроконтактним наварюванням стрічки з одностороннім захистом подавали в зону наварювання таким чином, щоб у контакті з поверхнею зразка знаходився захищений бік стрічки.

При електроконтактному наварюванні на зразки зі сталі Ст3 електродних стрічок з неякісним одностороннім захистом спостерігається утворення дефекту несплавлення (рис.4.3, а, в) з частковим переплавленням дифузійного шару та неконтрольованим переходом його складових до феритного прошарку електродного матеріалу, а також у основний метал виробу з виникненням окремих ділянок підвищеної легованості, які мають евтектичну структуру (рис.4.3, а).

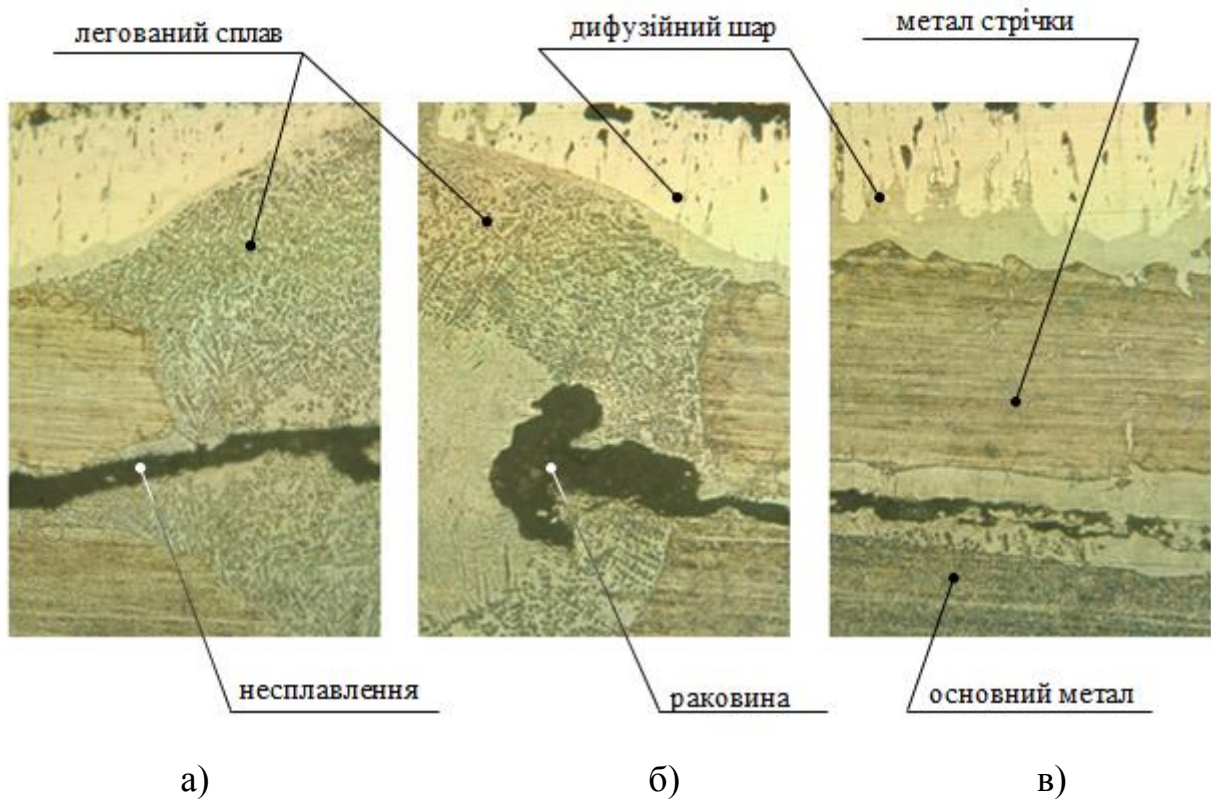


Рисунок 4.3 – Мікроструктура навареного шару, зони приварювання та основного металу після електроконтактного наварювання на зразки зі сталі Ст3 стрічок з неякісним одностороннім захистом ($\times 100$)

Крім того відбувається утворення раковин (рис.4.3, б), а також викришування ділянок дифузійного шару (див. рис.4.3, б, в). У деяких ділянках утворюється лита зона з повним переплавленням дифузійного шару (див. рис.4.3, а, б), причому вона представляє собою легований компонентами дифузійного шару сплав і по глибині займає 2/3 товщини електродної стрічки з переходом у основний метал.

Електроконтактне наварювання на зразки з титану електродних стрічок з неякісним одностороннім захистом приводить до утворення зони приварювання без розплавлення дифузійного шару в зоні контакту електродного матеріалу та поверхні зразку (рис.4.4).

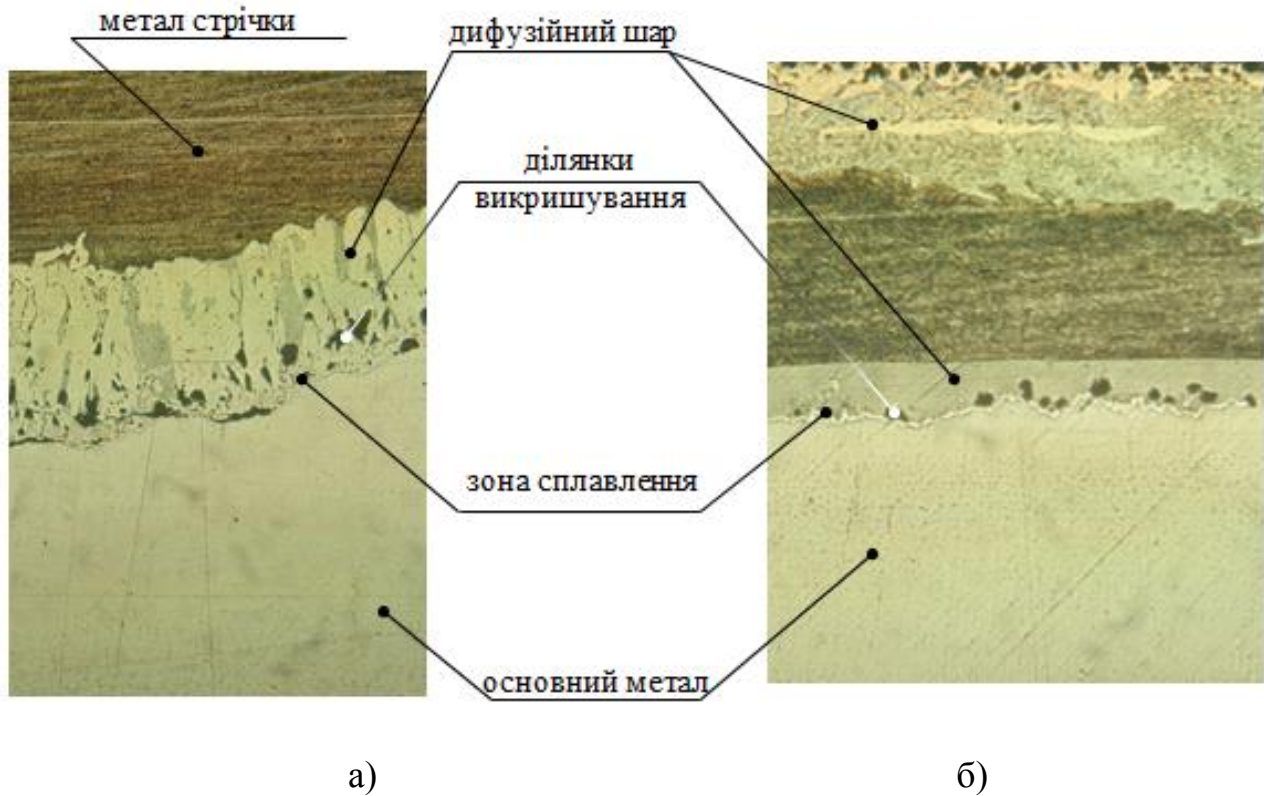


Рисунок 4.4 – Мікроструктура навареного шару, зони приварювання та основного металу після електроконтактного наварювання на зразки з титану стрічок з неякісним одностороннім захистом ($\times 100$)

При цьому феритний прошарок навареного шару практично не змінює структуру (див. рис.4.4, а), структура дифузійного шару в зоні приварювання та на поверхні також не зазнає змін (див. рис. 4.4, а). Однак поряд з вигнутою лінією приварювання чітко видно окремі ділянки дифузійного шару, який викришився, що свідчить про нерівномірний розподіл тепло- та енерговкладення в зоні приварювання для утворення якісного з'єднання (див. рис. 4.4, а).

Наявність дифузійного шару в зоні контактну з поверхнею зразку приводить до перегріву одних ділянок та недостатньому нагріву інших, що й обумовлює хвилястий характер лінії приварювання.

У той же час силовий вплив ролику-електроду на недостатньо прогріті ділянки дифузійного шару в зоні контакту приводить до відколів зносостійкої складової.

При електроконтактному наварюванні на зразки зі сталей У8 і 65Г електродних стрічок з неякісним захистом також спостерігається утворення раковин та несплавлень у зоні контакту поверхні зразку з електродним матеріалом (рис.4.5).

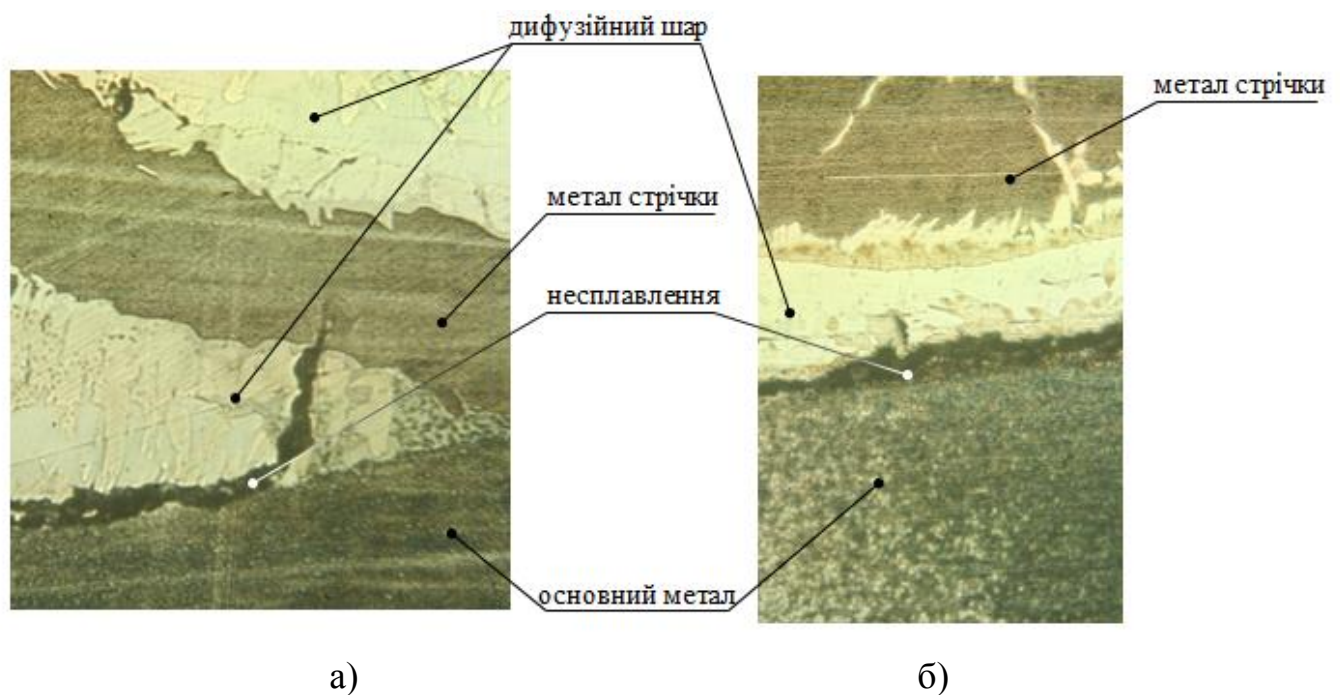


Рисунок 4.5 – Мікроструктура навареного шару, зони приварювання та основного металу після електроконтактного наварювання на зразки зі сталей У8 (а) і 65Г (б) стрічок з неякісним одностороннім захистом ($\times 100$)

Наявність таких внутрішніх дефектів при електроконтактному наварюванні стрічок з неякісним одностороннім захистом є причиною низької експлуатаційної стійкості одержаних за даною технологією зразків. Рішення вказаної проблеми можливе у двох напрямках: інтенсифікацією процесу електроконтактного наварювання за рахунок підвищення режимів або застосуванням методів якісного за-

хисту стрічки із забезпеченням утворення дифузійного шару в процесі підготовки тільки з одного з його боків.

Інтенсифікація процесу електроконтактного наварювання з метою забезпечення утворення з'єднання в зоні контакту електродного матеріалу з поверхнею виробу при використанні стрічок з неякісним одностороннім захистом приводить до утворення різних дефектів. Так при збільшенні сили струму наварювання до $I_n = 8,0 \dots 9,0$ кА та тривалості імпульсу струму до $t_{\text{имп}} = 0,08 \dots 0,09$ с відбувається утворення виплесків у покритті, обумовлене перегрівом електродного матеріалу (рис.4.6, а).

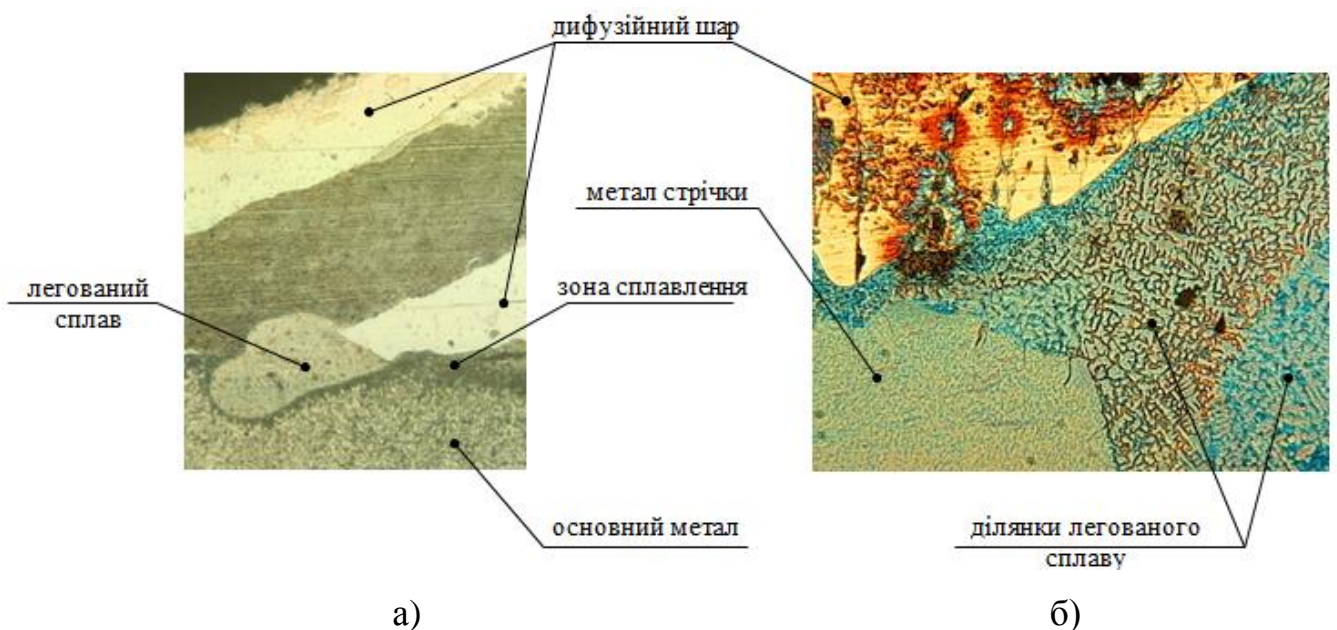


Рисунок 4.6 – Утворення виплесків електродного матеріалу (хімічне травлення) (а) та часткового розплавлення дифузійного шару в зоні приварювання (теплове травлення) (б) при електроконтактному наварюванні з підвищеною силою струму електродних стрічок з неякісним одностороннім захистом на зразки зі сталі 65Г ($\times 100$)

Крім того спостерігається часткове розплавлення дифузійного шару в зоні контакту з поверхнею деталі з утворенням нових фаз у зоні приварювання (див. рис.4.6, б). Згідно з даними теплового травлення (див. рис.4.6, б), ділянки, які утворюються, леговані компонентами дифузійного шару та мають різний фазовий склад з різними розмірами зерен.

Аналогічні результати з інтенсифікації процесу електроконтактного наварювання за рахунок збільшення сили струму та тривалості імпульсу одержано й для зразків зі сталі У8 (рис.4.7).

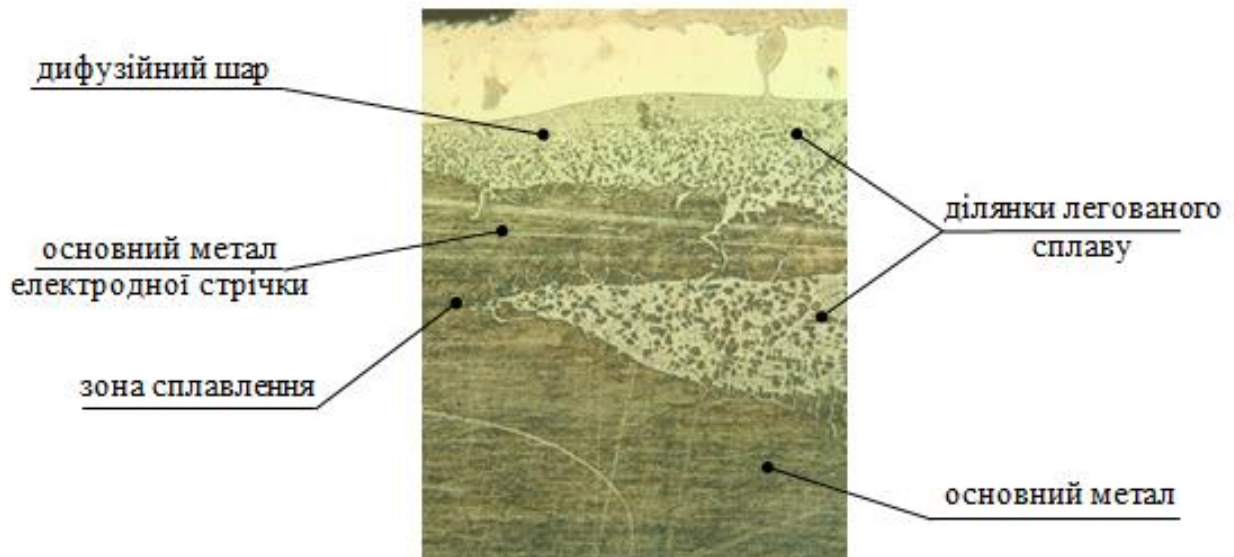


Рисунок 4.7 – Мікроструктура навареного шару, зони приварювання та основного металу після електроконтактного наварювання на зразки зі сталі У8 стрічок з неякісним одностороннім захистом при інтенсифікації процесу за рахунок збільшення сили струму ($\times 100$)

Характер одержаних мікроструктур нанесених покриттів свідчить про ймовірність утворення лінії приварювання, проте при цьому відсутня можливість контролю дифузійних перетворень в зоні приварювання та керування розподілом фізико-механічних властивостей по перетину навареного шару, що робить неефективним застосування цього способу.

Збільшення зусилля на ролику-електроді до $P=4,5$ кН приводить до утворення тріщин в дифузійному шарі нанесеного покриття (рис.4.8.).

Характер розташування тріщини в представленій структурі навареного шару свідчить про здатність м'якого феритного прошарку в електродному матеріалі перешкоджати розвитку та зростанню тріщин [291], що при оптимальних умовах підготовки електродного матеріалу та застосуванні раціональних режимів

електроконтактного наварювання може забезпечити високу втомну міцність покриття (див. розд.3).

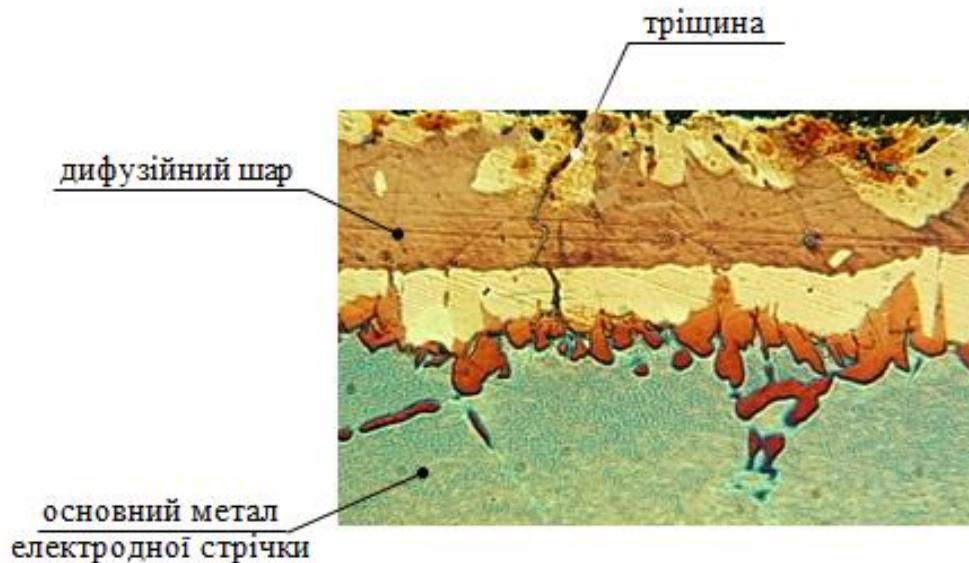


Рисунок 4.8 – Утворення тріщини при електроконтактному наварюванні зі збільшенням зусилля на ролику-електроді ($\times 100$)

Наявність дефектів переплавлення дифузійних шарів у покритті, що наварюється, та розвиток тріщин на його поверхні робить неможливим застосування методу інтенсифікації процесу електроконтактного наварювання електродних стрічок з неякісним захистом за рахунок збільшення зусилля на ролику-електроді.

Таким чином, важливим моментом є структура в зоні лінії приварювання, властивості якої впливають на експлуатаційні характеристики покриття в цілому [302]. Наварювання різнорідних матеріалів відбувається після їх сумісної пластичної деформації, схоплювання контактних поверхонь та протікання дифузії, причому схоплювання окремих ділянок є найважливішим етапом процесу одержання нероз'ємного з'єднання, що забезпечує протікання подальшої пластичної деформації та дифузії контактуючих поверхонь. Одним з ефективних способів інтенсифікації процесів схоплювання є хімічне активування поверхонь [16].

Для активації процесів дифузії при наварюванні різнорідних матеріалів доцільно застосовувати проміжних шарів, фізико-хімічні властивості яких забезпечують

активування контактуючих поверхонь. Застосування таких проміжних шарів сприяє також усуненню або зменшенню термічних напружень [62, 108].

У якості активуючих прошарків застосовують нікелеве, мідне або срібне покриття товщиною 5-15 мкм [106]. Такі прошарки мають більш низьку температуру плавлення, ніж матеріали, що зварюються, і застосовуються у вигляді фольги, порошкових сумішей, а також у бідь-якому їх сполученні [62].

Збереження одного з боків електродної стрічки у вихідному стані при попередній хіміко-термічній підготовці дозволяє створити в зоні приварювання перехідний прошарок, який забезпечує зчеплення між поверхнею зразку та зносостійким шаром без необхідності нанесення спеціальних активуючих покриттів (рис.4.9).

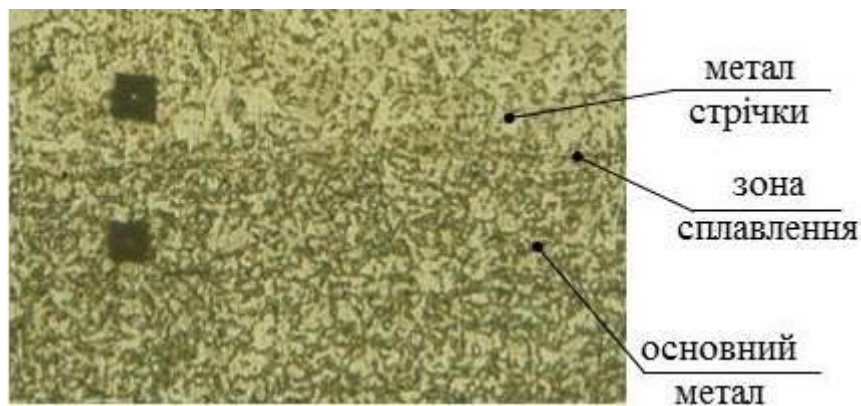


Рисунок 4.9 – Мікроструктура зони з'єднання ($\times 280$)

Проведені дослідження дозволили розробити спосіб електроконтактного наварювання стрічок [303], який полягає у створенні на поверхні металевої стрічки з низьковуглецевої сталі для електроконтактного наварювання зносостійкого шару шляхом хіміко-термічної обробки, причому на поверхні деталі перед електроконтактним наварюванням закріплюють стрічку у контакті стороною, яка не піддавалась хіміко-термічній обробці. При електроконтактному наварюванні на рекомендованих режимах закріплення в зоні контакту з поверхнею деталі стрічки стороною, яка піддавалась хіміко-термічній обробці, приводить до практичної відсутності пластичної деформації присадного металу, яка є необхідною умовою якісного з'єднання: не вдається виключити дефекти у вигляді внутрішніх тріщин, раковин, пор, несплавлення, викришування привареного шару та ін.

Застосування при електроконтактному наварюванні одержаних електродних матеріалів з градієнтним розподілом властивостей забезпечує створення покриття з високими зносостійкими властивостями на його поверхні та збереженням пластичних властивостей у м'якій феритній складовій, що згідно з попереднім дослідженням (див. розд.3) запобігає росту тріщин та їх розповсюдженню в основний метал. Даний метод забезпечує одержання навареного шару з макрөгетерогенним розподілом структур за функціональними зонами. Феритна складова є прошарком аналогічним перехідному шару [106], попередньо нанесеним порошковим матеріалом [304, 305]. Враховуючи геометричні розміри нанесеного шару (5-50мкм) теплова картина в термодформаційному осередку не зазнає істотних змін [306], а локальні та інтегральні енергосилові характеристики процесу на першій стадії консолідації змінюються за закономірностями, аналогічними до процесів ущільнення порошкового середовища при виготовленні електродних матеріалів [307-310].

Проте складність проведення даного процесу наварювання пов'язана з обмеженнями, обумовленими нерівномірним та неконтрольованим розподілом електричного струму в різних точках контакту відновлюваної поверхні виробу з порошкових середовищем, що може приводити до несплавлінь або перегрівам та виплескам в окремих ділянках [311-313].

4.2. Триботехнічний комплекс для дослідження зносостійкості навареного шару

З метою визначення зносостійких характеристик зразків, наварених електродною стрічкою, яка пройшла попередню обробку хіміко-термічним методом у насичувальних сумішах різного складу, було розроблено спеціальний триботехнічний комплекс [314], який відповідає наступним основним вимогам:

- простота та відносно невисока вартість конструкції;
- можливість заміни досліджуваних зразків без необхідності розборки всієї машини;

- можливість досліджування зразків різноманітної форми, а також зразків, які не є тілами циліндричної форми;
- швидка зміна умов випробування, а саме швидкості тертя;
- можливість моніторингу одержаних результатів випробувань різних зразків.

На базі існуючої машини тертя було розроблено триботехнічний комплекс [315] (рис.4.10), додатково оснащений універсальним програмно-апаратним пристроєм [316, 317].

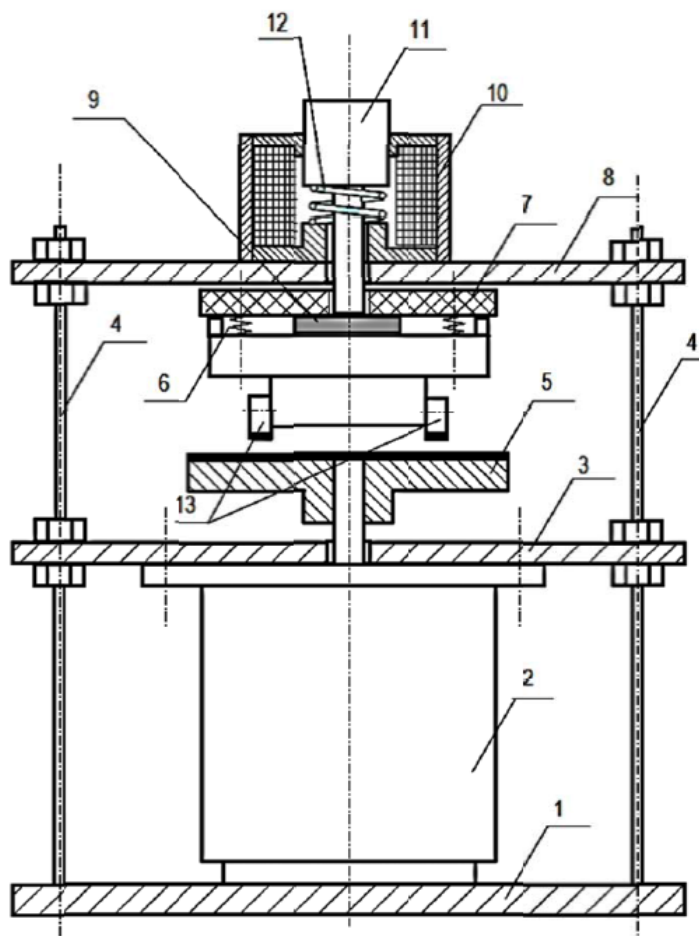


Рисунок 4.10 – Триботехнічний комплекс: 1 – нижня основа; 2 – електродвигун; 3 – середня основа; 4 – з'єднувальні шпильки; 5 – півмуфта з абразивним шаром; 6 – пружини; 7 – текстолітовий фланець; 8 – верхня основа; 9 – датчик тиску; 10 - електромагніт; 11 – осердя електромагніту; 12 - пружина

Принцип роботи модернізованої машини тертя полягає у наступному. При увімкненні електродвигуна 2 починає обертатися півмуфта 5 з нанесеним на неї абразивним шаром. Для початку триботехнічних випробувань необхідно подати напругу на електромагніт 10. Після чого осердя електромагніту 11 виймається, а досліджувані наварені зразки 13 вступають у контакт з абразивним матеріалом півмуфти, яка обертається. При цьому пружини 6 стискаються, а на датчик тиску 9 діє зусилля заданої величини. По мірі зношування досліджуваних наварених зразків зусилля, яке діє на датчик тиску, слабшає.

З метою підтримки показників датчика тиску постійними, система керування налаштовується таким чином, щоб при зменшенні тиску зразку на абразивний матеріал за рахунок підвищення напруги магніту цей тиск приводився до початкового значення [318]. Крім того, система керування дозволяє контролювати і підтримувати на певному рівні температуру досліджуваних зразків. Залежно від поточної температури наварених зразків у автоматичному режимі може змінюватися швидкість електродвигуна [319].

В якості системи керування запропонованого триботехнічного комплексу застосовано систему керування на базі модулю E-440 (рис.4.11) [320]. В наведені схемі регулювання швидкості двигуна відбувається тиристорним перетворювачем ТП1, регулювання зусилля притиску магніту тиристорним перетворювачем ТП2, контроль швидкості двигуна здійснюється датчиком швидкості ДС, а зусилля притиску магніту контролює датчик тиску ДД.

Зміна температури контролюється датчиком ДТ. Основною ланкою системи керування є модуль E-440, який виконує збирання та обробку інформації з усіх датчиків та видає подає відповідні значення напруги на вхід регулятора швидкості та регулятора тиску. Увімкнення модулю E-440 значно підвищує ефективність керування параметрами навантаження досліджуваних наварених зразків та дозволяє здійснити вибір, зберігання та обробку виміряних протягом експерименту характеристик.

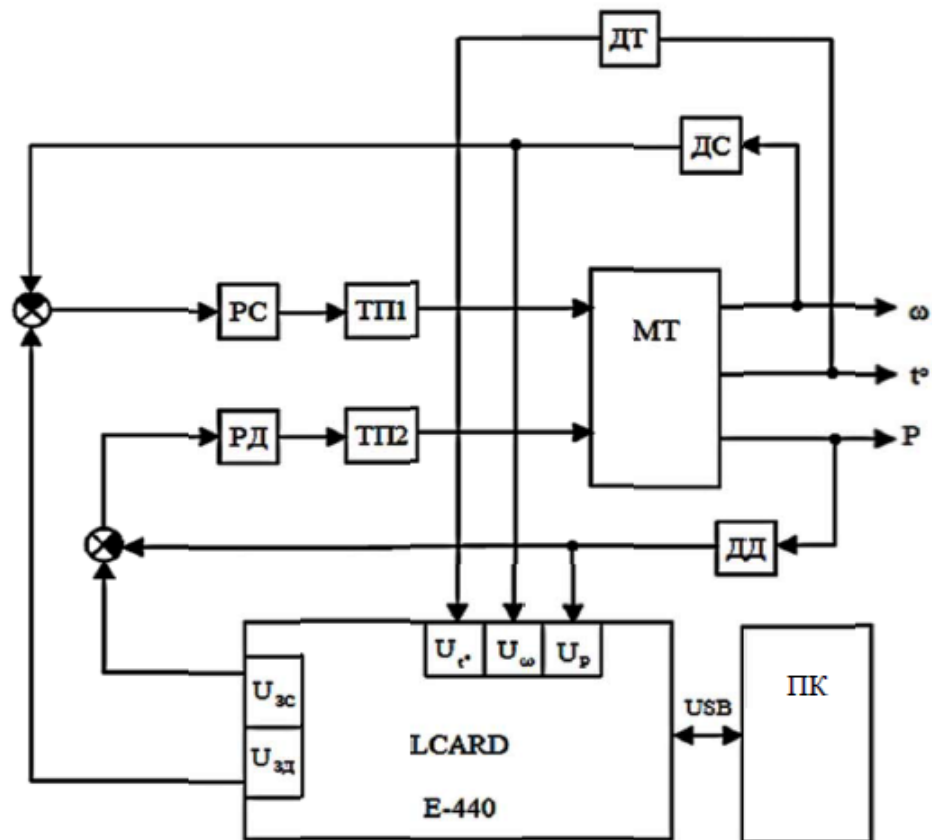


Рисунок 4.11 – Структурна схема системи керування триботехнічного комплексу: РС – регулятор швидкості; ТП1 – тиристорний перетворювач двигуна; ДТ – датчик температури; ДС – датчик швидкості; РД – регулятор тиску; ТП2 – тиристорний перетворювач магніту; ДД – датчик тиску; МТ – машина тертя; LCARD – модуль E-440; ПК – персональний комп’ютер

Модуль E-440 є сучасним універсальним програмно-апаратним пристроєм для використання зі стандартною послідовною шиною USB та призначена для побудови багатоканальних вимірювальних систем введення, виведення та обробки аналогової й цифрової інформації у складі персональних IBM-сумісних комп’ютерів. Крім того, що даний модуль можна розглядати в якості достатньо недорогого компактного пристрою багатоканального збирання інформації, він у той же час, представляє собою закінчену систему з власним процесором, що дозволяє досвідченому користувачеві реалізовувати свої власні спеціалізовані алгоритми обробки сигналів на рівні програмування встановленого на модулі сучасного цифрового сигнального процесору (ADSP) виробництва фірми Analog Devices Inc. Ра-

зом з модулем E-440 поставляється драйвер пристрою від «Л-Кард» та штатна бібліотека, яка містить функції, що дозволяють здійснювати введення / виведення аналогової та цифрової інформації в асинхронному режимі, вводити та виводити аналогову інформацію як в одноканальному, так і в багатоканальному режимах із довільною синхронізацією введення. Основним функціональними обов'язками цифрового сигнального процесору ADSP-2185M, встановленого на модулі E-440, є керування та повний контроль над усією периферією пристрою, а також, при необхідності, первинна обробка інформації. Мікроконтролер AVR на шині здатен здійснювати за командами з комп'ютера будь-які операції прямого доступу до пам'яті процесору. Таким чином, завдяки вказаній можливості програмне забезпечення комп'ютеру може звертатися до будь-якої комірки пам'яті цифрового сигнального процесору, не перериваючи при цьому його роботу. Це є виключно зручним при побудові алгоритмів, які працюють в реальному масштабі часу.

Модуль E-440 має наступні функціональні характеристики:

- шина USB;
- сучасний цифровий сигнальний процесор ADSP-2185M виробництва фірми Analog Devices Inc. з тактовою частотою роботи 48 МГц;
- 16 диференціальних каналів або 32 канали для аналогового введення з можливістю автоматичного корегування нуля;
- максимальна частота роботи 14-бітного АЦП складає 400 кГц;
- два входи для зовнішньої синхронізації при введенні аналогового сигналу;
- порт цифрового введення/виведення, який має 16 вхідних та 16 вихідних ліній;
- два канали аналогового виведення 12-бітного ЦАП з максимальною сумарною частотою 125 кГц;
- максимальна пропускна здатність по шині USB – не більше 500 кСлів/с.

Випробування зразків проводили під дією навантаження $4,4 \cdot 10^{-3}$ МПа. Через кожні 15 хвилин випробувань виконувалась заміна абразиву. Масу зразку визначали через кожні 15 хвилин випробувань шляхом зважування зношених зразків на аналі-

тичних вагах із точністю до 0,001 г. В якості критерію зносостійкості приймали відносне зношення зразків, яке визначалося зі співвідношення:

$$\varepsilon = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \cdot 100\% , \quad (4.2)$$

де m_0 – маса зразку до випробувань, г;

m_i – маса зразку після випробувань, г.

4.3. Вибір складу насичувальної суміші для багатокomпонентної хіміко-термічної обробки електродних стрічок

Компоновку порошкових сумішей обрано таким чином, щоб було можливо вивчити вплив основних складових компонентів на структуру дифузійного шару в електродному матеріалі та зносостійкість навареного шару.

Одержані електродні матеріали подавали до відновлюваної електроконтактним методом деталі таким чином, щоб у контакті з поверхнею виробу знаходилась сторона, яка не піддавалась попередній хіміко-термічній обробці.

Для дослідження впливу складу комплексної насичувальної суміші для обробки електродного матеріалу на зносостійкі властивості навареної поверхні проведено оптимізацію складу за даними (табл.4.1) з використанням засобів програмного продукту STATISTICA StatSoft 10. За приведеною таблицею даних, яка містить інформацію про склад насичувальних сумішей для створення на поверхні електродного матеріалу функціонального дифузійного шару, було побудовано діаграму розмаху (рис.4.12), яка зображує одномірний розподіл імовірностей. Згідно з результатами дисперсійного аналізу (табл. 4.2) одержані дані відносно глибини функціонального шару в електродному матеріалі є статистично значущими для лінійної та квадратичної моделей ($p \ll 0,05$).

Змінення зносостійкості нанесеного покриття залежно від складу насичувальної суміші

| B ₄ C, мас.% | FeTi, мас.% | Al ₂ O ₃ , мас.% | I _t , Г |
|-------------------------|-------------|--|--------------------|
| 25 | 0 | 68 | 5,5 |
| 0 | 25 | 68 | 0,5 |
| 25 | 25 | 43 | 3,2 |
| 12,5 | 12,5 | 68 | 3,0 |
| 25 | 12,5 | 55,5 | 4,6 |
| 12,5 | 25 | 55,5 | 1,0 |
| 36 | 24 | 33 | 5,0 |
| 24 | 36 | 33 | 2,5 |
| 24 | 13,5 | 55,5 | 4,5 |
| 25 | 18,75 | 49,25 | 4,2 |
| 13 | 18,25 | 61,75 | 1,1 |
| 37 | 6,25 | 49,75 | 5,3 |
| 18,75 | 13 | 61,25 | 4,0 |
| 25 | 6,25 | 61,75 | 5,1 |
| 18,75 | 18,75 | 55,5 | 3,1 |

Для лінійної моделі спостерігається різниця між середнім квадратом ефекту *MSEffect*, обумовленим міжгруповим розкидом, та середнім квадратом помилки *SSEffect*, обумовленим внутрішньогруповим розкидом: $MSEffect = 16.66110$; $SSEffect = 33.32220$. Частка поясненої дисперсії за допомогою коефіцієнту детермінації, який характеризує мінливість залежної змінної відносно середнього, згідно з лінійною моделлю складає $R-Sqr = 0.888371$, скорегований коефіцієнт детермінації $R-Sqr Adjusted = 0.869766$, що виключає можливість використання лінійної моделі для опису взаємозв'язку між параметрами.

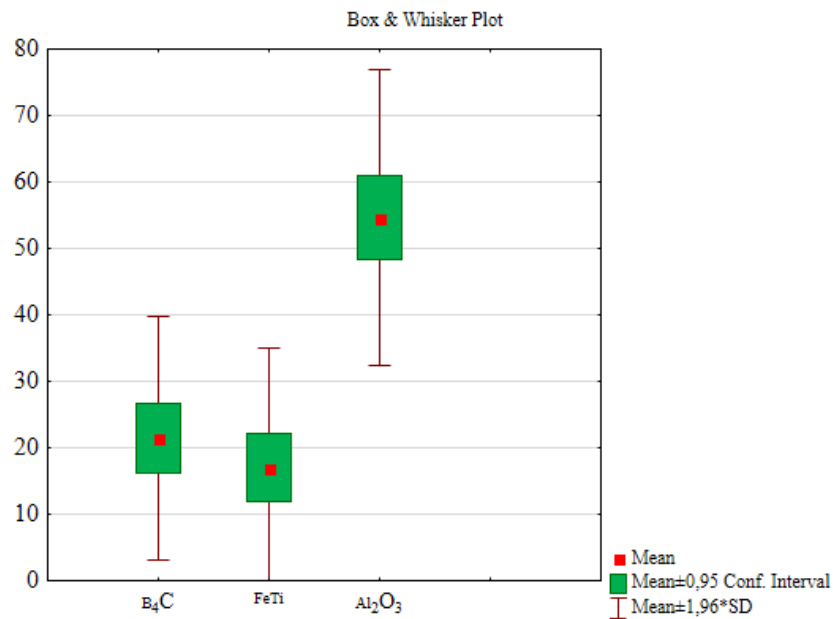


Рисунок 4.12 – Діаграма розмаху варіювання вмісту компонентів насичувальної суміші

Застосування квадратичної моделі збільшує узгодження компонент дисперсії: $MSEffect = 0.89963$; $SSEffect = 0.29988$. Має місце також збільшення коефіцієнту детермінації, який склав $R-Sqr = 0.912355$, а скорегований коефіцієнт детермінації $R-Sqr Adjusted = 0.893663$. Застосування спеціальної кубічної моделі є недоцільним, так як модель не є статистично значущою ($p=0.278768 \gg 0.05$), не зважаючи на те, що коефіцієнт детермінації збільшується $R-Sqr = 0.928894$. У зв'язку з цим для опису взаємодії параметрів використано квадратичну модель.

Таблиця 4.2

Результати дисперсійного аналізу

| ANOVA; Var.t (Spreadsheet1) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 3 Factor mixture design; Mixture total=93,, 15 Runs | | | | | | | | | | |
| Sequential fit of models of increasing complexity | | | | | | | | | | |
| Model | SS Effect | df Effect | MS Effect | SS Error | df Error | MS Error | F | p | R-Sqr | R-Sqr Adjusted |
| Linear | 33,32220 | 2 | 16,66110 | 4,187129 | 12 | 0,348927 | 47,74948 | 0,000002 | 0,888371 | 0,869766 |
| Quadratic | 0,89963 | 3 | 0,29988 | 3,287503 | 9 | 0,365278 | 0,82095 | 0,005144 | 0,912355 | 0,893663 |
| Special Cubic | 0,62036 | 1 | 0,62036 | 2,667144 | 8 | 0,333393 | 1,86075 | 0,278768 | 0,928894 | 0,875564 |
| Total Adjusted | 37,50933 | 14 | 2,67924 | | | | | | | |

Для вивчення статистик квадратичної моделі проведено оцінку псевдокомпонент (табл.4.3). Згідно з проведеним аналізом псевдокомпонент, статистично значущими для обраної квадратичної моделі є компоненти (A) і (B): $p \ll 0.05$.

Таблиця 4.3

Оцінка псевдокомпонент для квадратичної моделі

| Coeffs (recoded comps); Var.:t; R-sqr=,9124; Adj.,8637 (Spreadsheet1) 3 Factor mixture design; Mixture total=93,, 15 Runs DV: t; MS Residual=,3652781 | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|--|
| Factor | Coeff. | Std.Err. | t(9) | p | -95,% Cnf.Limt | +95,% Cnf.Limt | |
| (A)B ₄ C | 7,81890 | 2,245199 | 3,48250 | 0,006911 | 2,7399 | 12,89789 | |
| (B)FeTi | -5,51664 | 3,609488 | -1,52837 | 0,016077 | -13,6819 | 2,64859 | |
| (C)Al ₂ O ₃ | 5,29352 | 2,390150 | 2,21472 | 0,054027 | -0,1134 | 10,70041 | |
| AB | 10,87804 | 9,771994 | 1,11319 | 0,294475 | -11,2277 | 32,98383 | |
| AC | -3,29069 | 6,270769 | -0,52477 | 0,612425 | -17,4762 | 10,89477 | |
| BC | -3,50395 | 5,887365 | -0,59516 | 0,566395 | -16,8221 | 9,81419 | |

Проведений аналіз дозволив виявити основні компоненти та їх взаємодії, які впливають на зносостійкість навареного шару. З використанням квадратичної моделі одержано рівняння регресії, яке з достатньою точністю описує закономірності зміни досліджуваних експериментальних даних:

$$I_t = 7,8188952523906 \cdot x - 5,5166422532403 \cdot y + 5,293515559245 \cdot z + 10,878044705202 \cdot x \cdot y - 3,2906931172267 \cdot x \cdot z - 3,5039514742558 \cdot y \cdot z, \quad (4.3)$$

де I_t – зносостійкість навареного шару;

x, y, z – вміст у насичувальній суміші компонентів B₄C, FeTi і Al₂O₃ відповідно.

На основі представленого регресійної моделі побудовано графічну залежність, що відображає вплив складу насичувальної суміші на зміну зносостійкості шару, навареного стрічками, які пройшли попередню хіміко-термічну обробку (рис.4.13):

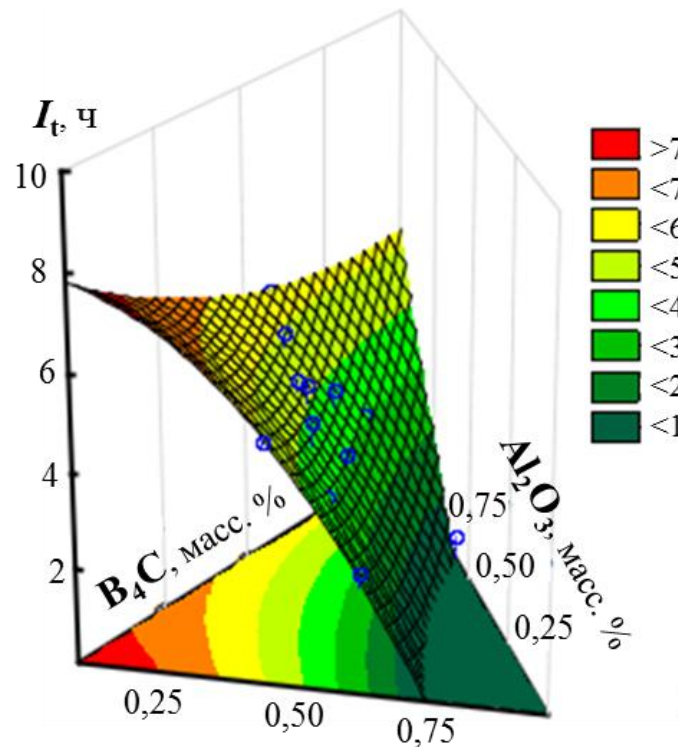


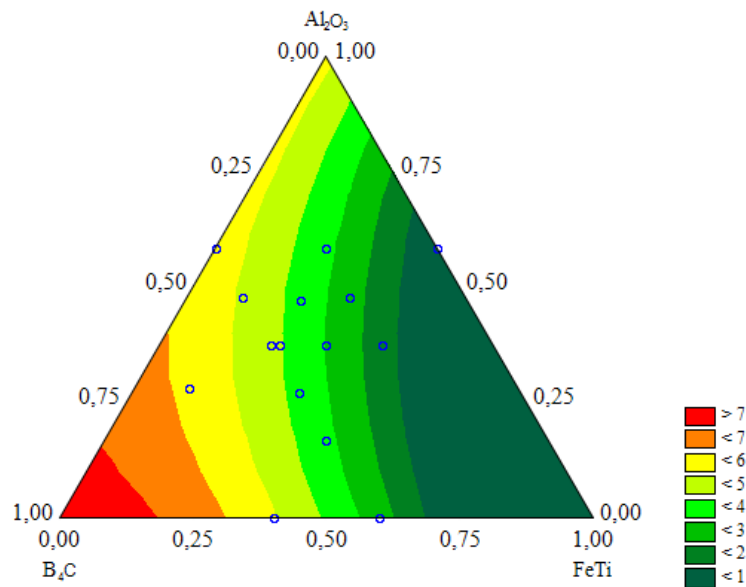
Рисунок 4.13 – Графік поверхні відклику

Точний розподіл часток компонентів представлено на тернарних графіках (рис.4.14). Згідно з отриманим за запропонованою квадратичною моделлю рівнянням можна прогнозувати змінення зносостійкості навареного шару залежно від будь-якого набору компонент. Наприклад, отримано розраховане значення глибини функціонального шару при наступному вмісті компонентів насичувальної суміші (мас.%): 0.22 B₄C; 0.38 FeTi; 0.33 Al₂O₃, решта Na₃AlF₆ (табл.4.4).

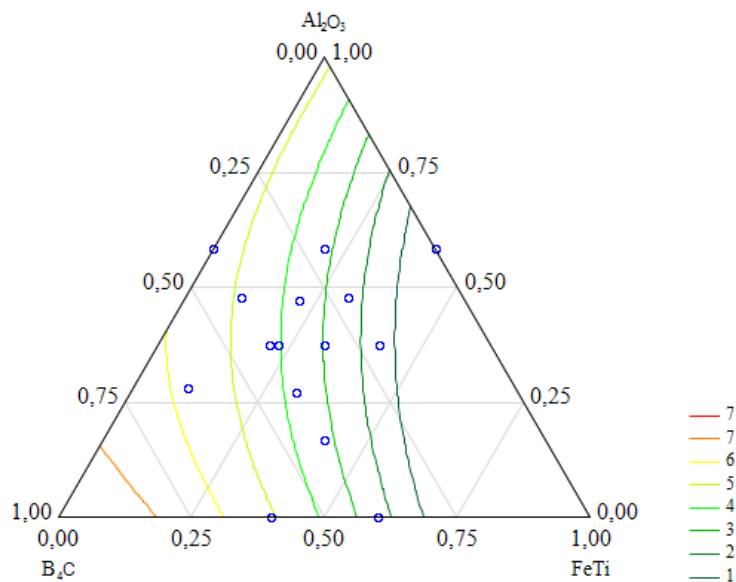
Таблиця 4.4

Оцінка прогнозованого значення залежної змінної

| Predicted Value; Var.:t; R-sqr=,91236; Adj:,86366 (Spreadsheet1) DV: t; MS Residual=,3652781 | | | | | |
|---|----------|-----------------|----------------|-------------------|--|
| Factor | Coeff. | Pseudo Comp.Val | Coeff. * Value | Original Comp.Val | |
| (A)B ₄ C | 7,81890 | 0,366667 | 2,86693 | 22,00000 | |
| (B)FeTi | -5,51664 | 0,633333 | -3,49387 | 38,00000 | |
| (C)Al ₂ O ₃ | 5,29352 | 0,000000 | 0,00000 | 33,00000 | |
| AB | 10,87804 | 0,232222 | 2,52612 | | |
| AC | -3,29069 | 0,000000 | 0,00000 | | |
| BC | -3,50395 | 0,000000 | 0,00000 | | |
| Predicted | | | 1,89918 | | |



а)



б)

Рисунок 4.14 – Проекція поверхні відклику (а) та контурний графік (б) змінення зносостійкості навареного шару залежно від складу насичувальної суміші

Згідно з результатами розрахунку зносостійкість навареного шару в цьому випадку складатиме 1,89918 годин. Згідно з результатами розрахунку за запропонованою регресійною моделлю максимальна зносостійкість навареного шару спостерігається при використанні для попередньої хіміко-термічної обробки стрічок сумішей, склад яких варіюється у наступних межах: 30-40% B_4C ; 10-20% $FeTi$; 20-40% Al_2O_3 , решта Na_3AlF_6 .

З метою дослідження експлуатаційної стійкості навареного шару при ударно-абразивних навантаженнях залежно від складу суміші для попередньої хіміко-термічної підготовки електродної стрічки проведено випробування наварених зразків на мікрокрихкість (рис.4.15).

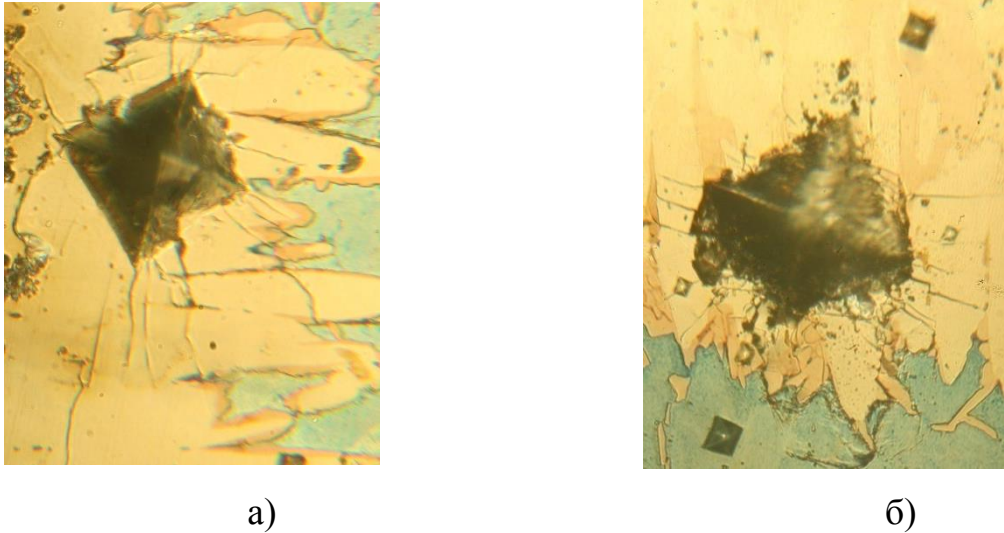


Рисунок 4.15 – Стан поперечного шліфу наварених зразків, оброблених у сумішах складу 36% B_4C ; 61% Al_2O_3 (а) і складу 26% B_4C ; 32% $FeTi$; 39% Al_2O_3 (б) у зоні індентування ($\times 150$)

Визначення мікрокрихкості дифузійних шарів у нанесеному покритті проводили з використанням приладу ПМТ-3. Мікрокрихкість оцінювали за напруженням відколу дифузійного шару у нанесеному покритті під дією алмазної піраміди [321] (табл.4.5):

$$\sigma = \frac{0,17P}{2L^2 + LC}, \quad (4.4)$$

де P – навантаження;

L – мінімальна відстань від центру відбитку алмазної піраміди до краю зразку;

C – довжина діагоналі відбитку алмазної піраміди.

Змінення мікрокрихкості дифузійного шару у нанесеному покритті залежно від складу насичувальної суміші

| B ₄ C, мас.% | FeTi, мас.% | Al ₂ O ₃ , мас.% | σ, МПа |
|-------------------------|-------------|--|--------|
| 25 | 0 | 68 | 260 |
| 0 | 25 | 68 | 810 |
| 25 | 25 | 43 | 610 |
| 12,5 | 12,5 | 68 | 640 |
| 25 | 12,5 | 55,5 | 360 |
| 12,5 | 25 | 55,5 | 790 |
| 36 | 24 | 33 | 320 |
| 24 | 36 | 33 | 660 |
| 24 | 13,5 | 55,5 | 360 |
| 25 | 18,75 | 49,25 | 380 |
| 13 | 18,25 | 61,75 | 760 |
| 37 | 6,25 | 49,75 | 280 |
| 18,75 | 13 | 61,25 | 420 |
| 25 | 6,25 | 61,75 | 300 |
| 18,75 | 18,75 | 55,5 | 615 |

Аналіз експериментальних даних з використанням засобів програмного продукту STATISTICA StatSoft 10 дозволив отримати регресійну модель залежності напруження відколу нанесеного шару від складу суміші для попередньої хіміко-термічної обробки електродного матеріалу:

$$\sigma = -210,33116893869 \cdot x + 1504,2621066421 \cdot y + 368,46206158809 \cdot z - 610,72766169457 \cdot x \cdot y + 562,19762217212 \cdot x \cdot z + 195,61840846118 \cdot y \cdot z, \quad (4.5)$$

де σ – напруження відколу;

x, y, z – вміст у насичувальній суміші компонентів B₄C, FeTi і Al₂O₃, відповідно.

Коефіцієнт детермінації одержаної квадратичної моделі складає 0,87 при рівні значущості $p=0,000007 \ll 0,05$, що свідчить про її адекватність та достатньо високу ефективність. З використанням запропонованої моделі побудовано графічні залежності (рис. 4.16-4.17), які дозволяють за величиною напруження відколу оцінити мікротвердість досліджуваних наварених зразків.

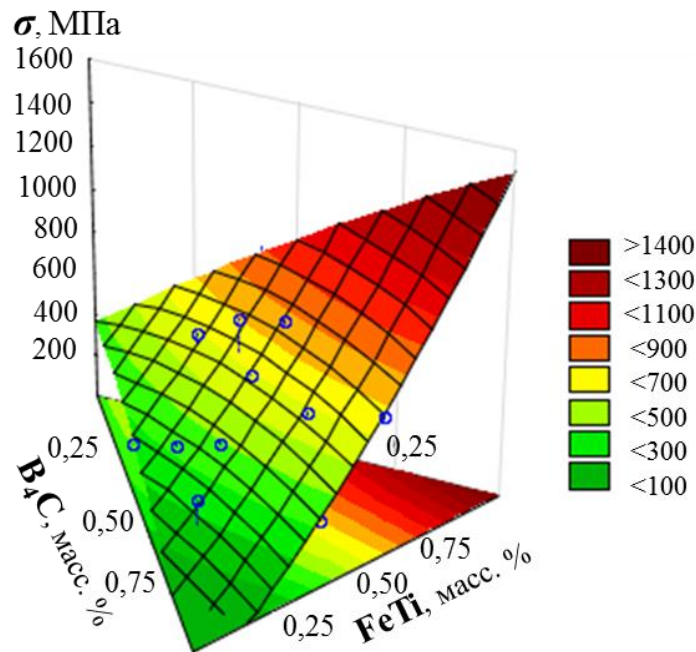
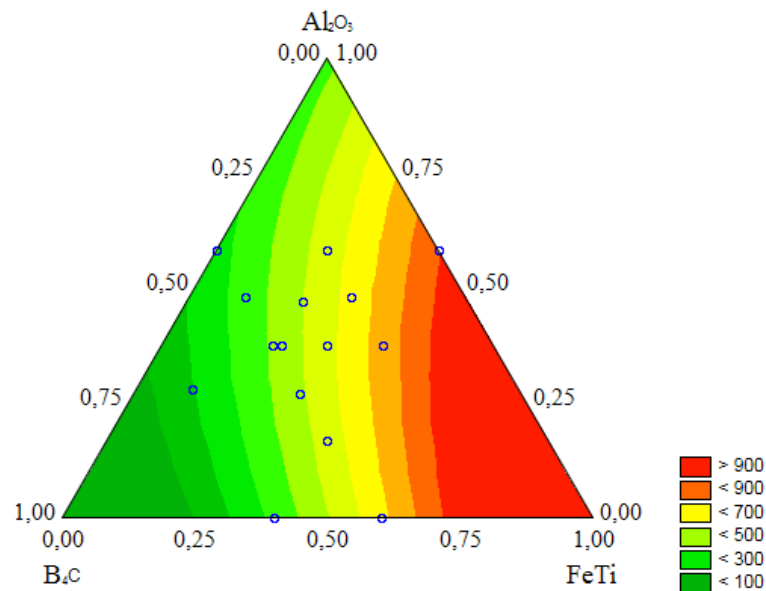


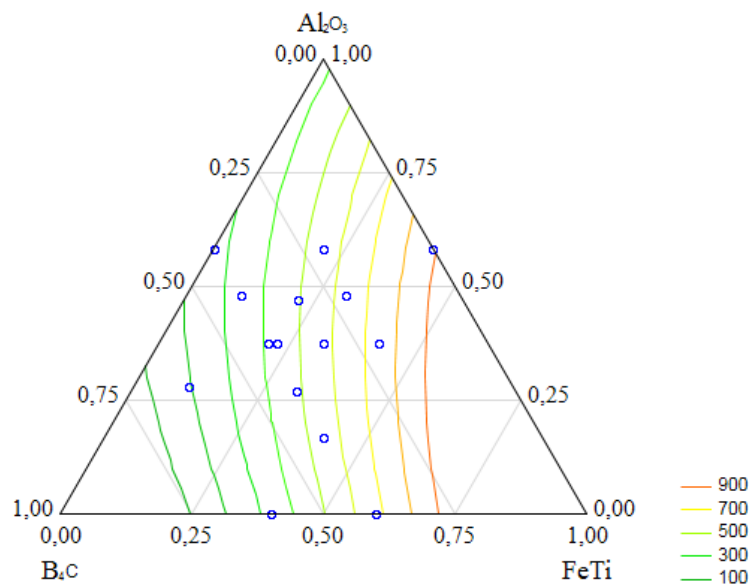
Рисунок 4.16 – Графік поверхні відколу

Згідно з результатами регресійного моделювання найбільш високі напруження відколу, а значить і найменша мікротвердість, спостерігається у зразках, наварених стрічками після попередньої хіміко-термічної обробки у сумішах складу: 10-20% V_4C ; 30-40% $FeTi$; 20-40% Al_2O_3 ; Na_3AlF_6 – решта.

Порівняльний аналіз одержаних даних про мікротвердість зразків, які оброблено сумішами з різним вмістом V_4C і $FeTi$, свідчить про найбільш високу мікротвердість зразків, наварених стрічками, які пройшли попередню хіміко-термічну обробку у сумішах, що не містять $FeTi$. Це обумовлене тим, що технологія багатоконпонентного насичування V_4C і $FeTi$ дозволяє створювати у поверхневому шарі електродного матеріалу твердий розчин, який є матрицею, в якій рівномірно розподілені голки боридів, що забезпечує перерозподіл діючого навантаження та перешкоджає росту тріщин.



а)



б)

Рисунок 4.17 – Проекція поверхні відклику (а) та контурний графік (б) змінення напруження відколу навареного шару залежно від складу насичувальної суміші

Також слід відмітити, що такий нанесений шар має більш високі показники пластичності за рахунок того, що тверді, але крихкі бориди не являються монолітним шаром, а розділені м'яким і пластичним твердим розчином. Отже, більш високими експлуатаційними показниками в умовах контактного та абразивного тертя відрізняється шар, наварений сталеву стрічкою, яка пройшла попереднє багатокон-

понтентне насичення у суміші $B_4C-FeTi-Al_2O_3$ наступного складу: 20-30% B_4C ; 30-40% $FeTi$; 20-40% Al_2O_3 ; 7% Na_3AlF_6 .

Після багатоконпонентного насичення електродної стрічки структура навареного шару складається з двох зон, а саме: зони твердого розчину, який після теплового травлення має рівномірний коричневий колір по всій товщині, та зони боридів Fe_2B , яка пов'язана із зоною твердого розчину з боку вихідного металу стрічки (рис. 4.18).

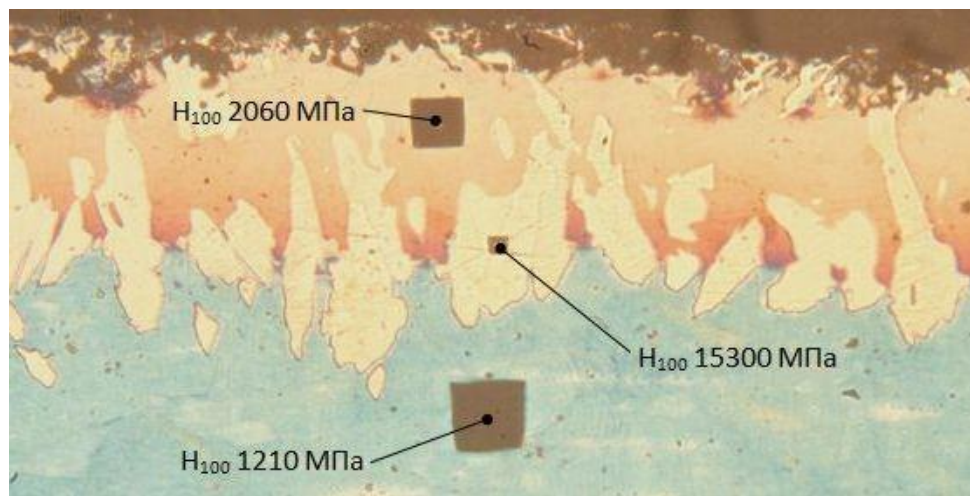


Рисунок 4.18 – Мікроструктура поверхневого шару, навареного сталевую стрічкою 08кп, яка пройшла комплексне багатоконпонентне насичування ($\times 100$)

Мікроструктура навареного шару складається з твердого розчину бору, титану та алюмінію, під яким, на границі з вихідним металом стрічки, розташовано ланцюжок боридів заліза, які мають більш округлу форму та рівномірно розподілені по площі зразку [322]. В процесі електроконтактного наварювання ці бориди знаходяться під шаром твердого розчину, який захищає їх від окислення при високих температурах, а також перешкоджає утворенню тріщин.

Після видалення шару твердого розчину мікроструктура поверхні навареного зразку представляє собою окремі частки боридів заліза округлої форми, розташовані частково в оточенні твердого розчину, а частково – вихідного металу електродної стрічки, що забезпечує, з одного боку високу зносостійкість, а з іншого – задовільну пластичність, запобігаючи утворенню тріщин.

Проведені дослідження на зносостійкість показали, що поверхневий шар, що складається з окремих голок боридів, розділених твердим розчином (наварювання стрічкою 08кп після її насичення в суміш складу 20% B_4C ; 34% $FeTi$; 39% Al_2O_3 ; 7% Na_3AlF_6), має трохи меншу абразивну зносостійкість, ніж наварений шар, що не містить твердого розчину (наварювання стрічкою 08кп після її насичення в суміші складу 36% B_4C ; 57% Al_2O_3 ; 7 % Na_3AlF_6). Проте його зносостійкість значно перевищує зносостійкість зразків, що наварені стрічкою зі сталі 45 та піддавалися наступній термічній обробці.

Таким чином, досліджено зв'язок структури електродного матеріалу і складу та технології для його отримання з експлуатаційними властивостями покриттів, нанесених електроконтактним методом. Обґрунтовано можливість керування складом та структурою покриття з градієнтним розподілом його характеристик по перетину за рахунок застосування попередньої хіміко-термічної обробки електродних матеріалів. Одержання даного ефекту за рахунок нанесення багатошарових покриттів з регламентованим розподілом фізико-механічних властивостей для конкретних умов експлуатації відновлених деталей є проблематичним через потребу спеціалізованого обладнання та високої енергоємності [323, 324].

Висновки до розділу 4

1. Проведені дослідження дозволили розробити технологічні рекомендації з підготовки електродного матеріалу для електроконтактного наварювання деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, та деталей, що працюють під дією циклічного навантаження.

2. Модернізовано машину тертя для прискорених випробувань на зношування, що дозволяє з використанням імітаційного абразивного середовища досліджувати динаміку зношування наварених зразків. Створено структурну схему системи автоматичного керування машиною тертя. Автоматизована машина тертя використана для триботехнічних досліджень при постійних або програмно-змінюваних параметрах те-

ртя. Застосування модуля LCARD E-440, сумісного з персональним комп'ютером, дозволяє систематизувати та аналізувати одержані дані прискорених випробувань, а також прогнозувати результати експерименту.

3. Комплексна хіміко-термічна обробка електродного матеріалу дозволяє створити у навареному поверхневому шарі структуру, що складається з пластичної матриці (твердий розчин) та рівномірно розподілених у ній твердих складових (бориди заліза), за рахунок чого навантаження, що сприймається поверхнею виробу, перерозподіляється по площині покриття, знижуючи імовірність руйнування. Бориди заліза, що рівномірно розподілені у поверхневому шарі та захищені від термічного впливу у процесі електроконтактного наварювання шаром твердого розчину, забезпечують високу зносостійкість одержаного покриття, що значно перевищує зносостійкість зразків, що наварені стрічкою зі сталі 45 та піддавалися наступній термічній обробці.

РОЗДІЛ 5

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ І МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

На даний час проведено низку досліджень з вибору рекомендованого складу матеріалу, що наварюється та забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики покриття (див. розд.1.4). Проте, через короткочасність протікання процесу електроконтактного наварювання, існують певні труднощі в прогнозуванні одержуваної якості покриття та відповідності його основним експлуатаційним властивостям. Тому виникає необхідність використання математичного апарату для аналітичного моделювання електроконтактного наварювання з метою оптимізації основних параметрів процесу для одержання покриття, яке максимально відповідає заданим вимогам.

5.1. Математичне моделювання термодформаційного процесу в зоні формування з'єднання при електроконтактному наварюванні стрічкою

Короткочасність термомеханічного впливу при електроконтактному наварюванні з одного боку дозволяє знизити термічний вплив на матеріал покриття і деталі, а з іншого боку – ускладнює забезпечення точності прогнозування якості одержуваного шару. Якісними показниками навареного шару є міцність зчеплення, структурна однорідність, геометричні параметри шару. Термін служби відновленого виробу безпосередньо залежить від міцності зчеплення покриття з деталлю. З метою підвищення міцності зчеплення привареного шару з поверхнею деталі застосовують такий традиційний технологічний захід, як нанесення рельєфу на поверхні деталі [325] або електродного матеріалу, що вимагає введення додаткової операції у технологічний процес відновлення [326]. Важливу роль у формуванні навареного шару та утворенні його міцного зчеплення з поверхнею деталі відіграє зварюваність матеріалів, визначення якої для різнорідних матеріалів на етапі проектування технологічно-

го процесу відновлення дозволяє здійснити раціональний вибір додаткових технологічних прийомів [327]. В процесі експлуатації при низькій міцності зчеплення відбувається відшаровування навареного шару, що визначає пріоритетний напрямок при розробці технології електроконтактного наварювання, а також оптимальних режимів процесу з урахуванням відповідних технологічних рекомендацій. Таким чином, актуальною є задача розробки технологічних заходів щодо підвищення міцності зчеплення покриття з деталлю при одночасному забезпеченні необхідних експлуатаційних характеристик покриття.

Одним із широко відомих способів підвищення міцності зчеплення шару, що приварюється, з поверхнею деталі є інтенсифікація процесу наварювання за рахунок збільшення коефіцієнту тертя в зоні контакту деталі з електродним матеріалом за рахунок створення протилежно спрямованого моменту обертання при протіканні імпульсу струму [328]. Істотний вплив на зміну коефіцієнту тертя в зоні електроконтактного наварювання чинить асиметрія процесу за рахунок контрольованої зміни кінематичних (швидкість обертання ролика-електроду та виробу), трибологічних (зміна коефіцієнту контактного тертя за рахунок відмінності шорсткості поверхонь, що знаходяться у контакті) та фізико-механічних параметрів (зміна температури по перетину осередку деформації). Найбільш керованим і ефективним з точки зору впливу на зміну коефіцієнту асиметрії є співвідношення лінійних швидкостей ролика-електроду та виробу, що при створенні кінематичної асиметрії дозволяє збільшити коефіцієнт тертя.

Електроконтактне наварювання електродними матеріалами характеризується силовим і термічним активуванням поверхні деталі та матеріалу, що приварюється [115, 328]. Відповідно до базових принципів механіки технологічного спадкування носієм спадкової інформації навареного шару є осередок термодформації, що утворюється в зоні контакту шару, що приварюється, та ролику-електроду. Для визначення раціональних технологічних режимів електроконтактного наварювання незалежно від властивостей та форми матеріалу [330, 331] необхідно дослідити характер впливу основних технологічних факторів на напружено-деформований стан матеріалу в осередку взаємодії. Це необхідне для створення методології керування проце-

сом електроконтактного наварювання, яка спрямована на програмоване формування робочого шару на поверхні відновлюваної деталі з необхідним рівнем фізико-механічних характеристик.

Математичну модель процесу електроконтактного наварювання деталей типу «вал» розроблено на основі числового рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умов статичної рівноваги виділених елементарних об'ємів [330, 332-334] вздовж зони пластичної деформації $a_1c_1c_2a_2$, розділеної на скінчене число елементарних об'ємів (рис. 5.1).

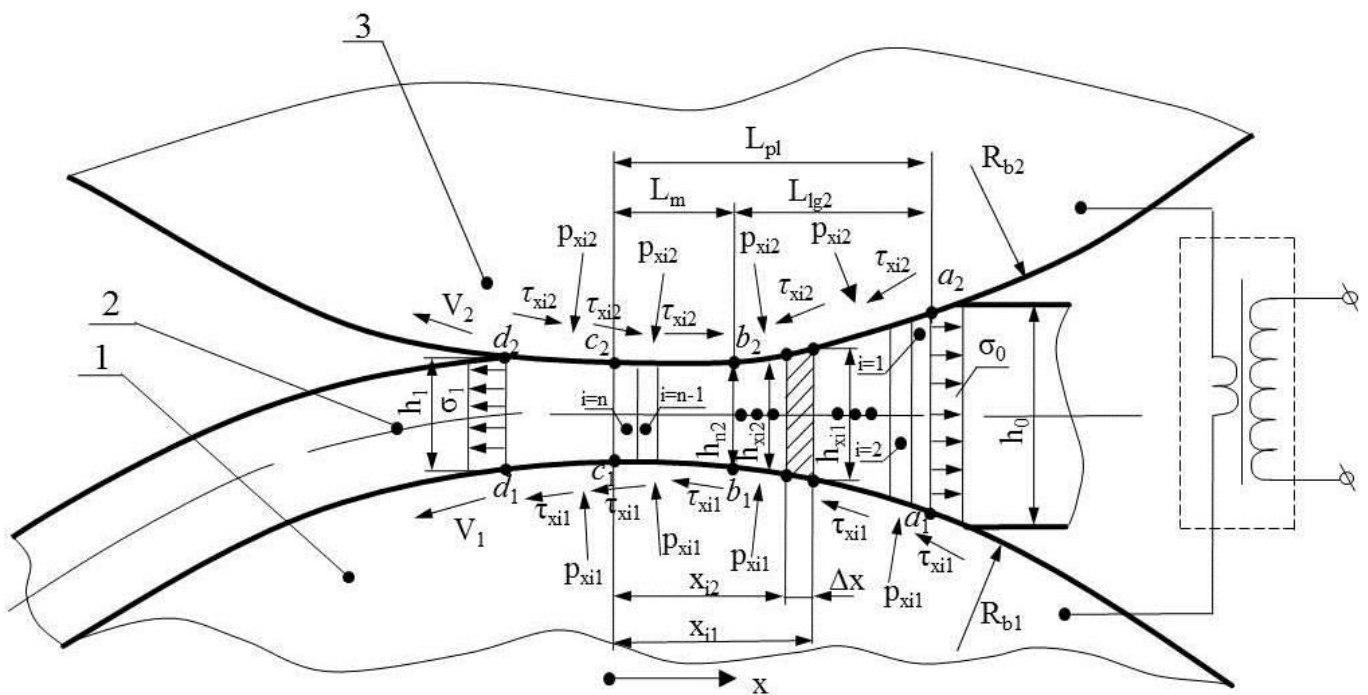


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема для процесу електроконтактного наварювання деталей типу «вал» (1 – відновлювана деталь, 2 – електродний матеріал, 3 – ролик-електрод)

Згідно зі специфікою умов реалізації досліджуваної технології необхідно відмітити, що коллові швидкості обертання деталі 1 і електродного матеріалу 2 на виході з осередку пластичної деформації є рівними, тобто $V_2 = V_1$ [335, 336]. Отже, на поверхні деталі присутня тільки зона відставання $L_{lg1} = L_{pl}$. Напрямок дотичних контактних напружень τ_{x1} співпадає з напрямком процесу наварювання в цій зоні. Колова швидкість ролика-електроду V_2 трохи нижча швидкості V_1 згідно з припущеннями

[337]. Коефіцієнт кінематичної асиметрії характеризується співвідношенням $V_2=V_1/K_v$. Це приводить до утворення зони відставання L_{lg2} на ролику-електроді. Також присутня змішана зона L_m , в якій дотичні контактні напруження τ_{x2} спрямовані протилежно процесу наварювання (див. рис. 5.1).

Окрім вказаних вище, було прийнято ще низку припущень, основними з яких є наступні:

- деформація електродного матеріалу 2 (див. рис. 5.1) є пласкою й усталеною у часі. Кінематика пластичної течії матеріалу підлягає гіпотезі пласких перетинів. Нормальні осьові напруження σ_{xi} та показники подвійного опору зсуву $2K_{xi}$ змінюються тільки вздовж зони пластичного формозмінення;

- вздовж кожного виділеного i -го елементарного об'єму (рис. 5.2), поточні значення товщин $h_{xi}=h_{xi1}\dots h_{xi2}$, нормальних контактних $p_{xi} = p_{xi1}\dots p_{xi2}$ та дотичних контактних напружень $\tau_{x2i1} = \tau_{x2i1}\dots \tau_{x2i2}$ змінюються лінійно;

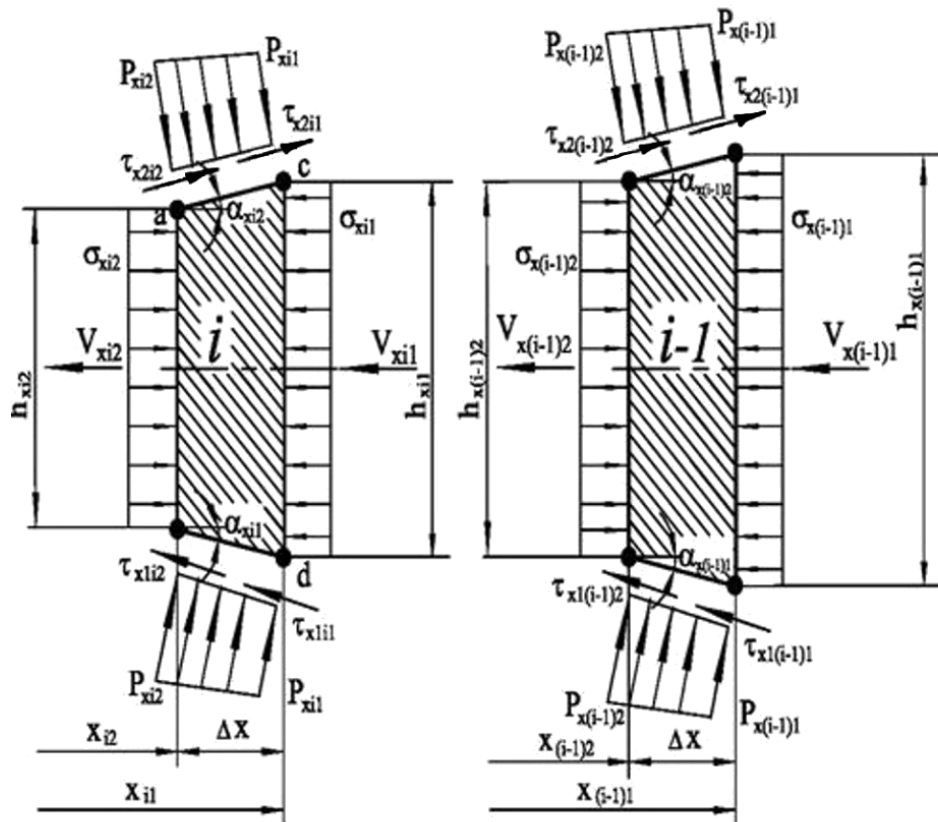


Рисунок 5.2 – Розрахункові схеми елементарних об'ємів стосовно математичного моделювання напружено-деформованого стану електродного матеріалу

- аналітичні описи дотичних контактних напружень τ_{xi1} , τ_{xi2} підлягають закону пластичного тертя, запропонованого Зібелем, та мають наступний вигляд:

$$\tau_{x1} = 2K_x \mu_{x1}; \tau_{x2} = 2K_x \mu_{x2}, \quad (5.1)$$

Величину подвійного опору зсуву електродного матеріалу визначено з урахуванням поточних значень ступеню, швидкості та температури деформації. Поточне значення коефіцієнтів пластичного тертя залежить від геометричної координати x наступним чином:

$$\mu_{x1} = \mu_{01} (x / L_{pl})^{a_{\mu 1}}; \quad (5.2)$$

$$\mu_{x2} = \mu_{02} [(x - L_m) / (L_{pl} - L_m)]^{a_{\mu 2}} \text{ при } L_m \leq x \leq L_{pl}; \quad (5.3)$$

$$\mu_{x2} = -\mu_{02} [(L_m - x) / L_m]^{a_{\mu 2}} \text{ при } 0 \leq x \leq L_m; \quad (5.4)$$

- наявність зони пружної деформації електродного матеріалу в перетинах на вході в осередок, а також наявність інерційних складових умови рівноваги, через їх незначний вплив не враховуємо;

- аналітичний опис поточного значення товщини h_x вздовж зони пластичної деформації L_{pl} може бути представлено у вигляді залежності:

$$h_x = h_1 + (h_0 - h_1) (x / L_{pl})^{a_h}, \quad a_h \approx 2 \quad (5.5)$$

- загальна довжина зони пластичної деформації L_{pl} , величина кроку її розбивки Δx , геометричні координати початкового x_{i1} та кінцевого x_{i2} граничних перетинів для виділеного i -го елементарного об'єму, а також довжина змішаної зони L_m можуть бути визначені як:

$$L_{pl} = \sqrt{2R_{b1}R_{b2}(h_0 - h_1) / (R_{b1} + R_{b2}) - (h_0 - h_1)^2 / 4}; \Delta x = L_{pl} / n; \quad (5.6)$$

$$x_{i1} = L_{pl} - \Delta x(i-1); x_{i2} = x_{i1} - \Delta x; h_{n2} = h_1 V_{b1} / V_{b2} = h_1 K_v; \quad (5.7)$$

$$L_m = \sqrt{2R_{b1}R_{b2}(h_{n2} - h_1)/(R_{b1} + R_{b2}) - (h_{n2} - h_1)^2 / 4}. \quad (5.8)$$

З урахуванням характеру прийнятих припущень і кінцево-різнецевої форми запису основних компонент напружено-деформованого стану (див. рис. 5.2), умова статичної рівноваги для обраного i -го елементарного об'єму при проектуванні всіх зусиль на ось X має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} & \sigma_{xi2}h_{xi2} - \sigma_{xi1}h_{xi1} + (p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2})/2 + \\ & + (2K_{xi1}\mu_{xli1} + 2K_{xi2}\mu_{xli2})\Delta x/2 + (2K_{xi1}\mu_{x2i1} + 2K_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 = 0, \end{aligned} \quad (5.9)$$

де σ_{xi2} , σ_{xi1} і p_{xi2} , p_{xi1} – позитивні значення нормальних компонент тензору напружень, які відповідають напруженням стискання. Протинапрявленість дотичних контактних напружень τ_{x2} враховано знаками в аналітичних описах (5.3) - (5.4) поточних значень коефіцієнту пластичного тертя μ_{x2} .

Поточні показники подвійного опору зсуву $2K_{xi1}$, K_{xi2} визначено з використанням загальноприйнятих методів. Значення компонентів Δx , h_{xi1} , h_{xi2} , μ_{xli1} , μ_{xli2} , μ_{x2i1} , μ_{x2i2} розраховані згідно (5.2) - (5.8). Виходячи з рекурентної схеми постановки рішення, компоненти напруженого стану σ_{xi1} , p_{xi1} є відомими згідно з результатами розрахунками попереднього ($i-1$) елементарного об'єму (див. рис. 5.2). Співвідношення (5.9) являє собою рівняння з двома невідомими величинами σ_{xi2} , p_{xi2} , яке, дотримуючись інженерного варіанту умови пластичності, може бути перетворене як:

$$\begin{aligned} & (p_{xi2} - 2K_{xi2})h_{xi2} - \sigma_{xi1}h_{xi1} + (p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2})/2 - \\ & - (2K_{xi1}\mu_{xli1} + 2K_{xi2}\mu_{xli2})\Delta x/2 - (2K_{xi1}\mu_{x2i1} + 2K_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 = 0. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Співвідношення (5.10) може бути вирішене тільки для невідомої величини p_{xi2} . В остаточному вигляді після відповідних математичних перетворень отримаємо:

$$p_{xi2} = \{2(\sigma_{xi1}h_{xi1} + 2K_{xi2}h_{xi2}) - p_{xi1}(h_{xi1} - h_{xi2}) + [2K_{xi1}(\mu_{x1i1} + \mu_{x2i2}) + 2K_{xi2}(\mu_{x2i1} + \mu_{x2i2})]\Delta x\} / (h_{xi1} + h_{xi2}), \quad (5.11)$$

де σ_{xi2} – нормальні осьові напруження в зоні пластичної деформації, які, згідно з інженерним варіантом умови пластичності, можуть бути визначені як:

$$\sigma_{xi2} = p_{xi2} - 2K_{xi2} \quad (5.12)$$

В якості напрямку рекурентної схеми рішення використовували напрямок переміщення електродного матеріалу. Враховуючи це, початкові умови для першого $i = 1$ елементарного об'єму та умови зв'язку при переході від розрахунку i до розрахунку $(i + 1)$, були прийняті в наступній формі:

$$x_{i1}|_{i=1} = L_{pl}; h_{xi1}|_{i=1} = h_0; \mu_{x1i1}|_{i=1} = \mu_{01}; \mu_{x2i1}|_{i=1} = \mu_{02}; \sigma_{xi1}|_{i=1} = -\sigma_0; p_{xi1}|_{i=1} = 0,0; \quad (5.13)$$

$$x_{(i+1)1} = x_{i2}; h_{x(i+1)1} = h_{xi2}; \mu_{x1(i+1)1} = \mu_{x1i2}; \mu_{x2(i+1)1} = \mu_{x2i2}; \sigma_{x(i+1)1} = \sigma_{xi2}; p_{x(i+1)1} = p_{xi2}. \quad (5.14)$$

Під час розрахунку локальних характеристик напружено-деформованого стану в рамках зон пластичного змінення електродного матеріалу шляхом числового інтегрування аналогічно з [338] виконували визначення зусилля P і моментів M_1, M_2 процесу електроконтактного наварювання:

$$P = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1} + p_{xi2}) \Delta x / 2 \right] b; \quad (5.15)$$

$$M_1 = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1} \mu_{x1i1} + p_{xi2} \mu_{x1i2}) \Delta x / 2 \right] b R_{b1}; \quad (5.16)$$

$$M_2 = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1} \mu_{x2i1} + p_{xi2} \mu_{x2i2}) \Delta x / 2 \right] b R_{b2}. \quad (5.17)$$

Моделювання теплового стану електродного матеріалу в термодформаційному осередку при електроконтактному наварюванні проводили, представляючи електродний матеріал у вигляді необмеженої пластини [339]. Процес нагріву розраховано згідно з теорією теплопровідності. Електродний матеріал знаходиться в тепловій рівновазі з навколишнім середовищем, тобто температура електродного матеріалу дорівнює температурі навколишнього середовища T_0 . Теплообмін між поверхнями електродного матеріалу та поверхневого шару деталі в термодформаційній зоні відбувається за законом Ньютона. Вважаємо, що початок координат розташовано всередині електродного матеріалу. Тоді r – половина товщини електродного матеріалу, тобто $r = h_{xi1}/2$. Для визначення розподілу тепла в будь-який момент часу необхідно вирішити диференціальне рівняння теплопровідності Лапласу:

$$\frac{\partial T_m(y,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_m(y,t)}{\partial y^2}; \quad (5.18)$$

$$(t > 0; -r < y < r)$$

при початкових та граничних умовах:

$$T_m(y,0) = T_0; \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial T_m(0,t)}{\partial y} = 0. \quad (5.20)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_m(r,t)}{\partial y} + \alpha [T(t) - T_m(y,t)] = 0, \quad (5.21)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

α – коефіцієнт теплообміну.

Враховуючи, що $T(t)$ є лінійною функцією часу, то граничну умову (5.21) можна отримати у вигляді:

$$-\frac{\partial T_m(r,t)}{\partial y} + \frac{\alpha}{\lambda} [T_o + gt - T_m(r,t)] = 0. \quad (5.22)$$

Задача (5.18) – (5.22) може бути вирішена операційним методом за допомогою перетворення Лапласу:

$$L\left[\frac{\partial T_m(y,t)}{\partial t}\right] = L\left[a \frac{\partial^2 T_m(y,t)}{\partial y^2}\right], \quad (5.23)$$

де

$$L[T_m(y,t)] = \int_0^{\infty} T_m(y,t) e^{-st} dt = T_L(y,s). \quad (5.25)$$

Диференційне рівняння теплопровідності з урахуванням початкової умови (5.19) після перетворення Лапласу може бути вирішено як:

$$T_L''(y,s) - \frac{s}{a} T_L(y,s) + \frac{T_o}{a} = 0 \quad (5.25)$$

Рішення диференційного рівняння (5.25) для зображення $T_L(y,s)$ може бути

знайдене як:

$$T_L(y, s) - \frac{T_o}{s} = A \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a}} y\right) + B \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a}} y\right), \quad (5.26)$$

де A, B – константи, які визначаються з граничних умов (5.20), (5.21).

За умовою симетрії (5.20):

$$T_L'(0, s) = \left[A \sqrt{\frac{s}{a}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a}} y\right) + B \sqrt{\frac{s}{a}} \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a}} y\right) \right]_{y=0} = B \sqrt{\frac{s}{a}} = 0, \quad (5.27)$$

де $B=0$.

Гранична умова (5.21) для зображення матиме вигляд:

$$-T_L'(r, s) + \frac{\alpha T_o}{\lambda s} + \frac{\alpha g}{\lambda s^2} - \frac{\alpha}{\lambda} T_L(r, s) = 0, \quad (5.28)$$

$$L\left[\frac{\alpha}{\lambda} g t\right] = \frac{\alpha g}{\lambda s^2}. \quad (5.29)$$

З урахуванням $B=0$ вираз (5.26) може бути представлено у вигляді:

$$-A \sqrt{\frac{s}{a}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a}} r\right) + \frac{\alpha T_o}{\lambda s} + \frac{\alpha g}{\lambda s^2} - \frac{\alpha T_o}{\lambda s} - A \frac{\alpha}{\lambda} \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a}} r\right) = 0. \quad (5.30)$$

Звідси визначаємо постійну A :

$$A = \frac{g}{s^2 \left[ch\left(\sqrt{\frac{s}{a}}r\right) + \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{s}{a}} sh\left(\sqrt{\frac{s}{a}}r\right) \right]}. \quad (5.31)$$

Таким чином, рішення для зображення буде наступним:

$$T_L(y, s) - \frac{T_o}{s} = \frac{gch\left(\sqrt{\frac{s}{a}}y\right)}{s^2 \left[ch\left(\sqrt{\frac{s}{a}}r\right) + \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{s}{a}} sh\left(\sqrt{\frac{s}{a}}r\right) \right]} = \frac{\Phi_1(s)}{\Phi_2(s)}. \quad (5.32)$$

Рішення (5.32) є відношенням двох узагальнених поліномів відносно s . Крім того, поліном $\Phi_2(s)$ не містить константи, тобто рішення задовольняє умовам теореми розкладання. Таким чином, її можна застосовувати для рішення початкового рівняння. Теорему розкладання можна записати так:

$$L^{-1} \left[\frac{\Phi_1(s)}{\Phi_2(s)} \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_1(s_n)}{\Phi_2'(s_n)} e^{s_n t}, \quad (5.33)$$

де S_n – корені поліному $\Phi_2(s)$.

Якщо $\Phi_2(s)=0$, то корені приймуть вигляд: $s_0=0$ – двократний корінь; $s_n = -a\mu_n^2 / r^2$, де $\mu_n = i\sqrt{\frac{s}{a}}r$ – прості корені, що визначаються з характеристичного рівняння:

$$ctg\mu = \mu_n / Bi, \quad (5.34)$$

де $Bi = \frac{\alpha r}{\lambda}$ – критерій Біо [334].

Згідно з теоремою розкладання:

$$L^{-1}\left[\frac{\Phi_1(0)}{\Phi_2(0)}\right] = gt + \frac{g}{2a}\left[y^2 - r^2\left(1 + \frac{2\lambda}{\alpha r}\right)\right]. \quad (5.35)$$

Підставляючи інші корені s_n у (5.33), отримаємо:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_1(s_n)}{\Phi_2'(s_n)} e^{s_n t} = \frac{gr^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{(\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)} \cdot \frac{1}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{y}{r}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{at}{r^2}\right). \quad (5.36)$$

Таким чином, рішення задачі одержимо в наступному вигляді:

$$T_m(y, t) - T_o = gt - \frac{g}{2a}\left[r^2\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) - y^2\right] + \frac{gr^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{y}{r}\right) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (5.37)$$

де $Fo = at / r^2$ – критерій Фур'є [340];

A_n – початкові теплові амплітуди, що визначаються зі співвідношення:

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}. \quad (5.38)$$

Вираз (5.35) дозволяє розрахувати температуру $T_m(y, t)$ у будь-якій точці електродного матеріалу в термодформаційному осередку. Інтенсивність підвищення температури характеризується швидкістю, що називається критерієм Преводителява [340]:

$$Pd = \left(\frac{dT}{dFo}\right)_{\max}. \quad (5.39)$$

Якщо $T(t) = T_o + gt$, тоді:

$$Pd = \frac{gr^2}{a}. \quad (5.40)$$

Тоді рішення може бути представлене в наступному вигляді:

$$\frac{\Delta T_m}{Pd} = \frac{T_m(y,t) - T_o}{Pd} = Fo - 0,5 \left(1 + \frac{2}{Bi} - \frac{y^2}{r^2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos(\mu_n \frac{y}{r}) \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (5.41)$$

Таким чином, відносна температура у будь-якій точці електродного матеріалу в термодформаційному осередку є функцією безрозмірних величин Fo , Bi , y/r [341]. На осі електродного матеріалу, тобто при $y = 0$, (5.41) приймає вигляд:

$$\frac{\Delta T_m}{Pd} = Fo - 0,5 \left(1 + \frac{2}{Bi} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (5.42)$$

В цій точці температура електродного матеріалу мінімальна [276, 342].

Знаючи розподіл температурних полів вздовж електродного матеріалу в термодформаційному осередку, можна обчислити необхідну силу струму:

$$I = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\frac{T \pi^2 x_i h_{xi} \lambda c g}{r \delta t_i}} \quad (5.43)$$

При розрахунку процесу електроконтактного наварювання стрічками плоских деталей алгоритм розрахунку матиме аналогічний вигляд з урахуванням умови $R_{b1} \rightarrow \infty$. Представлена сукупність аналітичних описів склала повний алгоритм з числового одномірного математичного моделювання процесу електроконтактного наварювання деталей типу тіл обертання. Особливістю запропонованої математичної моделі є коректне урахування розподілу теплових характеристик електродного матеріалу вздовж термодформаційного осередку, що відіграє важливу роль у формуванні з'єднання в процесі наварювання.

5.2. Аналіз термдеформаційних процесів при формуванні навареного шару

На основі представленої кінцево-різницевої моделі складено блок-схему й розроблено програмні засоби (Додаток А) для розрахунку енергосилових і теплових параметрів режиму електроконтактного наварювання. Укрупнену блок-схему даного алгоритму рішення представлено на рис 3.

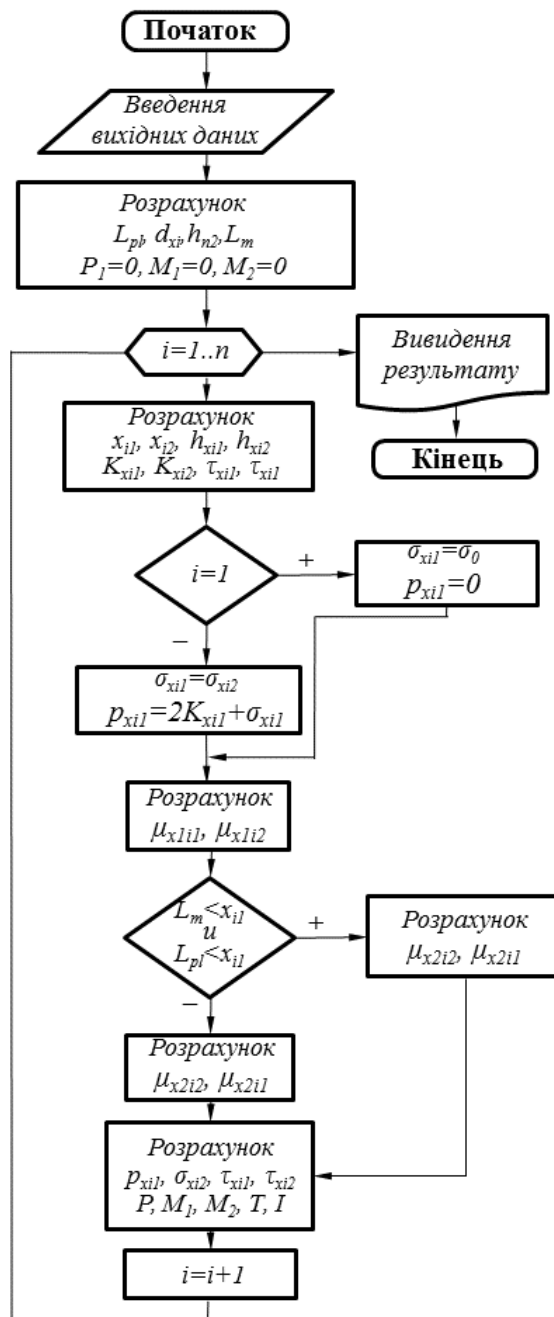


Рисунок 5.3 – Укрупнена блок-схема алгоритму процесу електроконтактного наварювання

В якості прикладу реалізації одержаних програмних засобів [337, 343] на рис. 5.4-5.11 представлено розраховані розподіли локальних і інтегральних характеристик процесу електроконтактного наварювання. Представлені графічні залежності (рис. 5.4-5.6) демонструють вплив коефіцієнту кінематичної асиметрії K_v на зміну локальних енергосилових характеристик процесу.

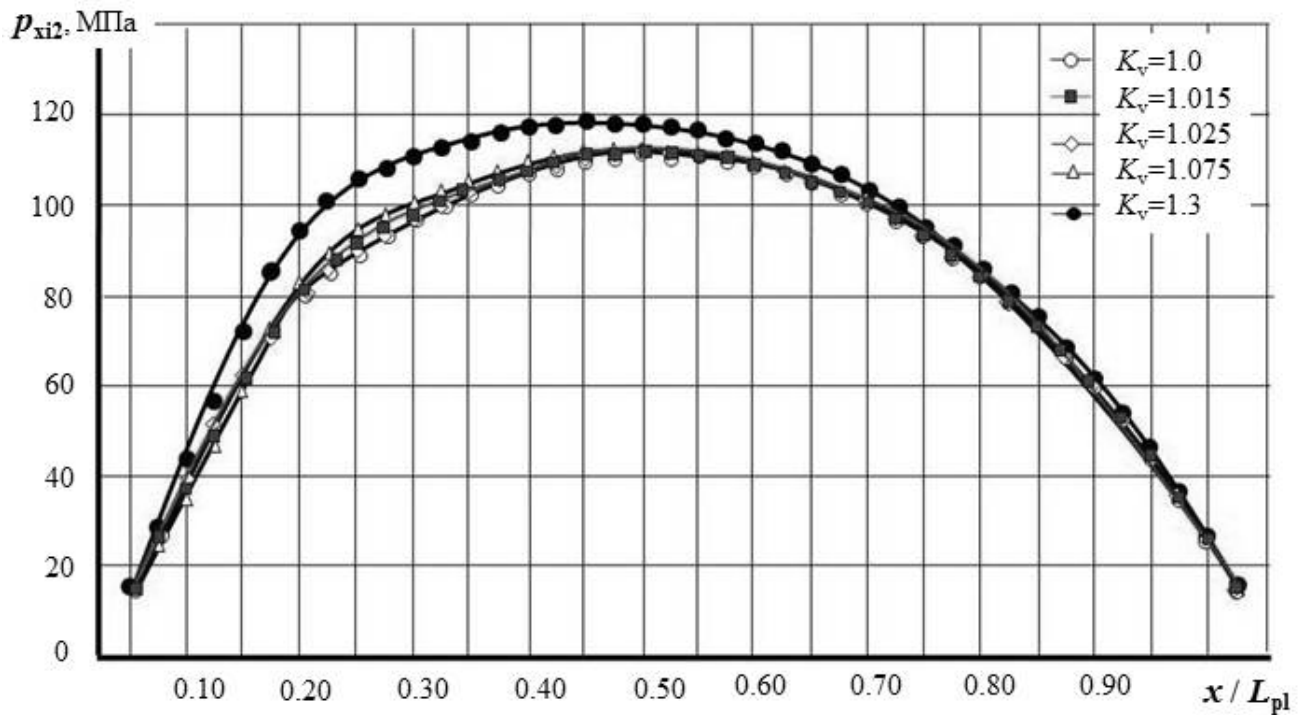


Рисунок 5.4 – Розраховані розподіли нормальних контактних напружень вздовж зони наварювання залежно від коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

Теоретичні дослідження було проведено при різних коефіцієнтах кінематичної асиметрії ($K_v=1,0\dots1,075$), а також при різних значеннях ступеню обтиску ($\varepsilon=0,10\dots0,60$) у процесі електроконтактного наварювання. Представлені результати розрахунків, проведені з використанням розроблених на основі математичної моделі програмних засобів, свідчать про те, що змінення значення коефіцієнту кінематичної асиметрії K_v істотно впливає на процес формозміни навареного шару на поверхні виробу [344]. Для забезпечення оптимального формування навареного шару необхідно задати таке оптимальне значення коефіцієнту кінематичної асиметрії K_v , щоб

досягти збільшення дотичних напружень у зоні контакту електродного матеріалу з деталлю.

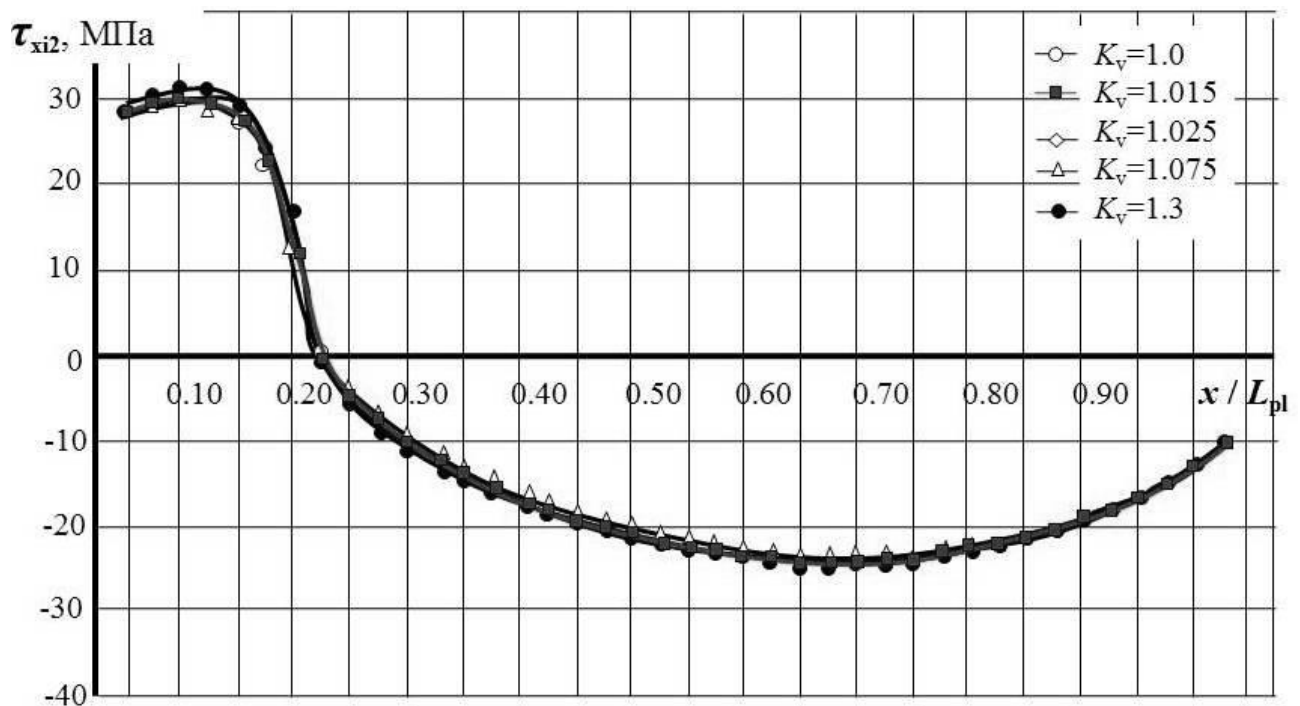


Рисунок 5.5 – Розраховані розподіли дотичних контактних напружень на ролику-електроді вздовж зони наварювання залежно від коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

З графіку (рис.5.6) видно, що максимальні дотичні напруження, а значить і максимальний коефіцієнт тертя в зоні електроконтактного наварювання, спостерігаються при $K_v=1,3$. При рівності лінійних швидкостей ролику-електроду та циліндричного виробу, тобто при відсутності асиметрії процесу електроконтактного наварювання дотичні напруження на ролику-електроді та на виробі тотожні. Збільшення K_v до 1,015 приводить до зростання дотичних напружень в зоні наварювання.

При цьому коефіцієнт тертя на ролику-електроді істотно не змінюється (рис.5.5). Так як дотичні контактні напруження змінюють свій знак залежно від напрямку течії металу, то згідно з графічними залежностями (рис.5.6) також найбільш сприятливі умови для формування навареного шару спостерігатимуться при наявності кінематичної асиметрії в процесі електроконтактного наварювання.

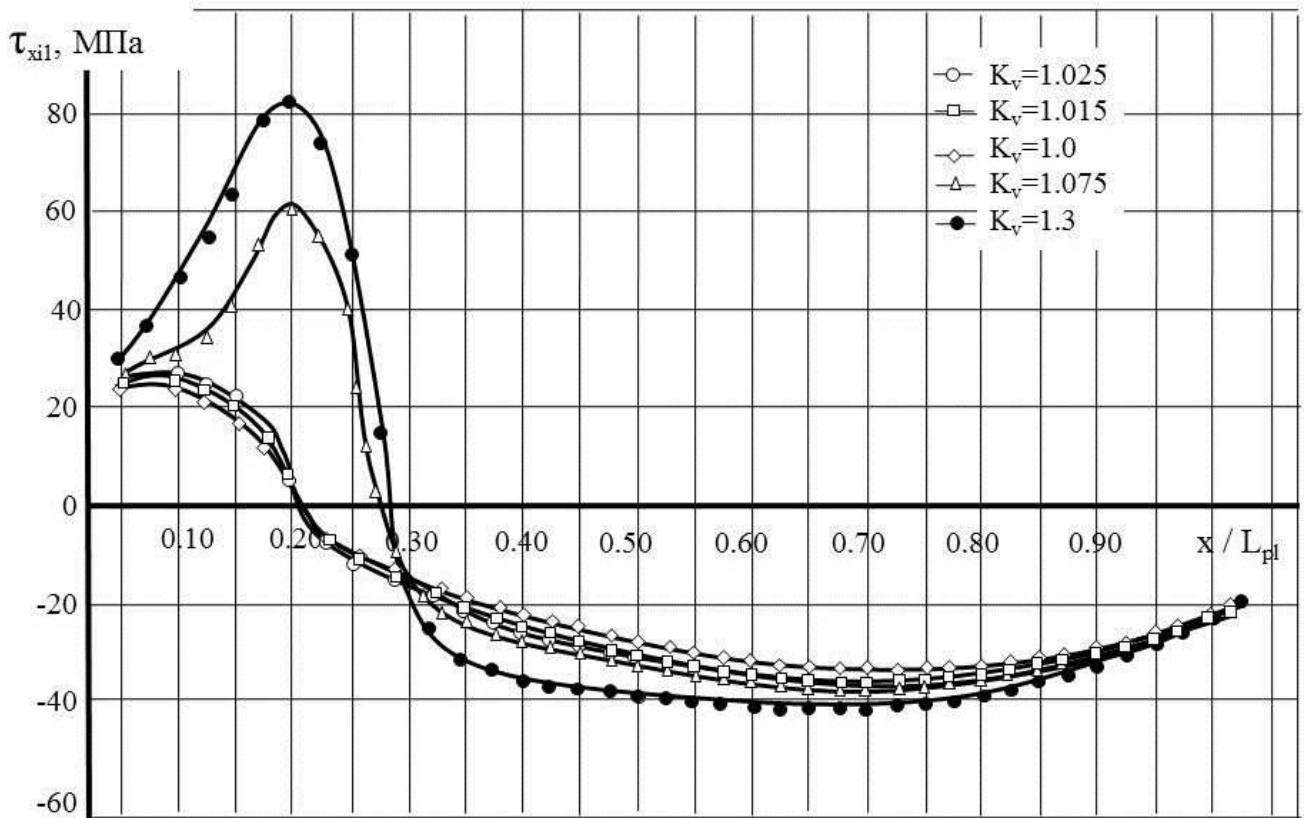


Рисунок 5.6 – Розраховані розподіли дотичних контактних напружень на циліндричній деталі вздовж зони наварювання залежно від коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

Ділянки з максимальними нормальними контактними напруженнями (див.рис.5.4) відповідають нульовим значенням дотичних контактних напружень (див.рис.5.6).

З урахуванням умови зміни значення радіусу деталі на таке, що прагне до безкінечності, проведено розрахунок розподілу дотичних контактних напружень при електроконтактному наварюванні стрічкою плоских деталей (рис.5.7).

Згідно з результатами, одержаними при моделюванні процесу електроконтактного наварювання стрічками плоских деталей, характер зміни дотичних контактних напружень (рис.5.7) залишається аналогічним, як при електроконтактному наварюванні циліндричних деталей (див. рис.5.6).

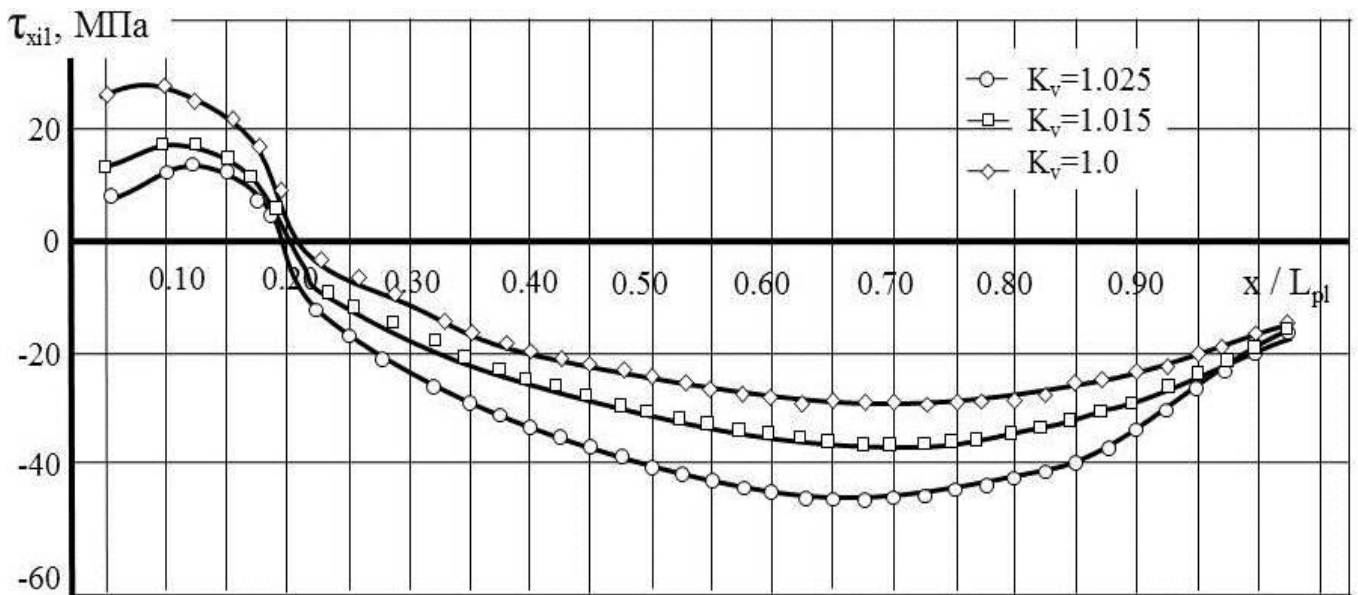


Рисунок 5.7 – Розраховані розподіли дотичних контактних напружень на плоскій деталі вздовж зони наварювання залежно від коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

Значна зміна спостерігається у підвищенні значень дотичних контактних напружень як для симетричного процесу, так і для різних величин коефіцієнту кінематичної асиметрії. Однак вплив коефіцієнту асиметрії на технологічні параметри процесу неоднозначний. З графіків (рис. 5.8-5.10) видно, що зі збільшенням коефіцієнту кінематичної асиметрії змінюється необхідне для формування на поверхні виробу шару заданої товщини зусилля на ролику-електроді, а також момент на ролику-електроді – показники, які залежать від розмірів відновлюваної деталі, а також від товщини шару, що приварюється.

Причому, при $K_v=1,015 - 1,025$ зусилля на ролику-електроді, а також моменти M_1 і M_2 знижуються, а при перевищенні значення 1,075 відбувається зростання енергосилових параметрів. Така закономірність просліджується для всіх графічних залежностей (рис.5.8-5.10) в інтервалі значень ступеню деформації від 0,15 до 0,45.

При ступеню деформації понад 0,45 коефіцієнт асиметрії $K_v=1,015...1,025$ не впливає на зміну енергосилових параметрів.

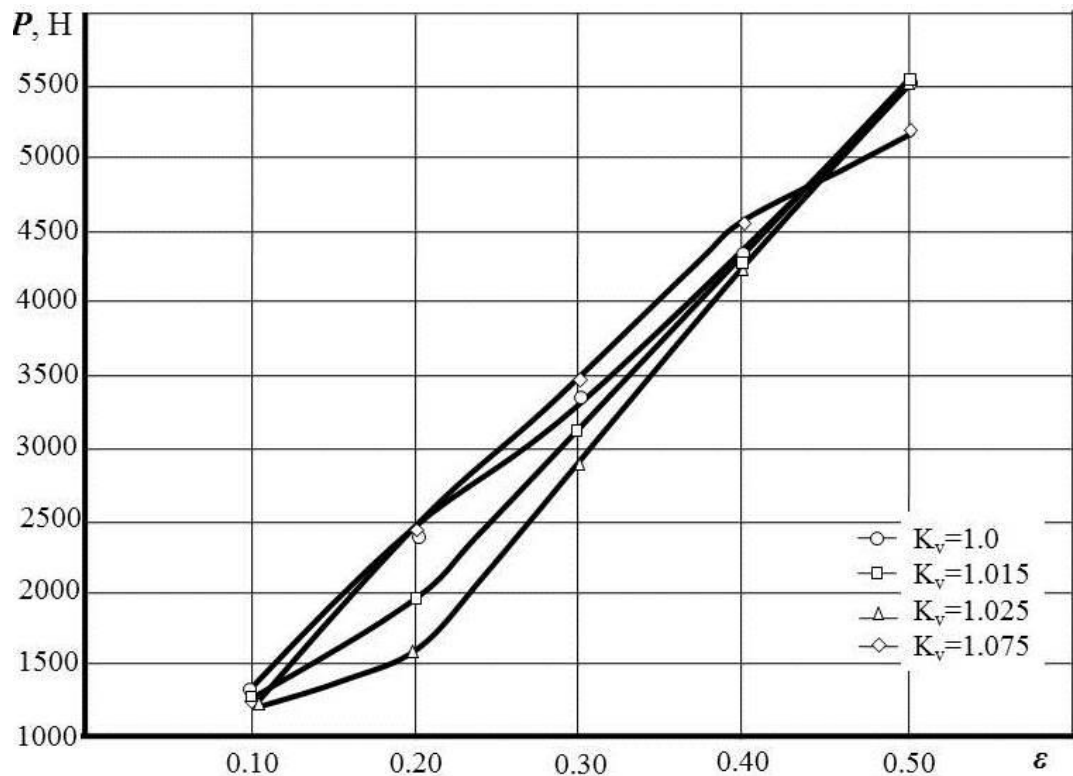


Рисунок 5.8 – Розраховані розподіли зусиль на ролику-електроді залежно від ступеню деформації та коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

Так як вплив енергосилових та теплових параметрів режиму є одночасним при електроконтактному наварюванні, то вказана вище закономірність характерна також і для залежності сили струму від ступеню деформації (рис.5.11). При збільшенні коефіцієнту асиметрії (понад $K_v=1,075$) значення енергосилових і теплових параметрів знижуються тільки при ступеню деформації понад 0,45.

Використання при електроконтактному наварюванні таких значень ступеню деформації може привести до значних структурних змін у привареному шарі, утворенню прожогів, виплесків, виходу на поверхню литої структури.

Крім того, застосування високих ступенів деформації сприяє утворенню прим'ятин на поверхні шару та поверхневому порушенню суцільності, що істотно погіршує зовнішній вигляд готового виробу.

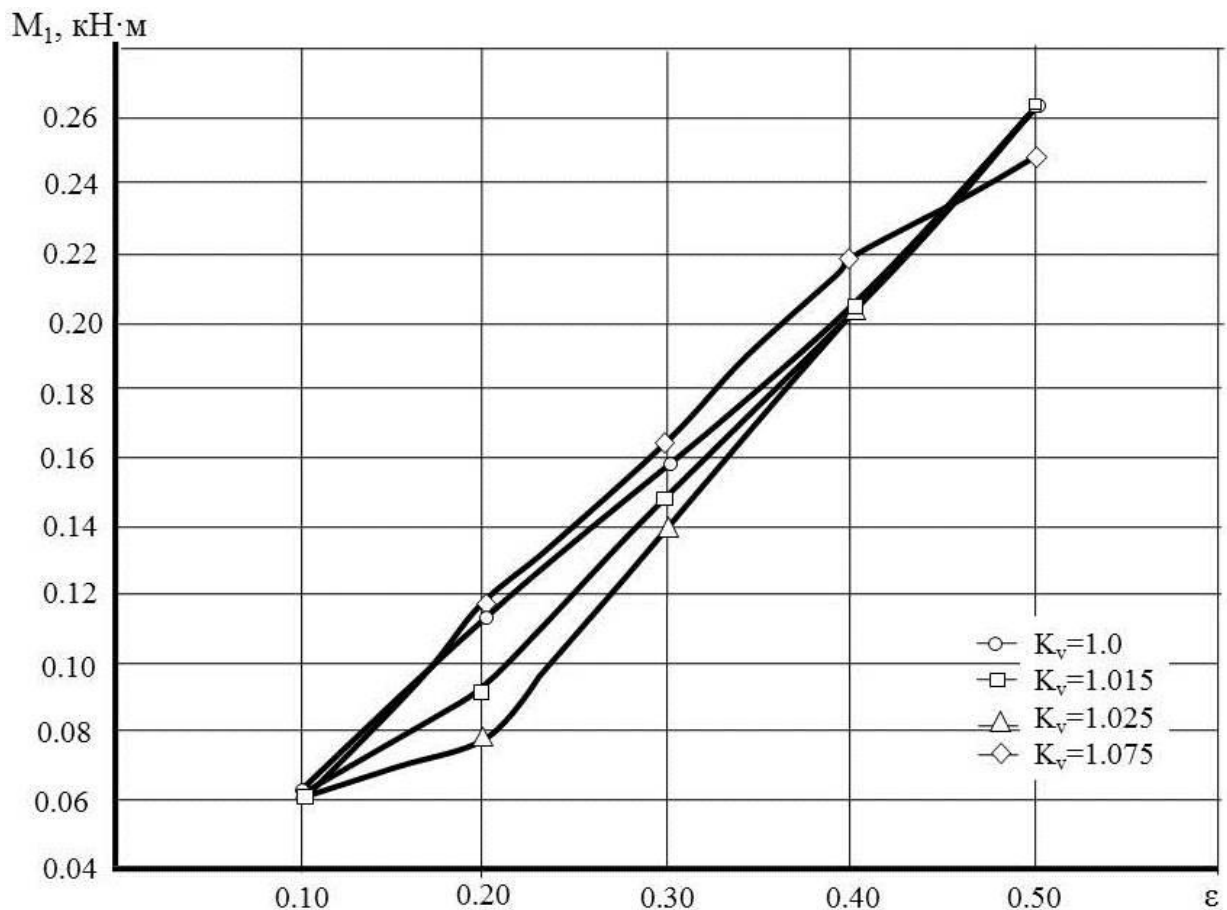


Рисунок 5.9 – Розраховані розподіли моменту на деталі залежно від ступеню деформації та коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

Значущими для умов процесу електроконтактного наварювання є значення ступеню деформації 0,20...0,30. Це забезпечує створення шару на поверхні деталі з необхідними геометричними характеристиками та мінімальним впливом на структуру покриття. Таким чином, для умов електроконтактного наварювання зі ступенем деформації електродного матеріалу 0,15...0,30 застосування коефіцієнту кінематичної асиметрії K_v понад 1,075 є недоцільним через збільшення енергомісткості процесу.

Найбільш раціональним з точки зору якості формування покриття є створення в процесі електроконтактного наварювання кінематичної асиметрії, яка не перевищує значення $K_v = 1,015$.

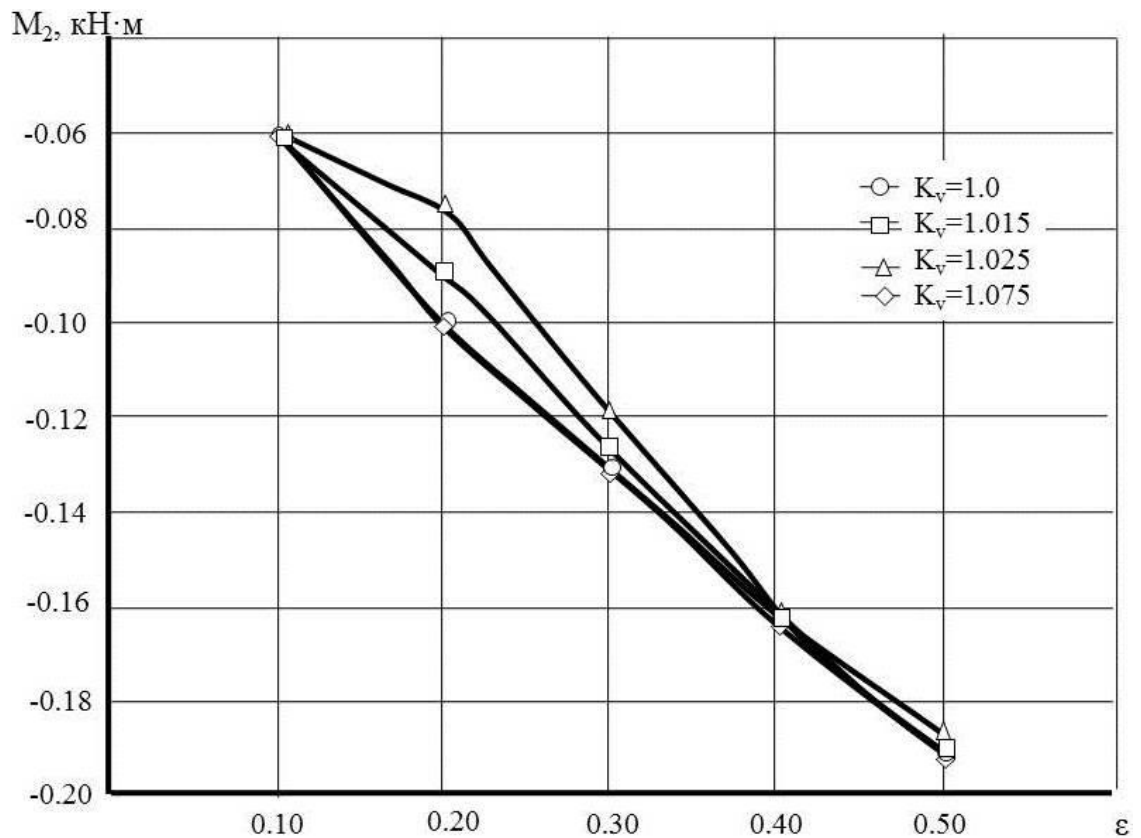


Рисунок 5.10 – Розраховані розподіли моменту на ролику-електроді залежно від ступеню деформації та коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

Це дозволить забезпечити підвищення коефіцієнту тертя в зоні контакту шару, що приварюється, з поверхнею деталі без збільшення енергосилових параметрів. Таке зниження інтегральних характеристик процесу електроконтактного наварювання дозволяє відновлювати більш габаритні вироби при зниженому термомеханічному впливі, що дозволить мінімізувати змінення структури функціонального шару та поверхневого шару основного металу.

На основі розроблених програмних засобів було проведено розрахунок основних технологічних параметрів процесу. З практичної точки зору результати автоматизованого проектування технологічних режимів електроконтактного наварювання дозволяють визначити всі вихідні параметри процесу для одержання заданої товщини привареного на поверхні виробу шару.

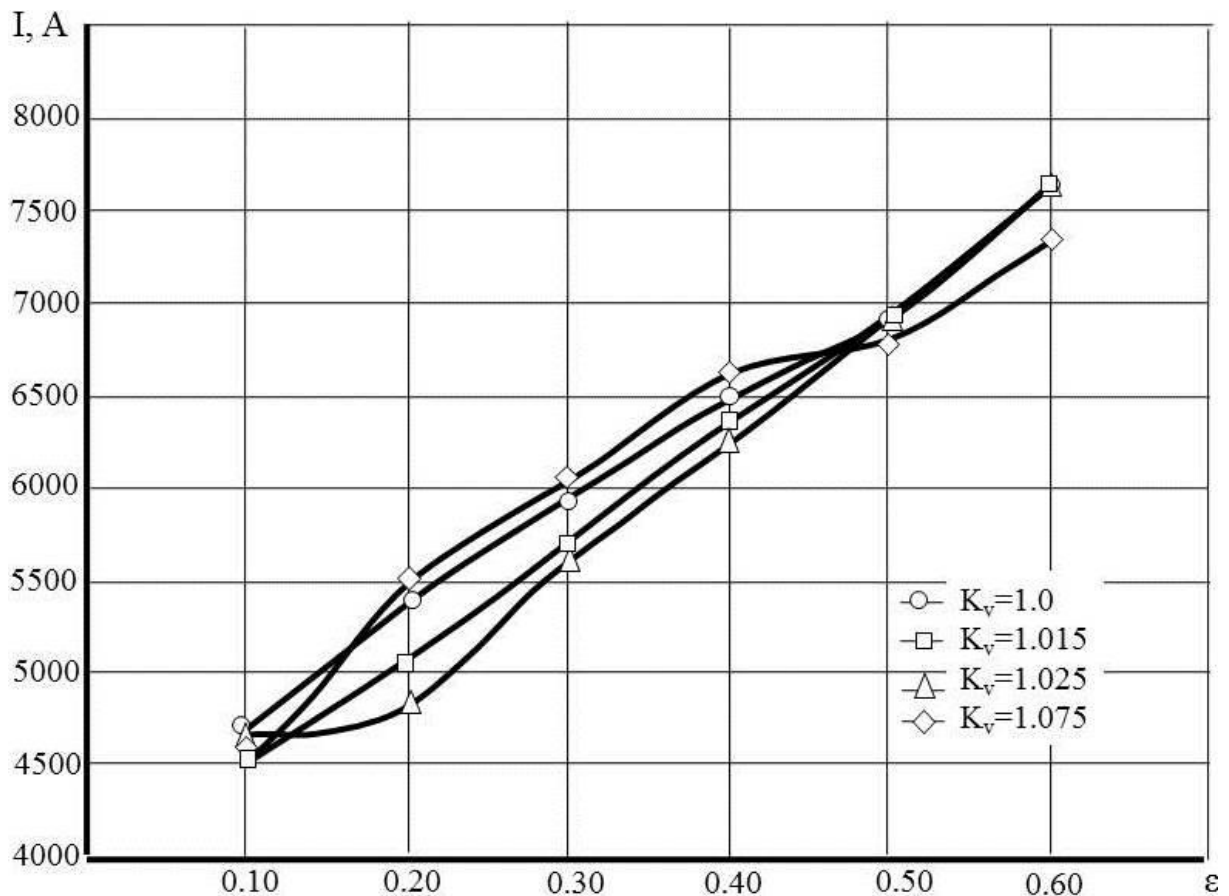


Рисунок 5.11 – Розраховані розподіли сили струму залежно від ступеню деформації та коефіцієнту кінематичної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5мм)

Результати автоматизованого розрахунку засилля на ролику-електроді при електроконтактному наварюванні дозволяють обрати необхідний електродний матеріал на етапі проектування процесу відновлення зношених деталей (рис.3.12). Перевірка адекватності одержаних аналітичних описів процесу електроконтактного наварювання виконувалась при наварюванні циліндричних деталей діаметром 50 мм зі сталі марки Ст45 суцільною стрічкою зі сталі 45 на електроконтактній машині шовного типу для роликового зварювання МШ-2201 з номінальною силою струму наварювання 20 кА і максимальним зусиллям стискання 8 кН. Вимірювання зусилля на ролику-електроді було проведено за допомогою тензOMETричних датчиків.

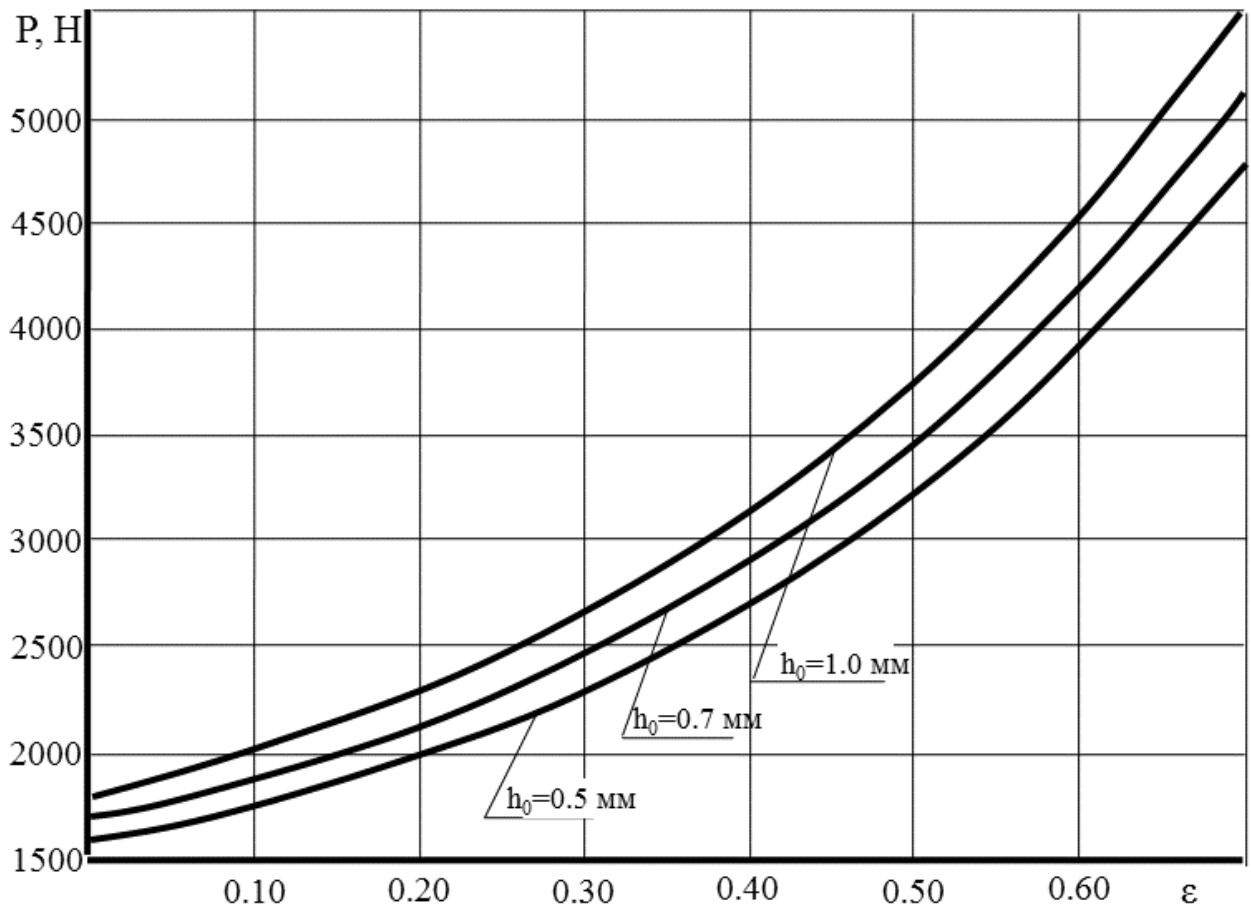


Рисунок 5.12 – Результати автоматизованого проектування зусиль на ролик-електроді залежно від ступеню деформації ($R_1=50$ мм; $\mu_{01}=0,35$; $\mu_{02}=0,35$; $a_1=0,124$; $a_2=0,052$; $a_3=-3,70$; $\sigma_{\tau 0}=60,1$ Н/мм²; $\lambda=0,26$)

Запис реєстрованих параметрів проводили за допомогою ПЕОМ із вбудованим аналого-цифровим перетворювачем, що забезпечує можливість вимірювання за 16-тю диференційованими каналами. Вхідний сигнал у цьому випадку оцифровувався шістнадцятибітним аналого-цифровим перетворювачем із частотою до 100 кГц і можливістю посилення в діапазоні 1...1000.

Осцилограми струму при електроконтактному наварюванні стрічками фіксували за допомогою перетворювача напруження вимірювального Е14-140. Перетворювач призначений для реалізації задач зі зворотнім зв'язком. Моніторинг, запис і аналіз реєстрованих даних протікання процесу проводили за допомогою програмного забезпечення UsbOscilloscope (версія 3.1.2.8) у масштабі 1:20. Результатом нерегульованої взаємодії струму та зусилля на ролик-електроді при електроконтактному наварюванні можуть бути несплавлення, виплески та про-

жоги, утворення яких значно погіршує якість функціонального шару відновлених деталей та експлуатаційну стійкість обладнання.

Результати автоматизованого проектування основних технологічних параметрів режиму електроконтактного наварювання також дозволяють оцінити необхідний ступінь деформації електродного матеріалу у термодформаційному осередку залежно від його вихідних геометричних параметрів (рис.5.13).

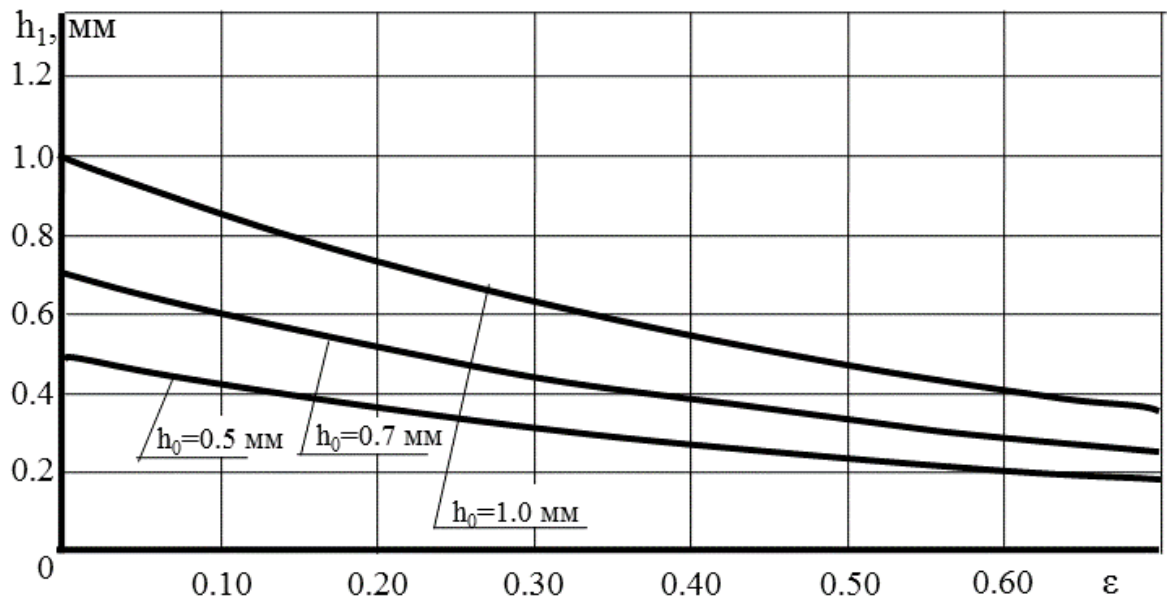
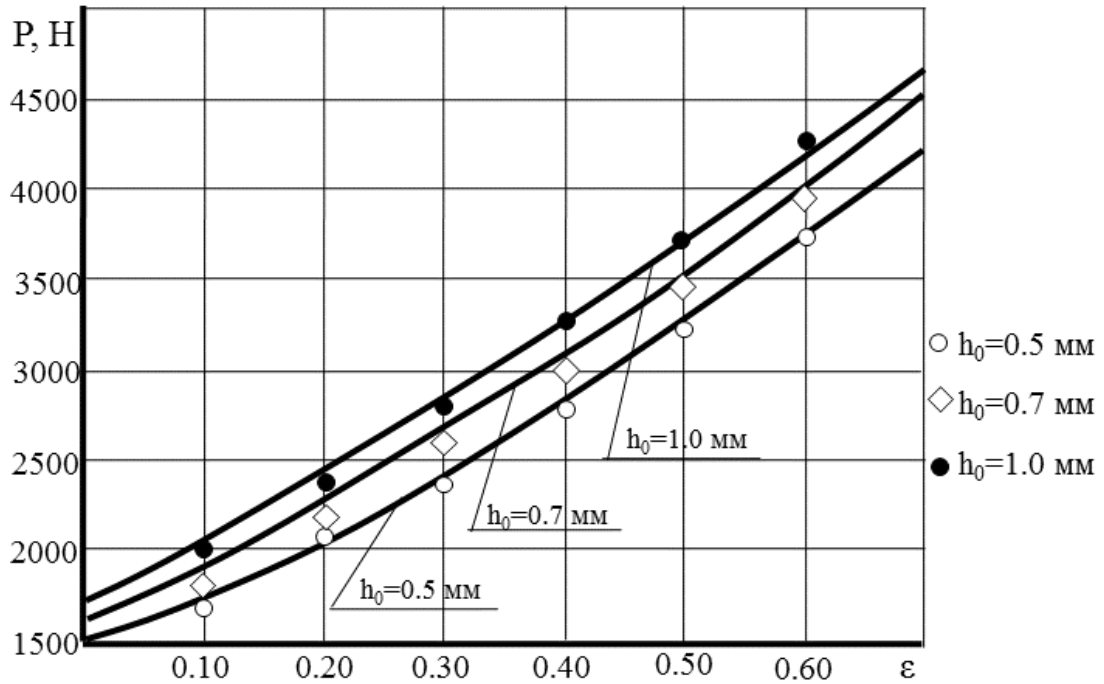
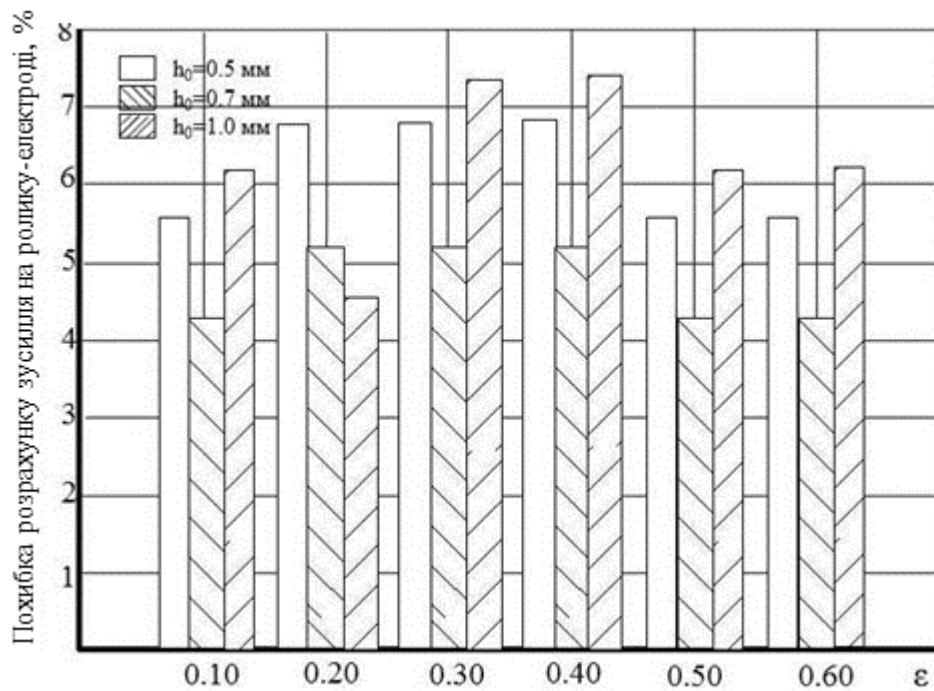


Рисунок 5.13 – Результати автоматизованого проектування кінцевої товщини покриття залежно від ступеню деформації ($R_1=50$ мм; $\mu_{01}=0,35$; $\mu_{02}=0,35$; $a_1=0,124$; $a_2=0,052$; $a_3=-3,70$; $\sigma_{\tau 0}=60,1$ Н/мм²; $\lambda=0,26$)

Результати одержаних в ході експериментальних досліджень даних [343] дозволили зробити висновок про достатню збіжність емпіричних результатів і теоретичних припущень відносно закономірностей протікання процесу (рис.5.14-5.15). Змінення коефіцієнту кінематичної асиметрії є перспективним напрямком керування напружено-деформованим станом електродного матеріалу, що дозволяє регулювати процес формування привареного шару [344]. Оптимальні умови для формування зносостійкого покриття без несплавлінь можуть бути одержані шляхом змінення коефіцієнту кінематичної асиметрії, який залежить від співвідношення лінійних швидкостей ролику-електроду та деталі типу «вал».

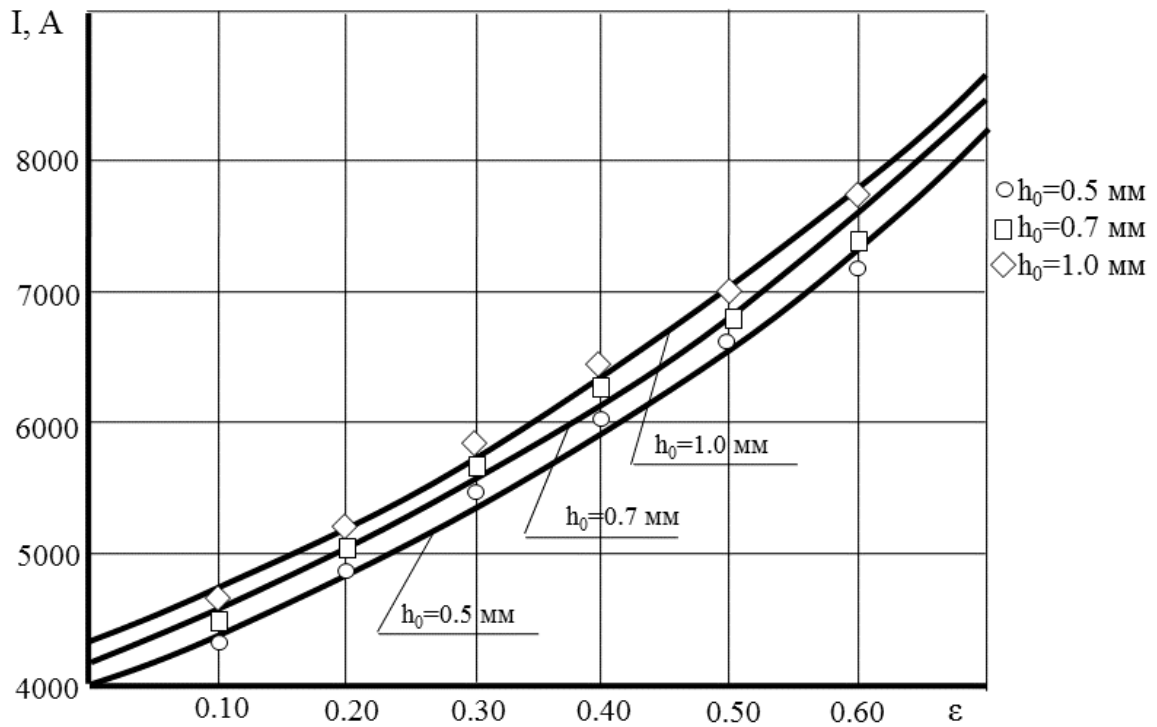


а)

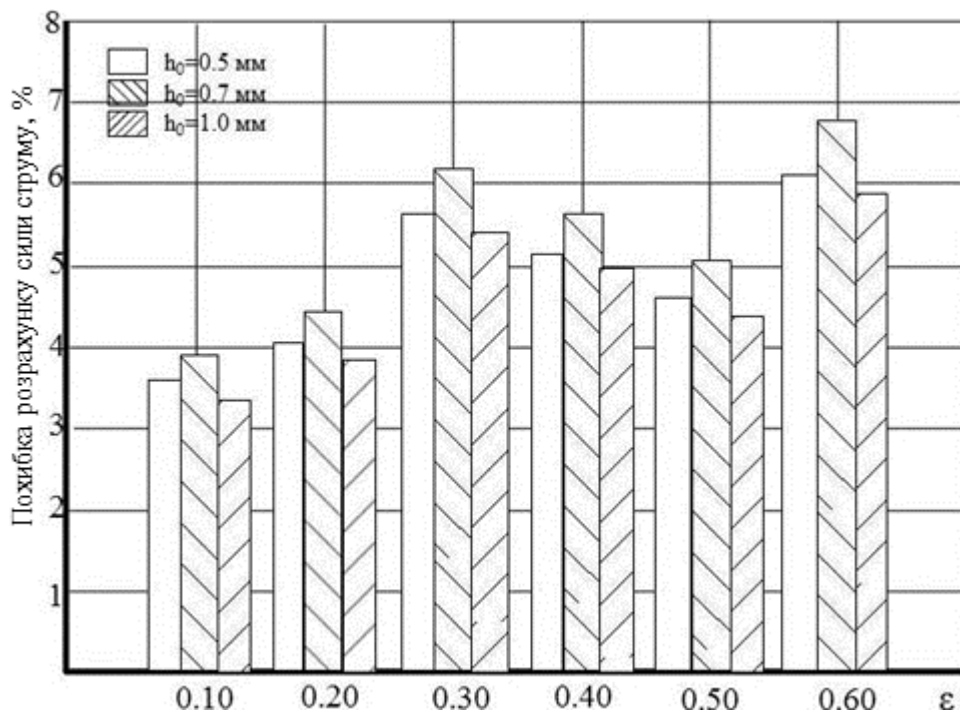


б)

Рисунок 5.14 – Розраховані та експериментальні розподіли зусиль на роликую-електроді ($R_1=50$ мм; $\mu_{01}=0,35$; $\mu_{02}=0,35$; $a_1=0,124$; $a_2=0,052$; $a_3=-3,70$; $\sigma_{\tau 0}=60,1$ Н/мм²; $\lambda=0,26$)



а)



б)

Рисунок 5.15 – Розраховані та експериментальні розподіли сили струму
 ($R_1=50$ мм; $\mu_{01}=0,35$; $\mu_{02}=0,35$; $a_1=0,124$; $a_2=0,052$; $a_3=-3,70$; $\sigma_{\tau_0}=60,1$ Н/мм²; $\lambda=0,26$)

Збільшення коефіцієнту кінематичної асиметрії приводить до зміни напружено-деформованого стану електродного матеріалу в термодформаційному осередку. Підвищення K_v до 1,3 забезпечує значне зростання дотичних напружень в зоні контакту шару, що приварюється, з поверхнею виробу (максимальні значення дотичних напружень $\tau_{x1l}=83,7$ МПа при $K_v=1.3$; $\tau_{x1l}=25,6$ МПа при $K_v=1.0$).

Пропонований технологічний прийом дозволяє збільшити коефіцієнт тертя в зоні приварювання, підвищуючи якість формування покриття.

Коефіцієнт тертя та дотичні напруження на ролику-електроді при цьому практично не змінюються. Таким чином, забезпечується відсутність налипання електродного матеріалу на ролик-електрод, що сприяє збільшенню терміну служби обладнання для електроконтактного наварювання [343].

Однак таке збільшення коефіцієнту асиметрії приводить до зростання енергосилових параметрів процесу. Збільшення зусилля на ролику-електроді та моментів відбувається вже при $K_v=1,075$ (для $\varepsilon=0,30$ при $K_v=1,0$ зусилля на ролику-електроді складає 3400 Н, при $K_v=1,015$ відбувається зниження до 3000 Н, а при $K_v=1,075$ – підвищення до 3500 Н). Найбільш раціональним з точки зору якості формування покриття є створення в процесі електроконтактного наварювання кінематичної асиметрії, яка не перевищує значення $K_v = 1,015$. Регулювання коефіцієнту кінематичної асиметрії дозволяє також розширити технологічні можливості машин для електроконтактного наварювання, обмеження яких пов'язані з габаритами деталей і прикладенням значних електромеханічних потужностей.

Висновки до розділу 5

1. Розроблено математичну модель, яка дозволяє оптимізувати технологічні параметри процесу електроконтактного наварювання деталей. В результаті числової реалізації розробленої моделі було встановлено, що істотно впливає на зміну

енергосилових параметрів процесу співвідношення швидкостей ролику-електроду контактної машини та відновлюваної деталі.

2. Встановлено, що зміна коефіцієнту кінематичної асиметрії значно впливає на формування покриття, що обумовлене збільшенням коефіцієнту тертя. Встановлено, що застосування асиметричного процесу електроконтактного наварювання дозволяє знизити термомеханічний вплив на електродний матеріал в зоні приварювання.

3. Одержані графічні залежності дозволяють визначити вихідні параметри процесу, а саме, силу струму, зусилля на ролику-електроді та вихідну товщину електродного матеріалу залежно від необхідних характеристик привареного шару до початку процесу електроконтактного наварювання.

РОЗДІЛ 6

КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ШАРУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ГІБРИДНОЇ НЕЙРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАВАРЮВАННЯ

6.1. Кінцево-елементне моделювання процесу електроконтактного наварювання стрічкою

Для перевірки прийнятих при проведенні чисельного математичного моделювання процесу електроконтактного наварювання стрічками припущень розроблено кінцево-елементну модель формоутворення покриття при відновленні циліндричних деталей, метою якого є спільного вирішення задачі електричного нагріву та пластичного деформування і приварювання електродної стрічки на поверхню деталі. При моделюванні використано розрахункову схему (рис. 6.1, а).

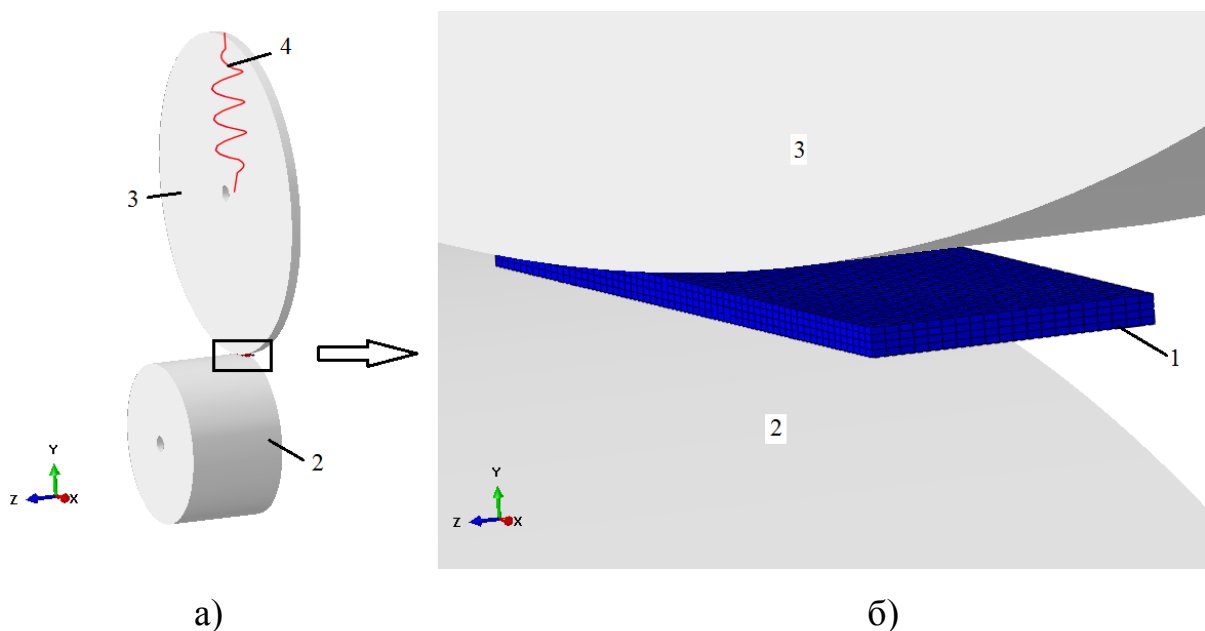


Рисунок 6.1 – Розрахункова схема кінцево-елементної моделі процесу електроконтактного наварювання стрічкою циліндричних деталей: 1 – електродна стрічка; 2 – циліндрична деталь; 3 – ролик-електрод, 4 – пружний елемент, який імітує притискне зусилля ролику-електроду

Для моделювання електродної стрічки використано восьми-вузлові твердотільні редуковані елементи з тривимірним зміщенням, електричним потенціалом та температурою і з контролем руйнування Q3D8R. Дана модель, з метою спрощення та скорочення обсягів обчислень, враховуючи її симетричність відносно площини XY (див. рис. 6.1), являє собою половину задачі. До її складу входять: елемент, що деформується та моделює електродну стрічку, два абсолютно твердих недеформованих тіла, які моделюють відновлювану деталь і ролик-електрод. Крім того, з метою забезпечення притискання ролику-електроду з необхідним для проведення процесу електроконтактного наварювання зусиллям до моделі включено пружний елемент. Контактна взаємодія між роликом-електродом 3 і електродною стрічкою 1 описується законом тертя через коефіцієнт тертя, який представлено в функції температури у відповідності з даними Грудєва [345].

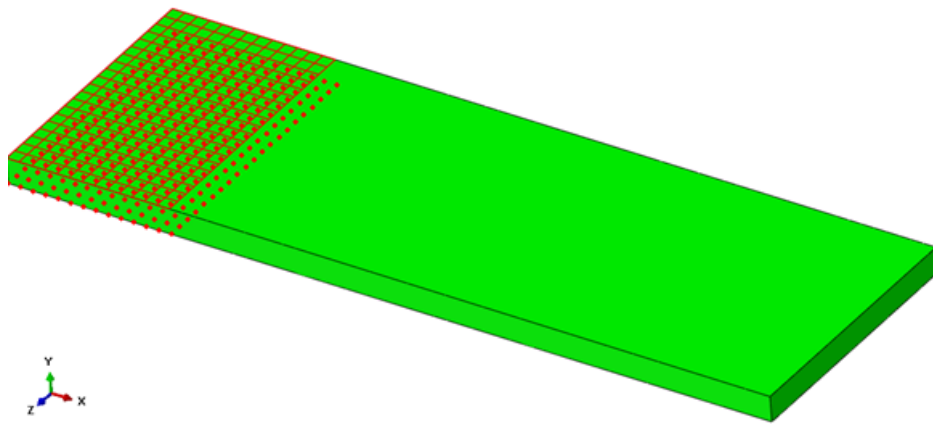
Власне моделювання процесу реалізується в декілька етапів:

- спочатку забезпечується притискання ролику-електроду до стрічки вздовж верхньої лінії передньої торцевої поверхні, що реалізується шляхом зсування верхньої точки закріплення пружного елемента 4 на величину, здатну забезпечити необхідну силу притискання ролику-електроду;

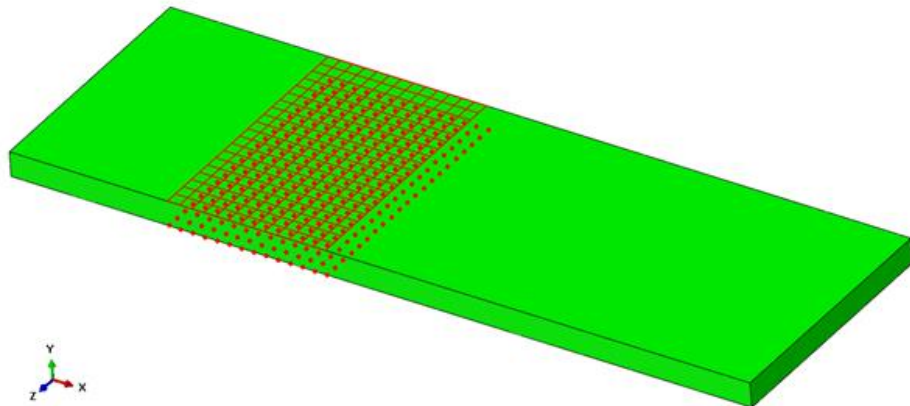
- далі, після забезпечення дії сили притискання, приводяться до обертання деталь 2 і ролик-електрод 3, а також ініціюється електричний нагрів електродної стрічки.

Враховуючи імпульсний (періодичний) характер прикладення електричного навантаження і відносно короткий проміжок часу впливу, подача електричного струму до стрічки здійснюється на верхню ділянку поверхні, представлену на схемі (рис.6.2) у вигляді сітки довжиною, яку проходить стрічка за період дії електричного навантаження, що включає в себе цикл нагріву до температури наварювання та паузи (відключення електричного струму).

Електричний потенціал прикладається до нижньої поверхні, що відображене на схемі (див. рис.6.2) у вигляді точок, розташованих вздовж ділянки поверхні стрічки такої ж довжини.



а)



б)

Рисунок 6.2 – Схема прикладення електричного навантаження до електродної стрічки, що враховує циклічність процесу електроконтактного наварювання

Відвід тепла з поверхні стрічки реалізується по її поверхні, за виключенням передньої та задньої торцевої поверхні стрічки, поверхні, що проходить крізь площину симетрії, а також верхньої поверхні, до якої прикладається електричне навантаження, оскільки ролик-електрод в процесі електроконтактного наварювання примусово охолоджується за рахунок води, яка подається по охолоджуючому каналу.

Після завершення першого періоду нагріву стрічки (див. рис. 6.2, а), здійснюється перехід на наступну ділянку (див. рис. 6.2, б) такої ж довжини, з метою здійснення подальшого електричного нагріву стрічки.

В якості прикладу кінцево-елементного моделювання процесу електроконтактного наварювання стрічкою нижче приведено результати симуляції, виконаної для наступних вихідних параметрів:

- діаметр ролику-електроду – 100 мм;
- ширина стрічки – 3,2 мм;
- товщина стрічки – 0,5 мм;
- зусилля на ролику-електроді – 2 кН
- струм наварювання – 6 кА

В якості прикладу на рис.6.3-6.5 представлено температурне поле електродної сталеві стрічки у часовому проміжку протікання імпульсу зварювального струму: швидкість обертання деталі $V_{дет} = 0,4 \text{ с}^{-1}$, швидкість обертання ролику-електроду $V_p = 0,203 \text{ с}^{-1}$.

Матеріал і механічні властивості стрічки приведено в табл.6.1-6.4 [346].

Таблиця 6.1

Хімічний склад матеріалу електродної стрічки

| C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | As |
|-------------|---------|------------|--------|---------|----------|--------|--------|---------|
| 0,05...0,12 | до 0,03 | 0,25...0,5 | до 0,3 | до 0,04 | до 0,035 | до 0,1 | до 0,3 | до 0,08 |

Таблиця 6.2

Механічні властивості електродного матеріалу при $T=20^\circ\text{C}$

| σ_b , МПа | σ_T , МПа | δ_5 , % | ψ , % | $\text{HB} \cdot 10^{-1}$, МПа |
|------------------|------------------|----------------|------------|---------------------------------|
| 290 | 175 | 35 | 60 | 179 |

Таблиця 6.3

Фізичні властивості електродного матеріалу залежно від температури нагріву

| T , $^\circ\text{C}$ | $E \cdot 10^5$, МПа | $\alpha \cdot 10^6$, 1/Град | λ , Вт/(м·Град) | ρ , кг/м ³ | C , Дж/(кг·Град) | $R \cdot 10^9$, Ом·м | G , Ом ⁻¹ | ν |
|------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 100 | 2,08 | 12,5 | 60 | 7846 | 482 | 178 | 3984 | 0,265185 |
| 200 | 2,03 | 13,4 | 56 | 7814 | 498 | 252 | 3115 | 0,271666 |

Продовження таблиці 6.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|------|------|----|------|-----|------|------|----------|
| 300 | 1,97 | 14 | 51 | 7781 | 514 | 341 | 2451 | 0,278148 |
| 400 | 1,89 | 14,5 | 47 | 7745 | 533 | 448 | 1957 | 0,284629 |
| 500 | 1,77 | 14,9 | 41 | 7708 | 555 | 575 | 1590 | 0,291111 |
| 600 | 1,63 | 15,1 | 37 | 7668 | 584 | 725 | 1318 | 0,297592 |
| 700 | 1,4 | 15,3 | 34 | 7628 | 626 | 898 | 1085 | 0,304074 |
| 800 | 1,2 | 14,7 | 30 | 7598 | 695 | 1073 | 899 | 0,310555 |
| 900 | 1,0 | 12,7 | 27 | 7602 | 703 | 1124 | 865 | 0,317037 |

Таблиця 6.4

Границя текучості σ_T залежно від пластичної деформації δ і температури нагріву

| σ_T , МПа | δ , мм | T , °C | σ_T , МПа | δ , мм | T , °C | σ_T , МПа | δ , мм | T , °C | σ_T , МПа | δ , мм | T , °C |
|---------------------|------------------|-------------|---------------------|------------------|-------------|---------------------|------------------|-------------|---------------------|------------------|-------------|
| 175,0 | 0,0 | 20 | 94,57 | 0,5 | 600 | 45,47 | 1,0 | 800 | 4,58 | 0,0 | 1100 |
| 818,8 | 0,5 | 20 | 108,14 | 1,0 | 600 | 8,39 | 0,0 | 900 | 15,24 | 0,5 | 1100 |
| 936,25 | 1,0 | 20 | 17,88 | 0,0 | 700 | 27,89 | 0,5 | 900 | 17,43 | 1,0 | 1100 |
| 49,24 | 0,0 | 500 | 59,45 | 0,5 | 700 | 31,89 | 1,0 | 900 | 3,53 | 0,0 | 1200 |
| 163,76 | 0,5 | 500 | 67,98 | 1,0 | 700 | 6,11 | 0,0 | 1000 | 11,73 | 0,5 | 1200 |
| 187,25 | 1,0 | 500 | 11,96 | 0,0 | 800 | 20,31 | 0,5 | 1000 | 13,41 | 1,0 | 1200 |
| 28,44 | 0,0 | 600 | 39,77 | 0,5 | 800 | 23,22 | 1,0 | 1000 | 2,77 | 0,0 | 1300 |

Згідно з одержаними даними процес нагріву електродного матеріалу ініціюється в зоні його контакту з поверхнею виробу (рис.6.3). На цій же ділянці стрічки в термодформаційному осередку спостерігаються й максимальні температури протягом всього періоду нагріву. Такий нерівномірний розподіл просторово-часового температурного поля по товщині електродного матеріалу свідчить про приварювання стрічки в зоні контакту з поверхнею деталі. Основна ж частина електродного матеріалу в термодформаційному осередку при електроконтактному наварюванні знаходиться у в'язко-пластичному стані, спричиненому нагрівом до 911...1010°C. Порівняно низькі значення температурних показників у зоні контакту електродної

стрічки з роликком-електродом обумовлені інтенсивним відведенням до нього тепла, яке виділяється в матеріалі електродної стрічки під час електроконтактного наварювання. Таким чином забезпечується відсутність приварювання електродного металу до ролику-електроду та знижується зношування робочого інструменту.

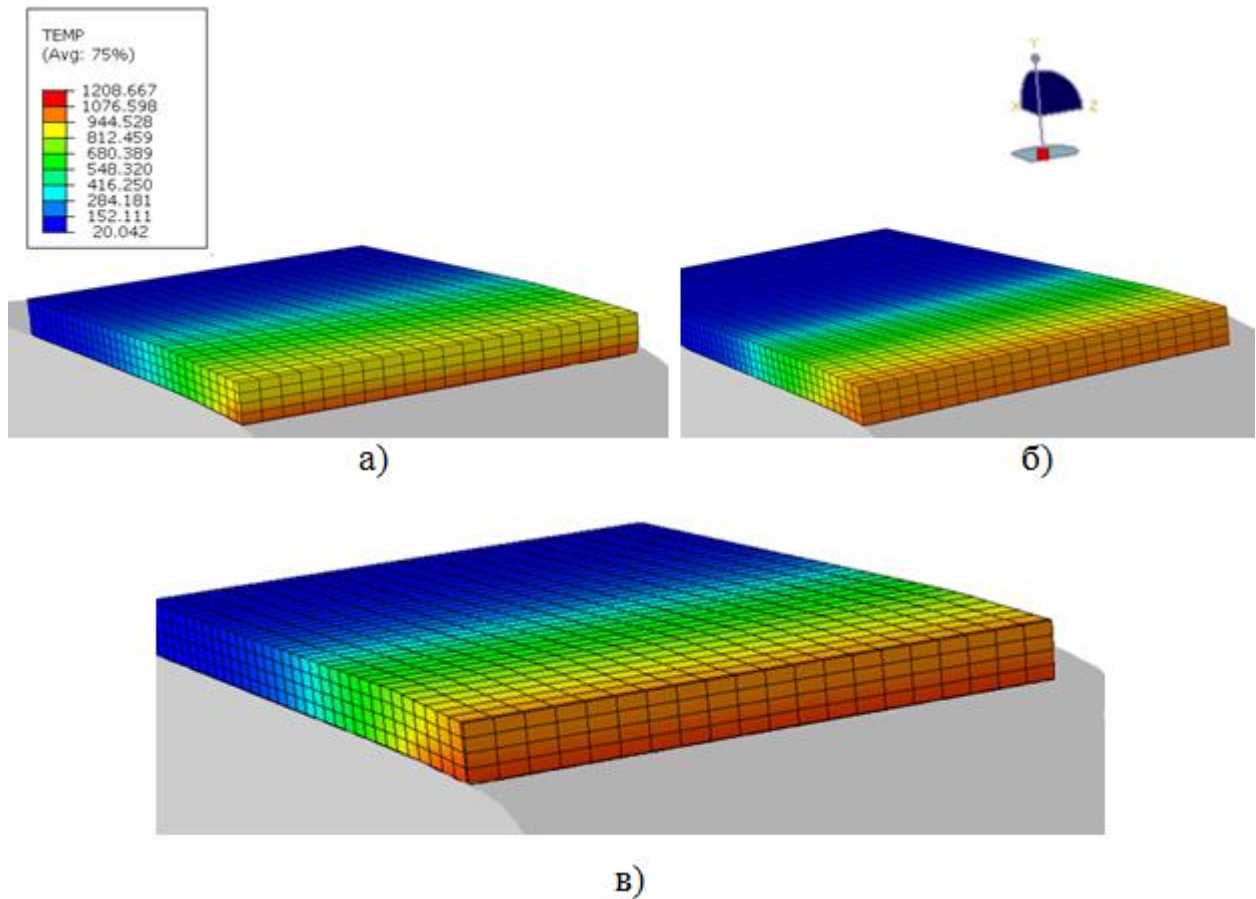


Рисунок 6.3 – Розподіл температурних полів в процесі електроконтактного наварювання на протязі імпульсу електричного струму $t_{\text{імп}}=0,04\text{с}$: через $0,02\text{ с}$ протікання імпульсу струму (а), через $0,03\text{с}$ протікання імпульсу струму (б) та на виході з термодформаційного осередку (в)

Порівняння результатів моделювання просторово-часових теплових полів при різній тривалості протікання імпульсу електричного струму при електроконтактному наварюванні (рис. 6.4-6.5) свідчить про нівелювання градієнту температурних показників у термодформаційному осередку, як по довжині, так і по ширині електродної стрічки зі збільшенням часу дії імпульсу струму.

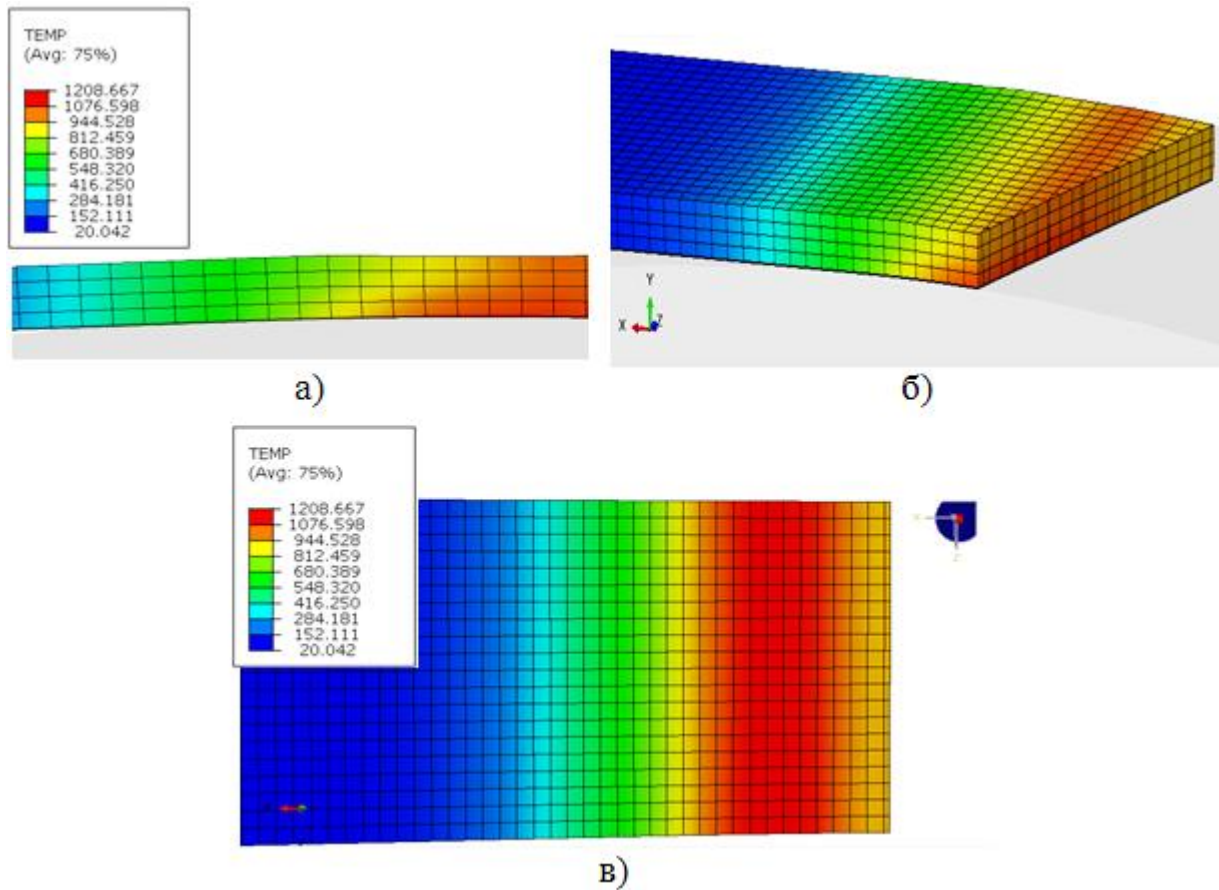


Рисунок 6.4 – Загальний вигляд температурного поля сталевій стрічці в термомодеформаційному осередку (а, б) і розподіл теплових полів у зоні контакту стрічки з поверхнею деталі (в) в процесі електроконтактного наварювання на виході з термомодеформаційного осередку при $t_{\text{имп}} = 0,04\text{с}$

При тривалості протікання імпульсу електричного струму $t_{\text{имп}}=0,04\text{с}$ спостерігається локальне підвищення температури в термомодеформаційному осередку з переважним переміщенням теплової плями в зону приварювання стрічки з поверхнею деталі (рис.6.4). Максимум температурних показників зі значенням 1200°C в зоні контакту стрічки з поверхнею виробу забезпечує протікання в цій ділянці приварювання, що сприяє утворенню покриття з необхідною міцністю зчеплення з основним металом.

В зоні контакту з роликком-електродом теплова пляма характеризується більш низькими температурами, що пояснюється значним тепловідведенням у мідний водоохолоджуваній ролик-електрод. У всіх розглянутих випадках нагрів зони приварювання супроводжується незначним тепловідведенням у суміжні до термомодеформацій-

ного осередку ділянки електродного матеріалу. Збільшення тривалості імпульсу струму при електроконтактному наварюванні при сталості решти параметрів процесу, таких як сила струму та зусилля на ролику-електроді, згідно з отриманими результатами (рис.6.5), забезпечує прогрів по всій товщині стрічки в термодформаційному осередку до $T=1200^{\circ}\text{C}$.

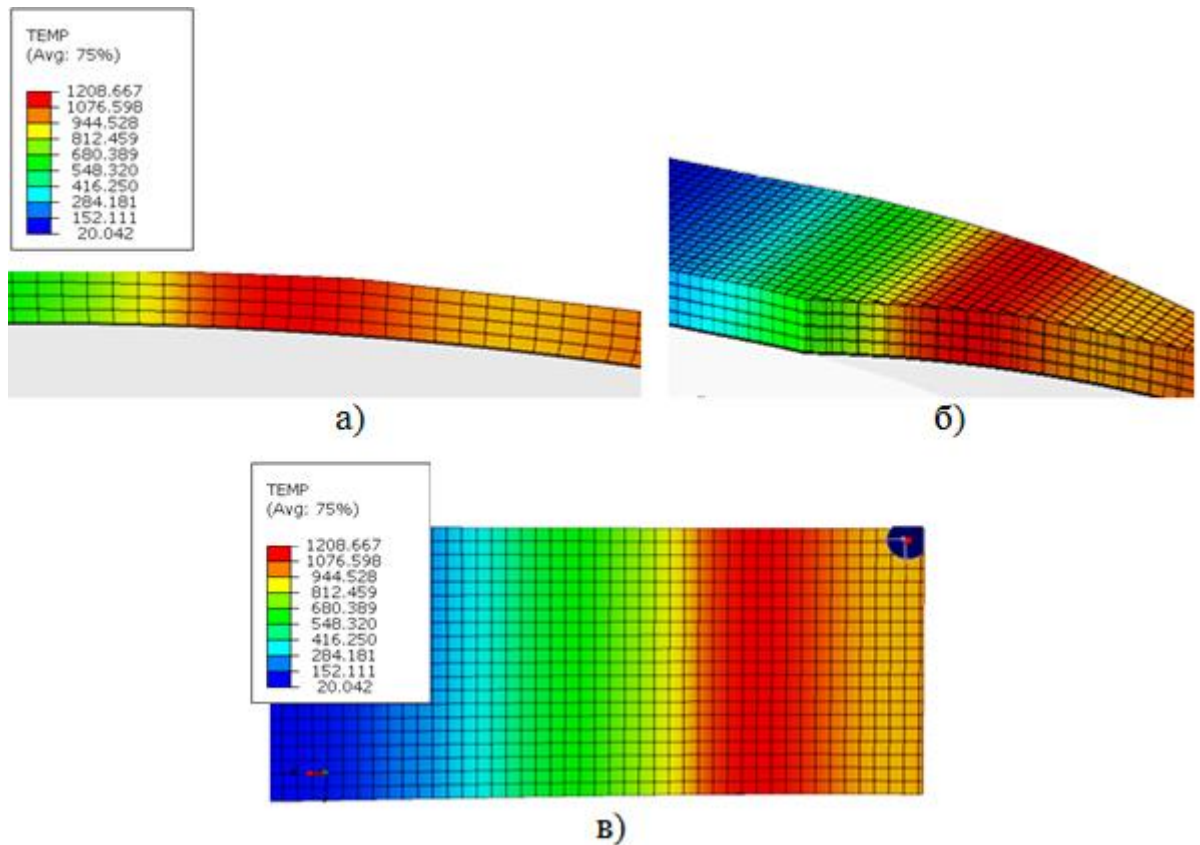


Рисунок 6.5 – Загальний вигляд температурного поля сталеві стрічки в термодформаційному осередку (а, б) і розподіл теплових полів у зоні контакту стрічки з поверхнею деталі (в) в процесі електроконтактного наварювання при $t_{\text{імп}} = 0,05\text{c}$

При подальшому збільшенні часу імпульсу струму може привести до прожогу або виплеску розплавленого електродного матеріалу, негативно впливаючи на якість привареного шару та відновленого виробу в цілому. З метою дослідження впливу тривалості імпульсу електричного струму на зміну картини напружено-деформованого стану електродної стрічки у термодформаційному осередку проведено моделювання протікання процесу при $K_v=1,015$ та $K_v=1,0$. На рис.6.6-6.11 представлено результати

кінцево-елементного моделювання напружено-деформованого стану стрічки в термодеформаційному осередку залежно від тривалості імпульсу зварювального струму в процесі наварювання: швидкість обертання деталі $V_{\text{дет}} = 0,4 \text{ с}^{-1}$, швидкість обертання ролику-електроду $V_p = 0,39 \text{ с}^{-1}$, коефіцієнт кінематичної асиметрії $K_v = 1,015$.

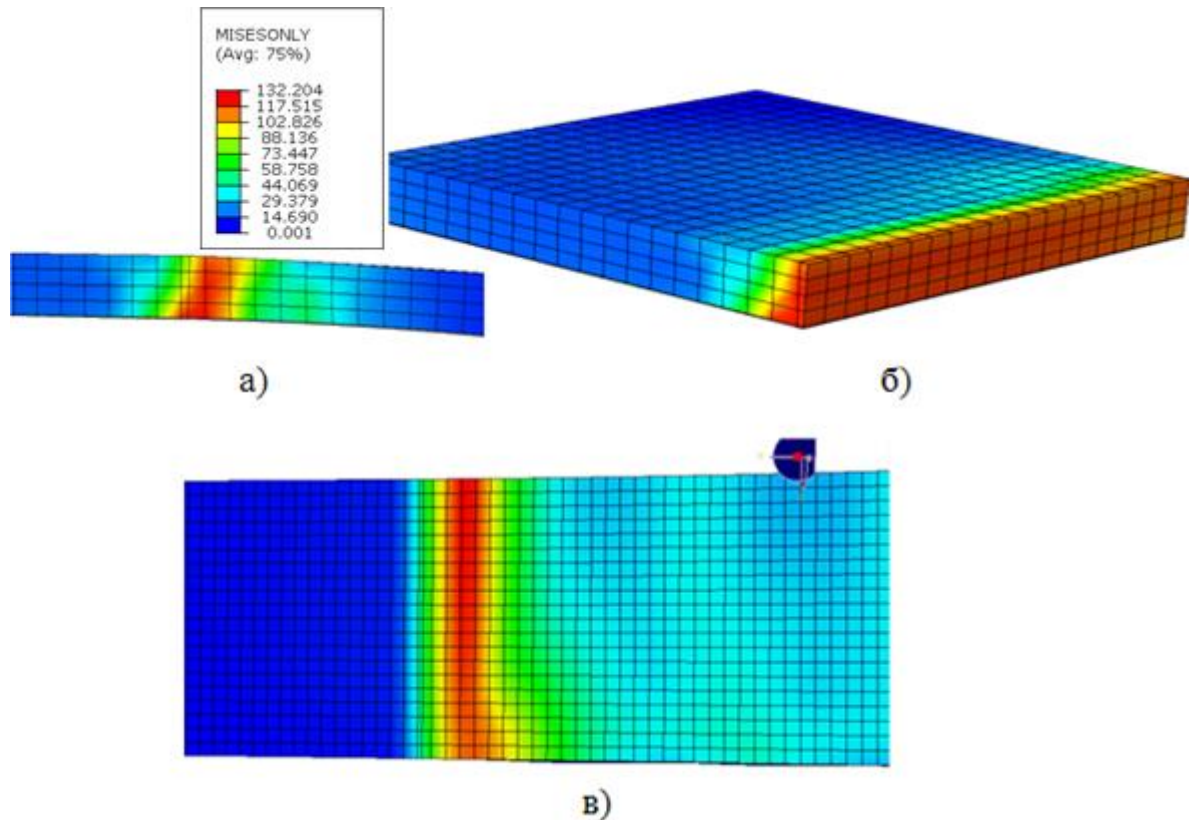


Рисунок 6.6 – Розподіл еквівалентних напружень у термодеформаційному осередку (а, б) і в зоні контакту стрічки з поверхнею виробу (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,015$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{імп}} = 0,03 \text{ с}$

Згідно з отриманими даними (рис. 6.6-6.8) максимальні еквівалентні напруження протягом всього часу протікання імпульсу зварювального струму в термодеформаційному осередку мають місце в зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі, що узгоджується з розрахованими даними розробленої кінцево-різнецевої математичної моделі (див. рис.5.4-5.6) про вплив асиметрії процесу наварювання на зміну величини дотичних та нормальних контактних напружень.

Збільшення часу протікання імпульсу струму наварювання сприяє зменшенню величини еквівалентних напружень. Так, при часі протікання імпульсу струму $t_{\text{імп}}=0,03$ с максимальна величина еквівалентних напружень складає 115 МПа, причому це значення спостерігається по всій товщині електродної стрічки у термодеоформаційному осередку (див. рис.6.6).

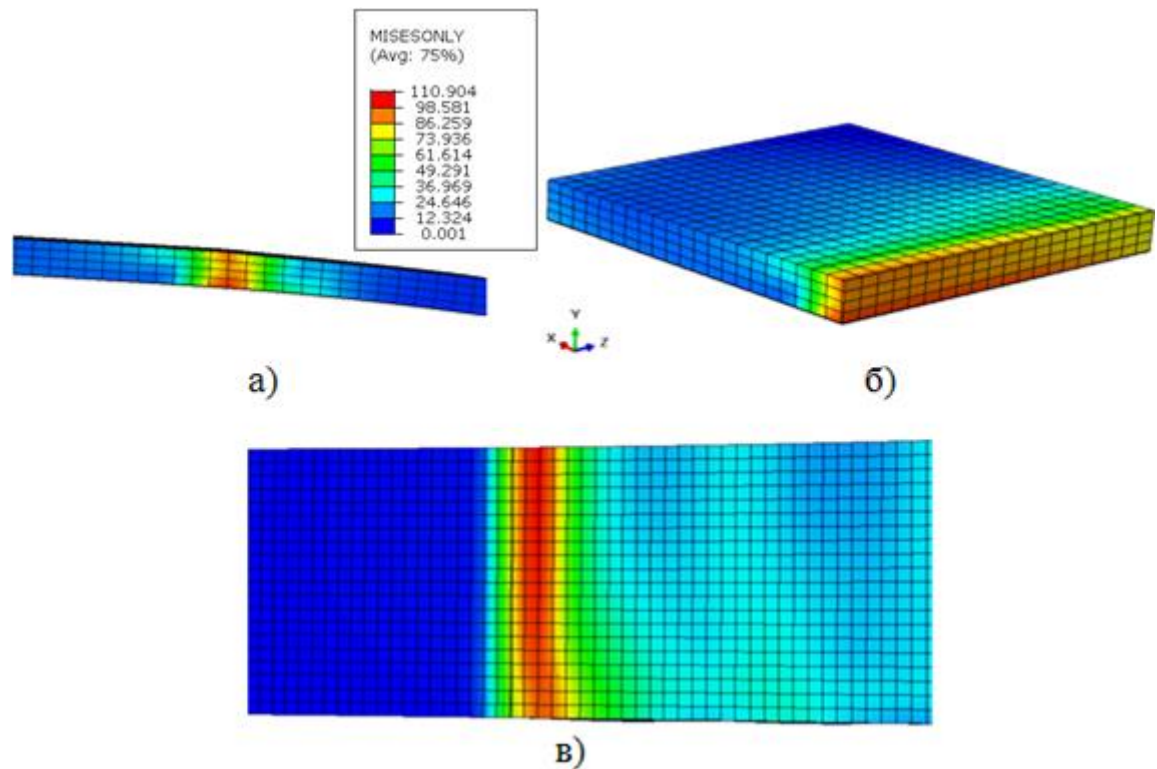


Рисунок 6.7 – Розподіл еквівалентних напружень у термодеоформаційному осередку (а, б) і в зоні контакту стрічки з поверхнею виробу (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,015$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{імп}} = 0,04$ с

При збільшенні часу дії імпульсу електричного струму до 0,04с максимальні значення еквівалентних напружень зменшуються до 110МПа і переміщуються переважно до зони контакту електродної стрічки з поверхнею деталі (див. рис.6.7). Це обумовлюється протіканням процесів релаксації металу електродної стрічки, який знаходиться у в'язко-пластичному стані. При збільшенні часу протікання імпульсу електричного струму підвищується загальна температура нагрі-

ву металу по товщині електродної стрічки, що сприяє зменшенню величини еквівалентних напружень (рис.6.8).

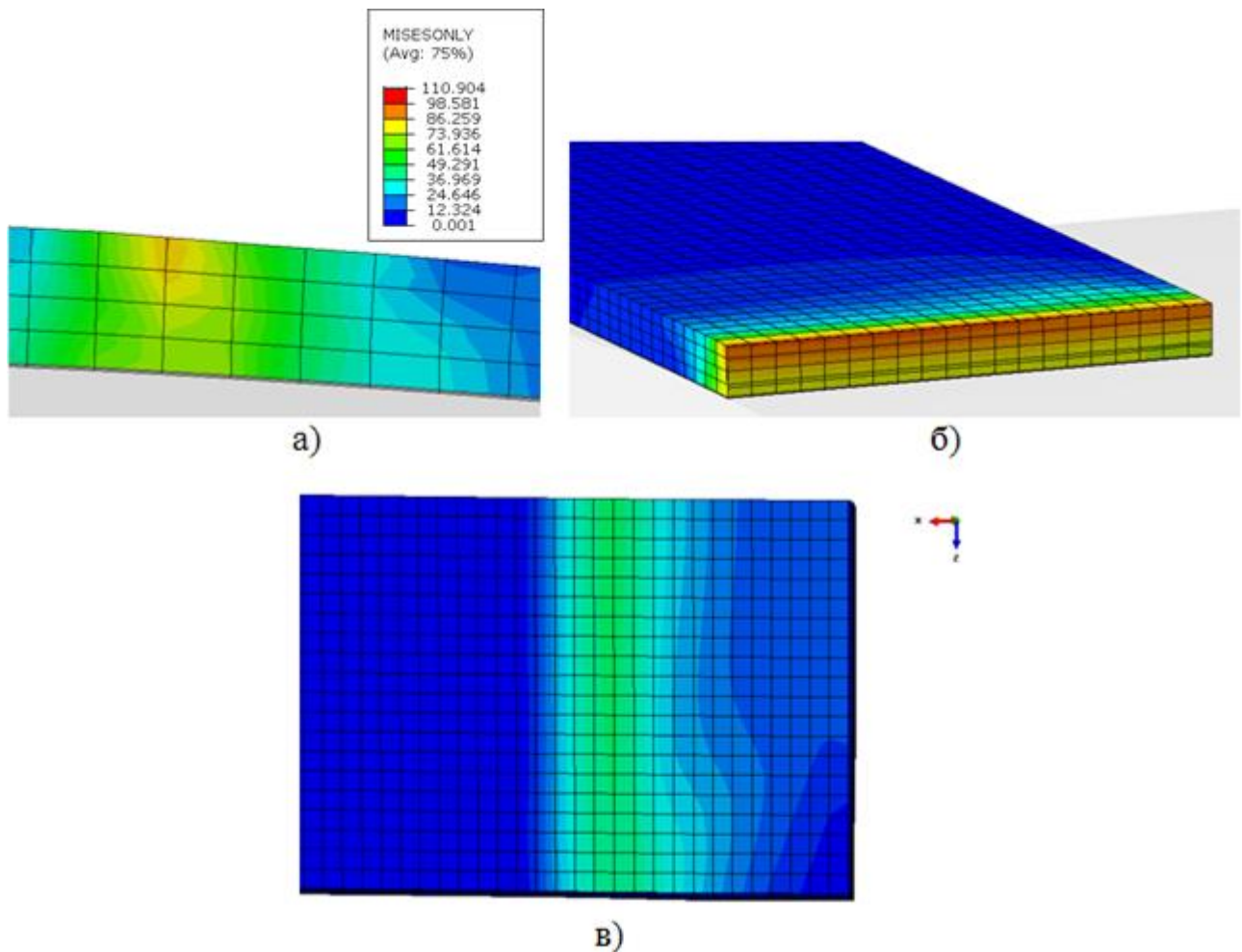


Рисунок 6.8 – Розподіл еквівалентних напружень у термодформаційному осередку (а, б) і в зоні контакту стрічки з поверхнею виробу (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,015$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,05$ с

Високі значення еквівалентних напружень до 110МПа у зоні приварювання, яка має найвищу температуру у термодформаційному осередку, викликані дією сил третя, обумовлених наявністю кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання. Подальше підвищення часу впливу імпульсу струму наварювання до 0,05с приводить до переміщення максимальних значень еквівалентної деформації у бік зони контакту стрічки з ролик-електродом і до загального зменшення

їх величини (див. рис.6.8). Тобто подальше зростання загальної температури нагріву електродного матеріалу, яка при тривалості імпульсу електричного струму $t_{\text{имп}} = 0,05\text{с}$ складатиме 1200°C по всій товщині електродної стрічки (див. рис. 6.5), приводить до зменшення величини еквівалентних напружень у зоні приварювання навіть за наявності кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання через розширення ділянки нагріву та збільшення часу перебування тремодформаційного осередку у нагрітому стані. При цьому еквівалентні напруження у зоні контакту стрічки з поверхнею деталі становлять 60-70 МПа, а у зоні контакту з ролик-електродом – 100-110МПа, що пов'язане з менш пластичним станом стрічки у зоні її контакту з ролик-електродом через відведення до нього певної кількості теплоти.

Згідно одержаних результатів (рис. 6.9-6.11) у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею ролика-електроду деформаційні процеси практично не протікають.

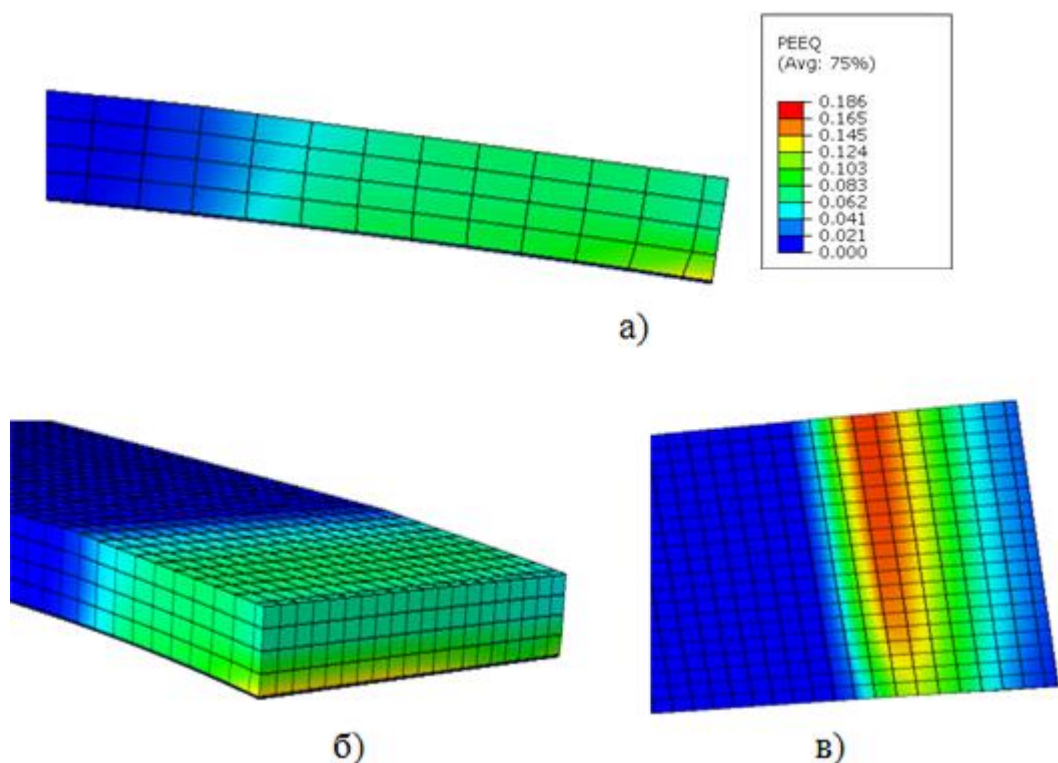


Рисунок 6.9 – Розподіл еквівалентних деформацій у термодформаційному осередку (а, б) та у зоні контакту стрічки з поверхнею виробу (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,015$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,03\text{ с}$

Це пов'язане з низькими значеннями дотичних контактних напружень, характерними для цієї ділянки товщини стрічки при $K_v=1,015$, а також з порівняно низькою температурою матеріалу в цій зоні. З іншого боку еквівалентні деформації характеризуються максимальними значеннями в зоні контакту сталевієї стрічки з поверхнею деталі. Така картина спостерігається при збільшенні тривалості імпульсу зварювального струму та добре узгоджується з даними розробленої математичної кінцево-різницевої моделі процесу електроконтактного наварювання стрічками.

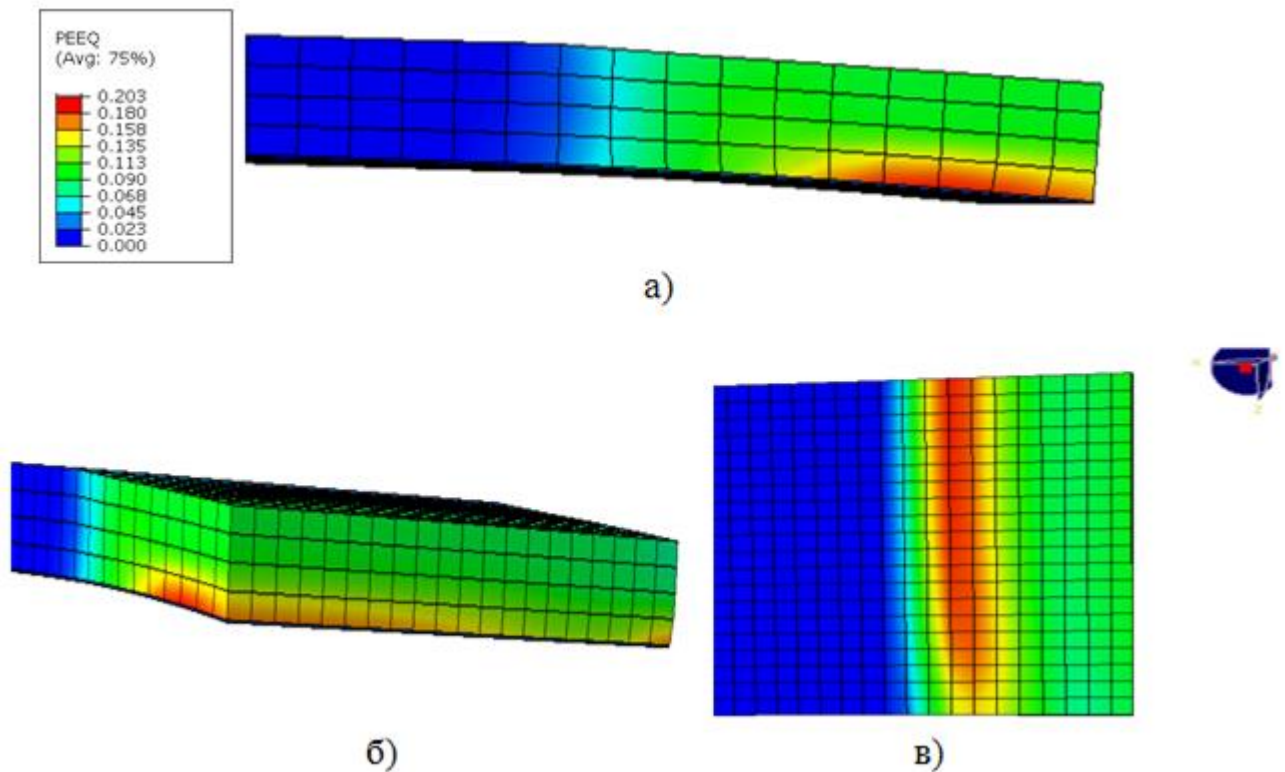


Рисунок 6.10 – Розподіл еквівалентних деформацій у термдеформаційному осередку (а, б) та у зоні контакту стрічки з поверхнею деталі (в) при електроконтактному наварюванні сталевієї стрічки при $K_v = 1,015$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,04$ с

Крім того більш високі значення еквівалентних деформацій у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі пояснюються підвищенням температури в

термодеформаційному осередку, що сприяє інтенсифікації деформаційних процесів і якісному формуванню покриття.

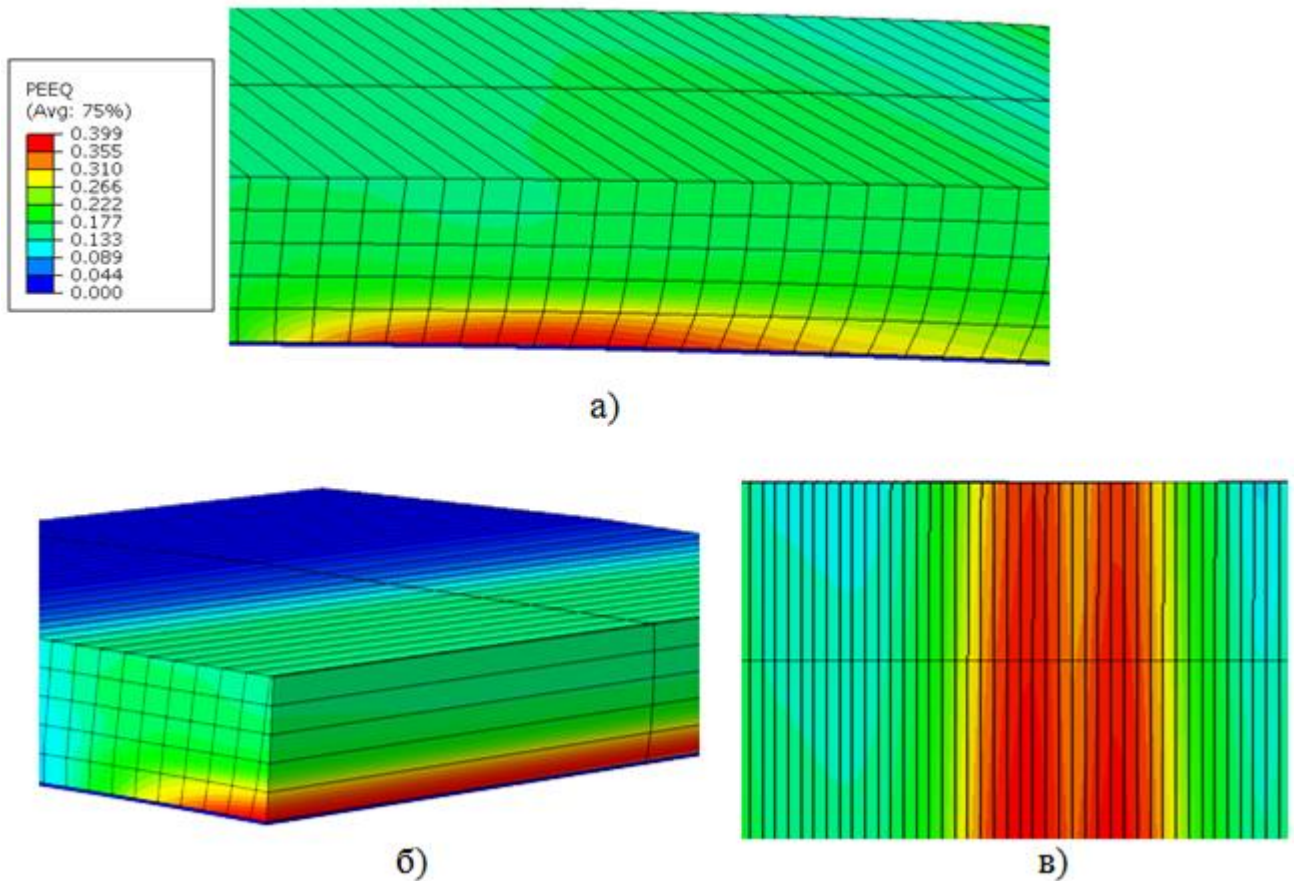


Рисунок 6.11 – Розподіл еквівалентних деформацій у термодеформаційному осередку (а, б) і в зоні контакту стрічки з поверхнею деталі (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,015$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,05$ с

Зона контакту електродної стрічки з ролик-електродом характеризується більш низькими температурами ($T=911^\circ\text{C}$), ніж зона контакту стрічки з поверхнею деталі ($T=1200^\circ\text{C}$) (див. рис.6.3, б), що визиває зниження величини еквівалентних деформацій до 0,093 порівняно з 0,186 у зоні приварювання (див. рис.6.9). При тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,03$ с еквівалентні напруження складають 115МПа та розподіляються по всій товщині стрічки у термодеформаційному осередку (див. рис.6.6). У зоні приварювання площа дії еквівалентних напружень

збільшується, згідно результатів кінцево-елементного аналізу (див. рис.6.6), що разом з впливом температури сприяє зростанню еквівалентних деформацій на цій ділянці вдвічі (див. рис.6.9).

Підвищення часу протікання імпульсу струму наварювання до 0,04с визиває зростання максимальної величини еквівалентних деформацій у термодформаційному осередку до 0,203 (див. рис.6.10). Згідно з вихідними умовами для розробки кінцево-елементної моделі процесу електроконтактного наварювання при її створенні враховано тепловідведення з поверхні електродної стрічки до охолоджуваного ролика-електроду в зоні їх контакту, тож це позначилося на результатах моделювання при розрахунку еквівалентних деформацій: у зоні контакту електродної стрічки з роликом-електродом при підвищенні часу дії електричного струму до 0,04с вони практично не змінюються та дорівнюють 0,101 (див. рис.6.10). Причому зниження величини еквівалентних напружень при $t_{\text{имп}} = 0,04$ с до 110МПа у зоні приварювання (див. рис.6.7) не впливає на рівень еквівалентних деформацій у даній ділянці. Це пов'язане з переважною дією на деформаційні процеси розширення зони нагріву металу електродної стрічки до 1200°C у термодформаційному осередку (див. рис.6.4), тобто зі збільшенням кількості матеріалу, який перебуває у пластичному стані. Це також дозволяє розширити площу деформованого металу у зоні контакту стрічки з поверхнею деталі, що підвищуватиме міцність зчеплення покриття з виробом (див. рис.6.10).

При підвищенні часу протікання імпульсу струму наварювання до 0,05с величина еквівалентних деформацій збільшується вдвічі (див. рис.6.11). Причому таке збільшення спостерігається як у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею виробу (еквівалентні деформації становлять 0,399), так і у зоні контакту стрічки з роликом-електродом (еквівалентні деформації становлять 0,190). Це пов'язане із загальним підвищенням температури по товщині електродної стрічки. Так, температура в зоні контакту з роликом-електродом становитиме 1100°C, а у зоні контакту з поверхнею деталі – 1200°C (див. рис.6.5). Причому у зоні контакту стрічки з поверхнею деталі еквівалентні деформації збільшуються за раху-

нок дії високих температур, а у зоні контакту з роликком-електродом – за рахунок спільної дії нагріву та еквівалентних напружень, які при $t_{\text{имп}}=0,05\text{с}$ є найбільшими саме у цій ділянці (110МПа) (див. рис.6.8).

Таке підвищення еквівалентних деформацій по перетину електродної стрічки у термодформаційному осередку свідчить про те, що подальше збільшення тривалості імпульсу струму наварювання при $K_v=1,015$ може привести до значних деформацій електродної стрічки та є недоцільним. Результати кінцево-елементного аналізу при $K_v=1,0$ свідчать про зниження величини еквівалентних напружень по перетину електродної стрічки у термодформаційному осередку від 100 МПа при $t_{\text{имп}} = 0,03 \text{ с}$ (рис. 6.12) до 90 МПа при $t_{\text{имп}} = 0,04\text{с}$ (рис.6.13).

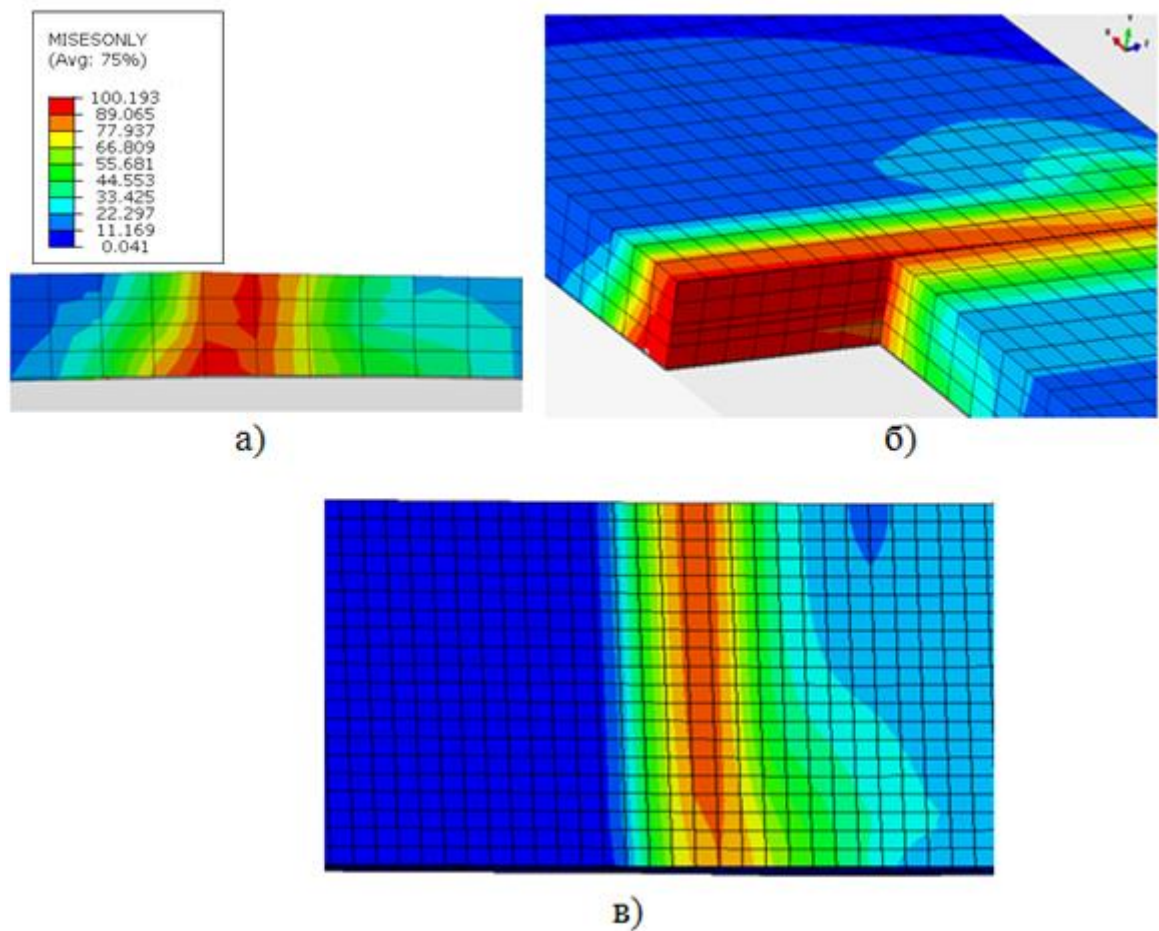


Рисунок 6.12 – Розподіл еквівалентних напружень у термодформаційному осередку (а, б) і в зоні контакту стрічки з поверхнею виробу (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,0$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,03 \text{ с}$

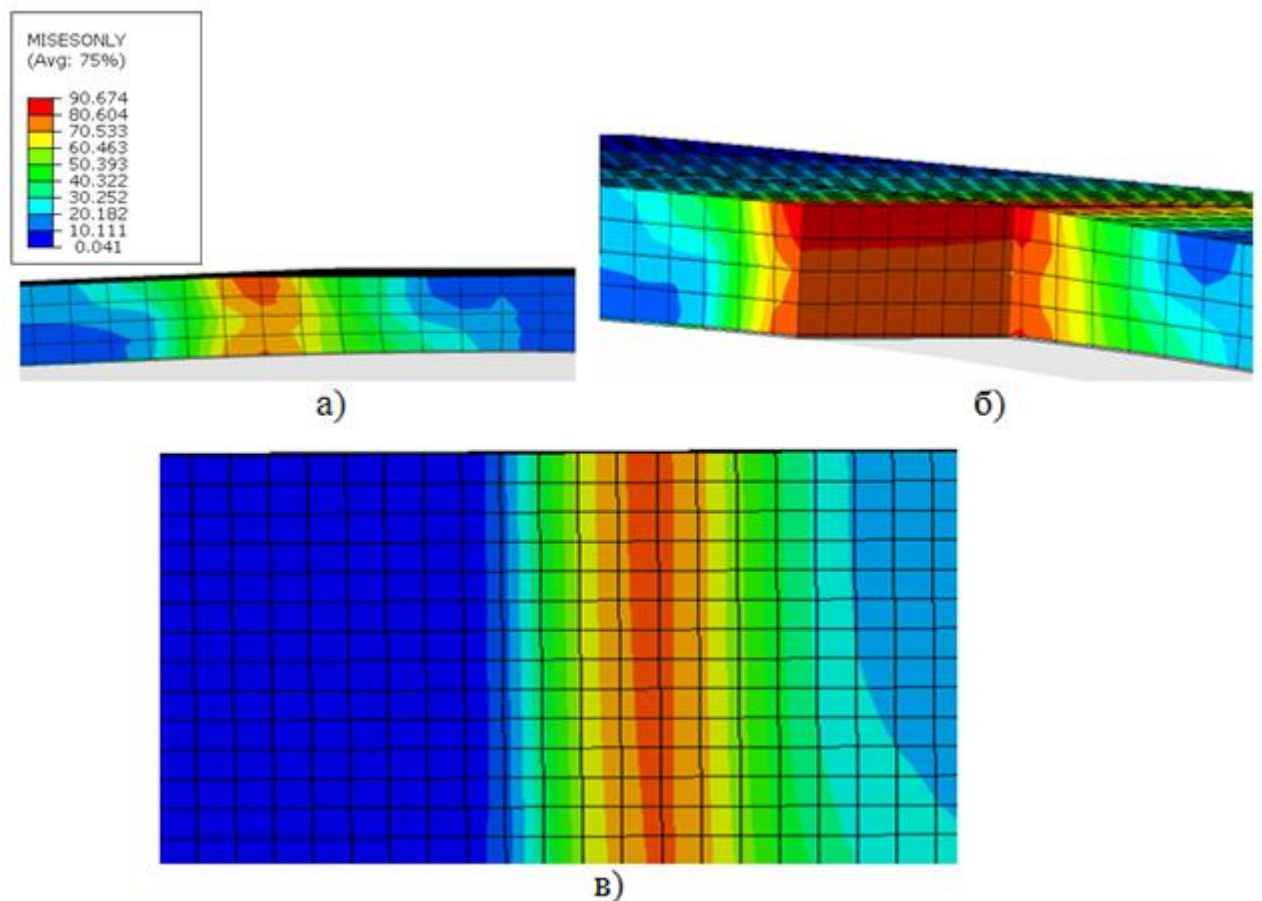


Рисунок 6.13 – Розподіл еквівалентних напружень у термдеформаційному осередку (а, б) і в зоні контакту стрічки з поверхнею виробу (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,0$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{імп}} = 0,04$ с

При чому у першому випадку максимальні значення еквівалентних напружень спостерігаються по всій товщині електродної стрічки, а у другому – найбільші еквівалентні напруження концентруються переважно у зоні контакту стрічки з роликком-електродом та у зоні приварювання.

Такий характер розподілу обумовлюється тривалістю нагріву електродного матеріалу, як і у випадках з $K_v=1,015$ (рис. 6.6-6.8). Це пояснюється тим, що у деяких ділянках матеріал стає більш пластичним, а у деяких – залишається пружним за рахунок нерівномірного розподілу температурного поля. Збільшення тривалості імпульсу струму до $t_{\text{імп}}= 0,05$ с, як і у випадку з $K_v=1,015$ (див. рис. 6.8), сприяє зниженню еквівалентних напружень у зоні контакту стрічки з пове-

рхнею деталі через збільшення площі матеріалу з температурою 1200°C (рис. 6.14). Значення еквівалентних напружень падає до 60-75 МПа.

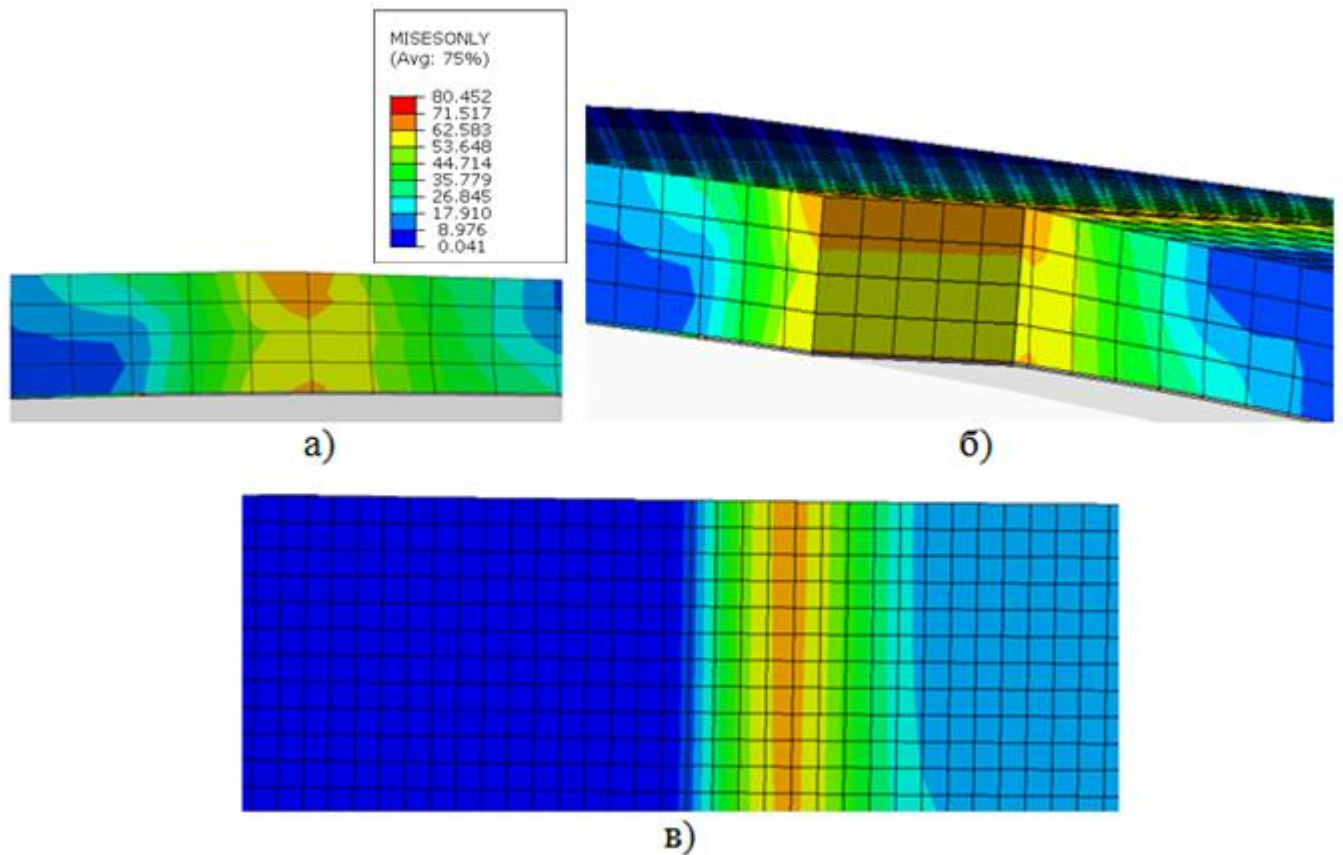


Рисунок 6.14 – Розподіл еквівалентних напружень у термодформаційному осередку (а, б) і в зоні контакту стрічки з поверхнею виробу (в) при електроконтактному наварюванні сталеві стрічки при $K_v = 1,0$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,05$ с

В усіх трьох випадках не залежно від тривалості імпульсу струму наварювання площа дії еквівалентних напружень у зоні контакту стрічки з ролик-електродом дорівнює площі їх дії у зоні контакту стрічки з поверхнею деталі (див. рис. 6.12-6.14). У той час як при $K_v = 1,015$ відбувається збільшення площі еквівалентних напружень від зони контакту з ролик-електродом у бік зони приварювання, що найбільш помітне при помірному нагріві електродного матеріалу $t_{\text{имп}} = 0,03$ с (див. рис. 6.6). При дослідженні впливу тривалості імпульсу струму на зміну величини еквівалентної деформації спостерігається картина, ана-

логічна до випадку електроконтактного наварювання зі значенням коефіцієнту кінематичної асиметрії $K_v = 1,015$. Різниця полягає у зменшенні величини еквівалентних деформацій при $K_v = 1,0$ порівняно з $K_v = 1,015$ при тих самих значеннях тривалості імпульсу струму наварювання (рис.6.15).

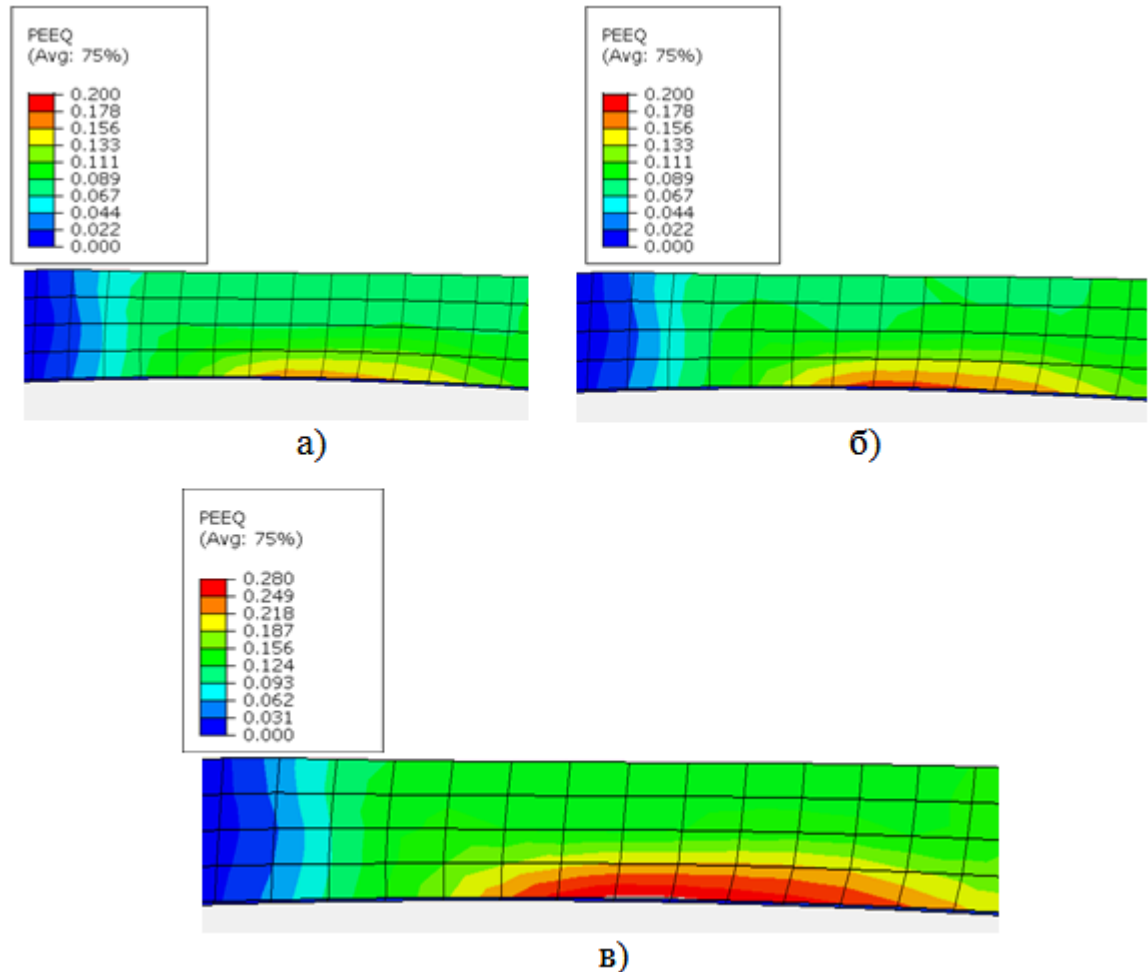


Рисунок 6.15 – Розподіл еквівалентних деформацій у термдеформаційному осередку при електроконтактному наварюванні сталевій стрічці при $K_v = 1,0$ і тривалості імпульсу струму $t_{\text{имп}} = 0,03$ с (а), $t_{\text{имп}} = 0,04$ с (б) та $t_{\text{имп}} = 0,05$ с (в)

Зберігається загальна закономірність зростання еквівалентних деформацій як у випадку симетричного, так і асиметричного процесу, при збільшенні $t_{\text{имп}}$, тобто при збільшенні площі матеріалу, нагрітого до 1200°C . При $K_v = 1,0$ та $t_{\text{имп}} = 0,05$ с максимальні значення еквівалентної деформації сягають 0,280 (див. рис.6.15), у той час як при $K_v = 1,015$ та $t_{\text{имп}} = 0,05$ вони становлять 0,380 (див. рис.6.11). У зоні контакту електродної стрічки з ролик-електродом при $K_v = 1,0$ та $t_{\text{имп}} = 0,05$ с еквівалентні дефор-

мації не перевищують 0,187 (при $K_v=1,015$ та $t_{\text{имп}}=0,05\text{с}$ еквівалентні деформації на даній ділянці становлять 0,190), що підтверджує гіпотезу про вплив коефіцієнту кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання на деформаційні процеси під час нанесення покриття, а отже і на формування з'єднання в цілому та на його міцність зчеплення. Таким чином, одним з методів підвищення міцності зчеплення за рахунок інтенсифікації деформаційних процесів у зоні приварювання є збільшення часу протікання імпульсу електричного струму. Але як за наявності кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання, так і без неї такий спосіб викликає швидку зміну картини напружено-деформованого стану, яку при швидкоплинності процесу нанесення покриття важко контролювати. Тому доцільним є надання переваги керування процесом електроконтактного наварювання стрічками за рахунок створення кінематичної асиметрії процесу.

Проведено аналіз впливу величини коефіцієнту кінематичної асиметрії K_v на змінення дотичних контактних напружень в зоні контакту електродного матеріалу з поверхнею роликів-електроду та відновлюваної деталі (рис.6.16-6.19).

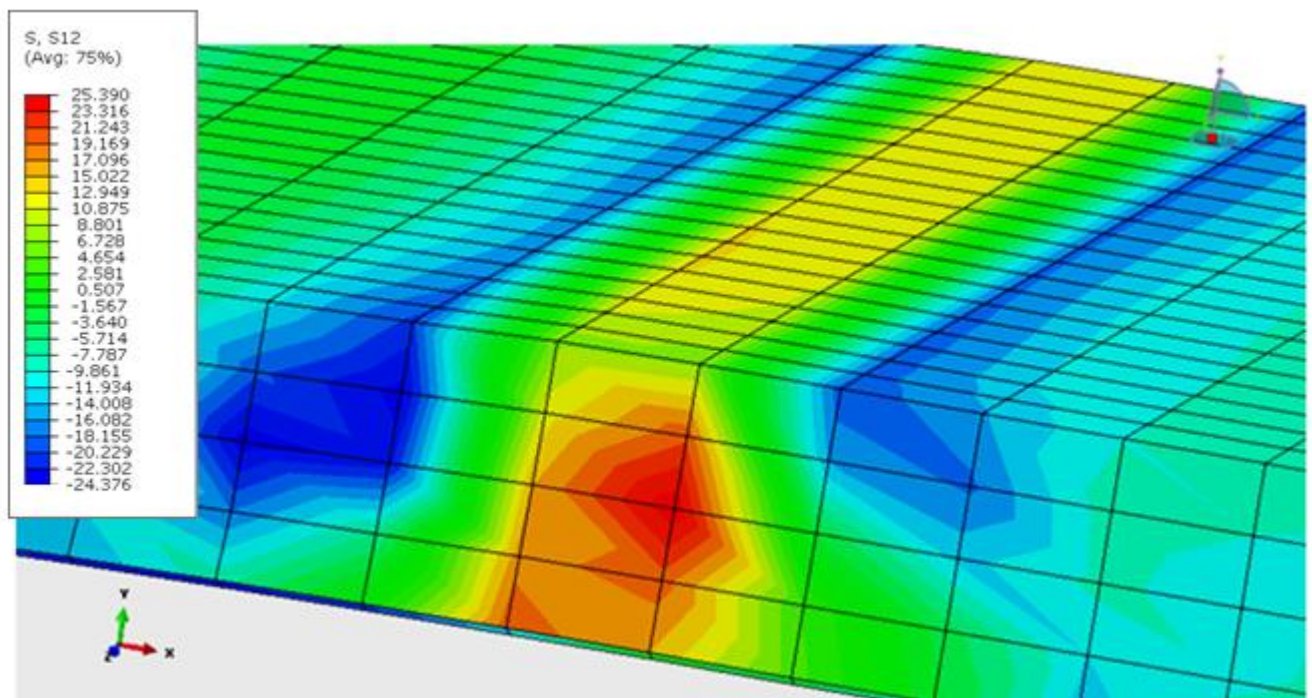


Рисунок 6.16 – Розподіл дотичних напружень в термдеформаційному осередку при $K_v=1,0$ при електроконтактному наварюванні стрічкою циліндричних деталей

Згідно з отриманими розрахунковими даними мінімальні значення дотичних контактних напружень спостерігаються при значенні коефіцієнта кінематичної асиметрії $K_v=1,0$, тобто за відсутності асиметрії процесу електроконтактного наварювання стрічкою. Їх величина за такої умови протікання процесу електроконтактного наварювання становить 25МПа. Причому площі їх розповсюдження у зоні контакту електродної стрічки з роликком-електродом та у зоні контакту з поверхнею деталі еквівалентні (див. рис. 6.16).

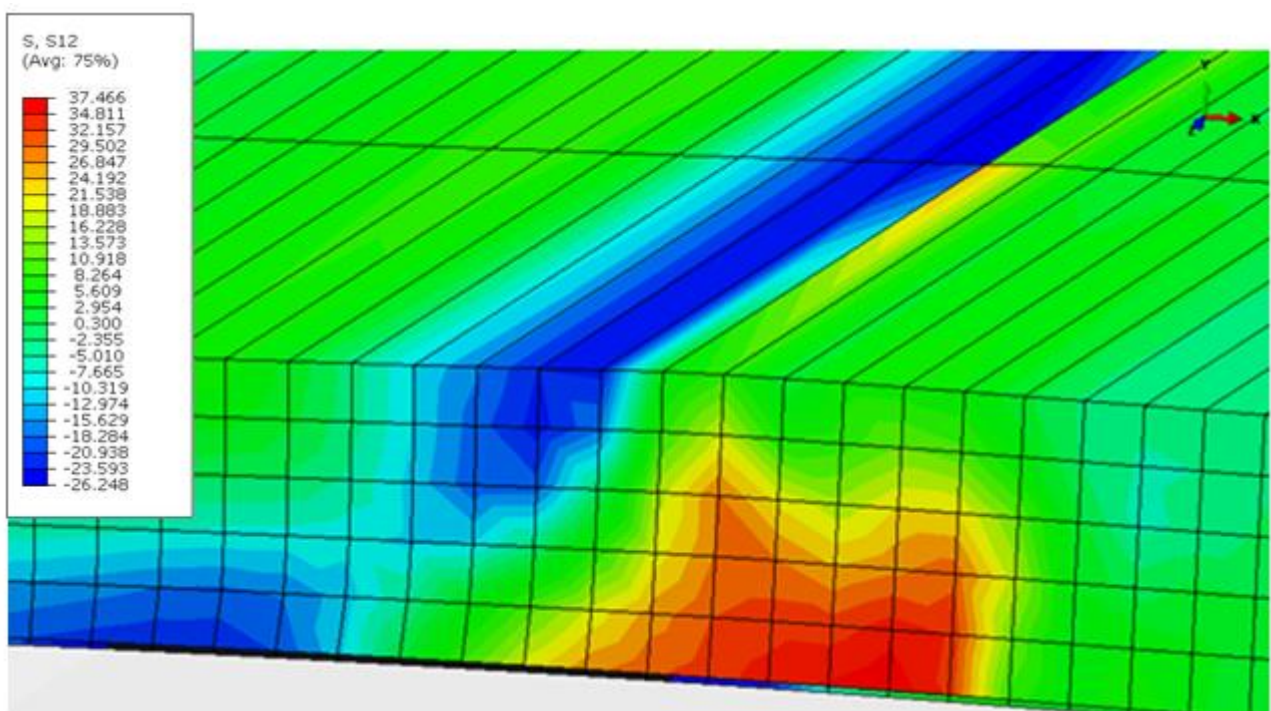


Рисунок 6.17 – Розподіл дотичних контактних напружень в термодформаційному осередку при $K_v=1,015$ при електроконтактному наварюванні стрічкою циліндричних деталей

Встановлено, що збільшення K_v до 1,015 приводить до росту дотичних контактних напружень в зоні контакту електродного матеріалу з поверхнею відновлюваної деталі ($\tau_{x11} = 38$ МПа), у той час як в зоні контакту з роликком-електродом ці напруження практично не змінюються ($\tau_{x12} = 26$ МПа), що збігається з розрахунковими даними розробленої математичної моделі (див. рис.5.4-5.6).

Змінюється також і площа розповсюдження дотичних контактних напружень: у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі вони займають значно більшу площу, ніж у зоні контакту стрічки з роликом-електродом (див. рис. 6.17).

З підвищенням K_V до 1,025 τ_{xi1} збільшуються до 45 МПа у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі. У зоні контакту стрічки з роликом-електродом також відбувається збільшення дотичних контактних напружень: τ_{xi2} , які становлять 35МПа (рис.6.18). Проте відбувається також збільшення і площі розподілу τ_{xi2} в зоні контакту електродного матеріалу з роликом-електродом.

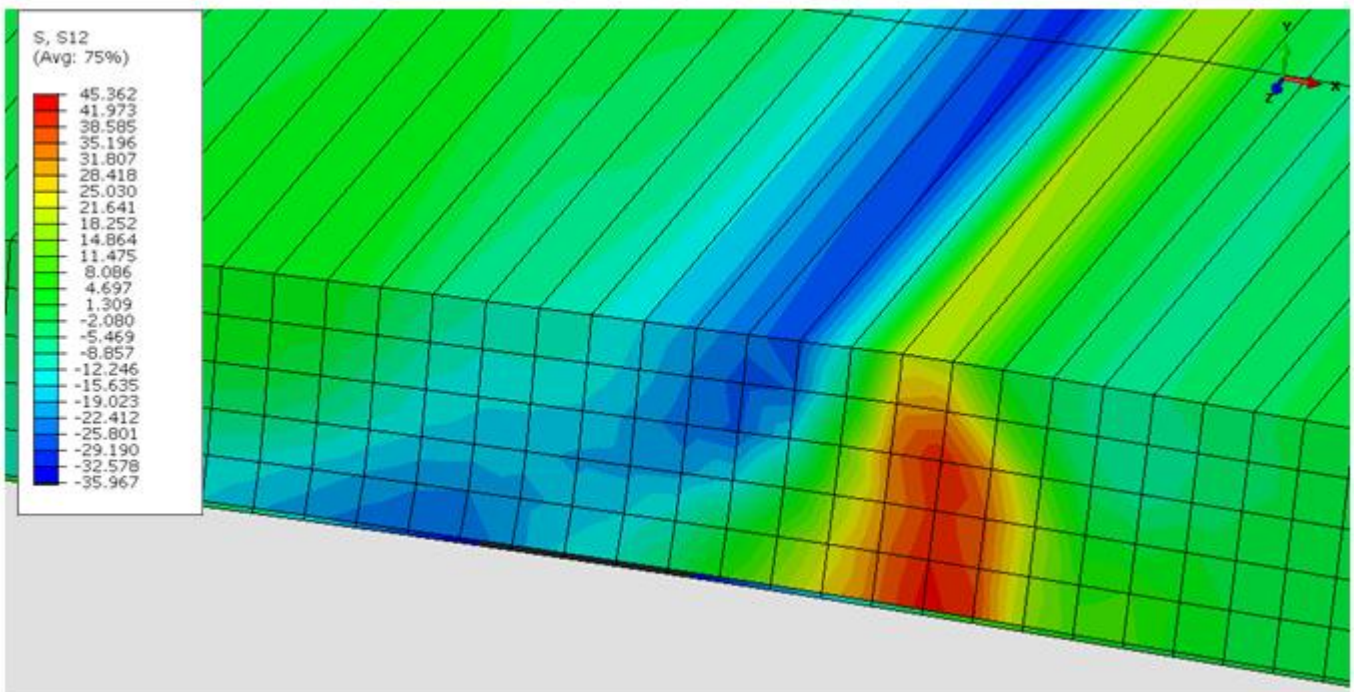


Рисунок 6.18 – Розподіл дотичних контактних напружень в термодформційному осередку при $K_V=1,025$ при електроконтактному наварюванні стрічкою циліндричних деталей

Подальше підвищення коефіцієнту кінематичної асиметрії є недоцільним, так як вже при $K_V=1,075$ дотичні контактні напруження в зоні контакту електродного матеріалу з роликом-електродом займають значну площу (рис.6.19), що може перешкоджати якісному формуванню привареного шару за рахунок

налипання електродного матеріалу на поверхню ролику-електроду та сприяти зношуванню інструменту.

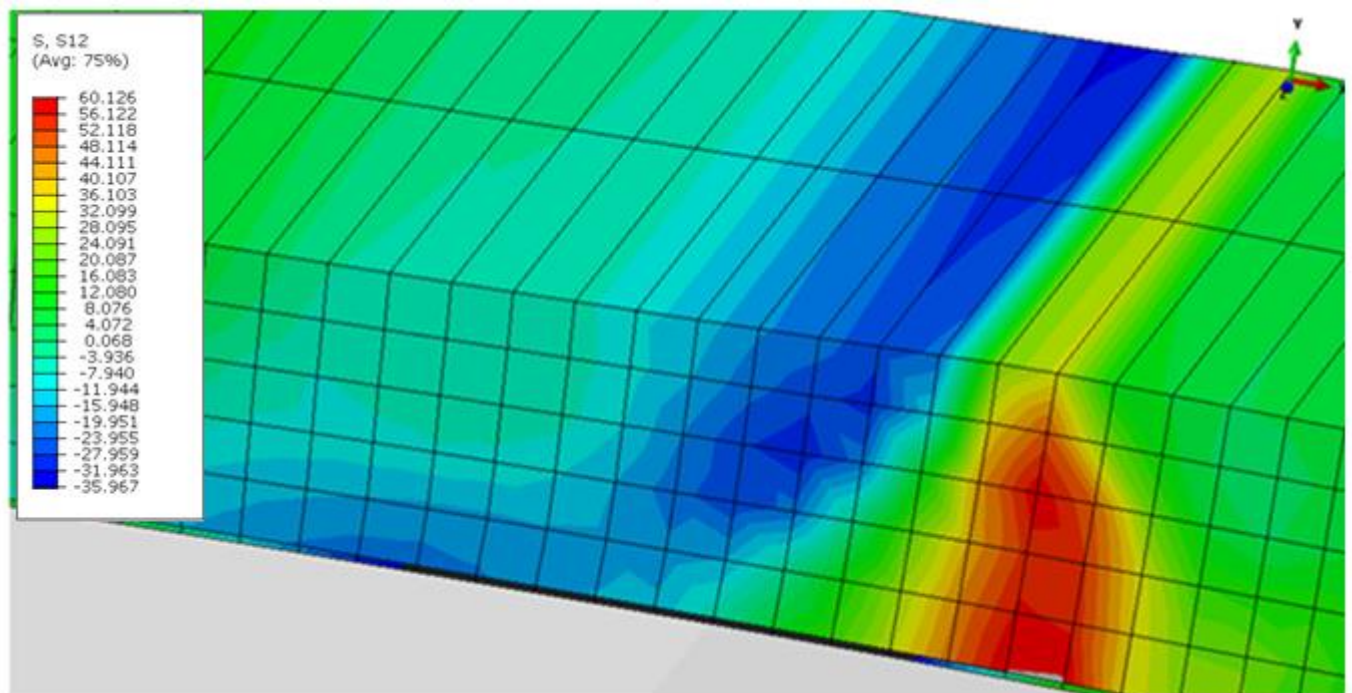


Рисунок 6.19 – Розподіл дотичних контактних напружень в термодіформаційному осередку при $K_V=1,075$ при електроконтактному наварюванні стрічкою циліндричних деталей

Згідно з отриманими даними (рис. 6.20), похибка розрахунку кінцево-різницевої моделі формоутворення навареного покриття при порівнянні з результатами кінцево-елементної моделі не перевищує 10,2%, що підтверджує справедливість допущень, прийнятих при математичному моделюванні, та свідчить про адекватність запропонованих моделей процесу електроконтактного наварювання електродної стрічки на поверхню циліндричних деталей. Таким чином одержані при кінцево-різницевому моделюванні програмні засоби автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу електроконтактного наварювання можуть бути використані при проектуванні режимів технології відновлення зношених деталей електродними стрічками.

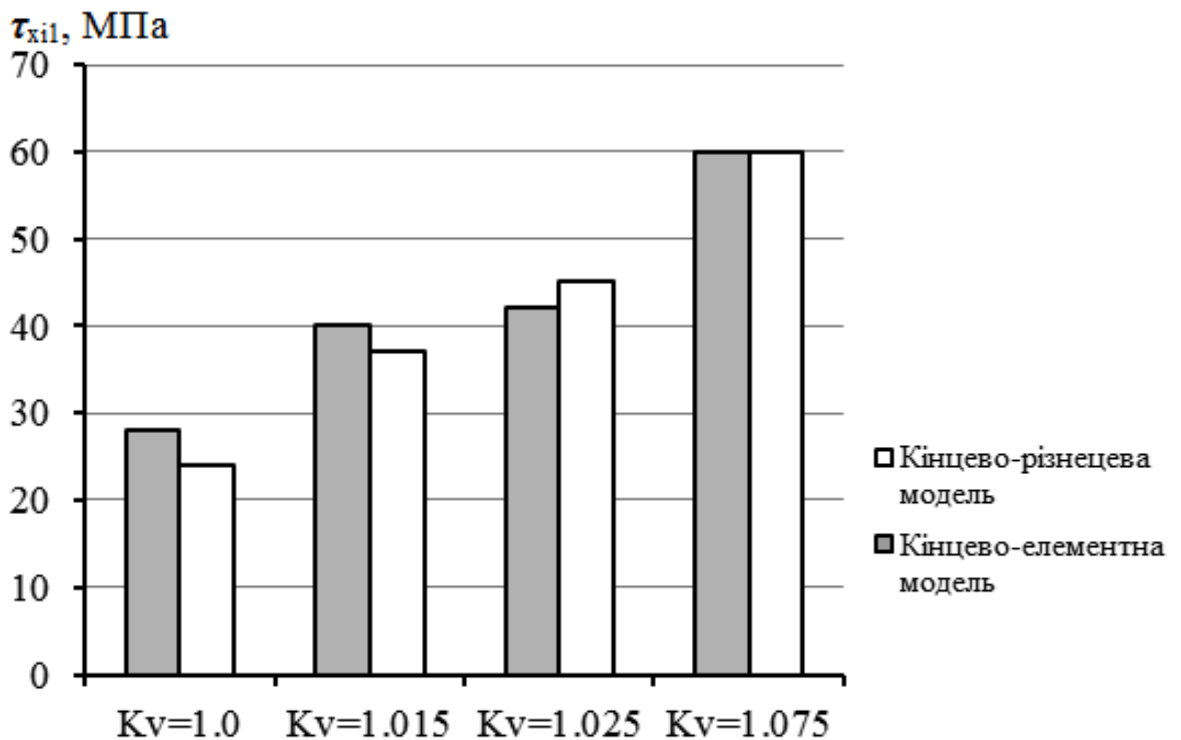


Рисунок 6.20 – Порівняльний аналіз розрахованих значень дотичних контактних напружень, одержаних з використанням запропонованих кінцево-різницевої та кінцево-елементної моделей для електроконтактного наварювання циліндричних деталей

Проведено також кінцево-елементне моделювання процесу формоутворення покриття при відновленні плоских деталей електроконтактним методом за розрахунковою схемою (рис.6.21), яка також включає елемент, що деформується (електродна стрічка) та абсолютно тверді недеформовані елементи (ролик-електрод контактної машини та відновлювана деталь із плоскою поверхнею).

Подача струму наварювання до електродної стрічки подається за схемою, аналогічною до наведеної вище (див. рис. 6.2). Результати аналізу впливу коефіцієнту кінематичної асиметрії на зміну дотичних контактних напружень в зоні контакту електродної стрічки та поверхні деталі при електроконтактному наварюванні плоских деталей представлено на рис.6.22-6.24.

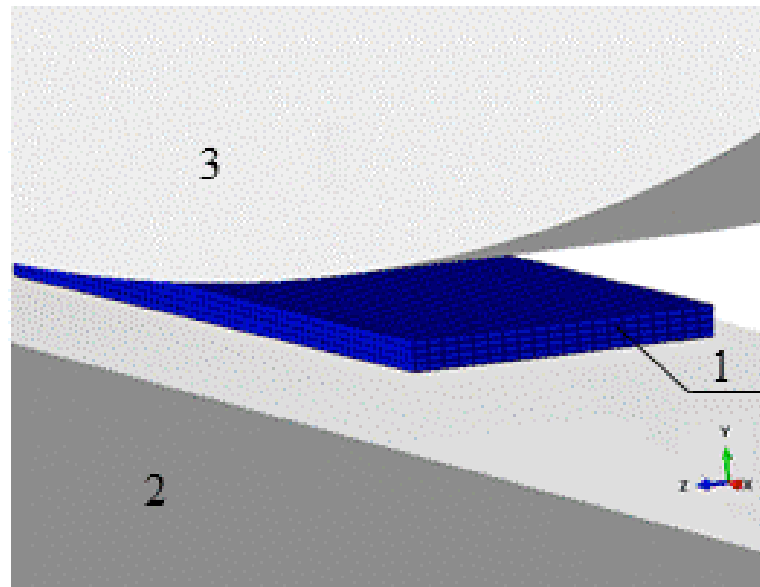


Рисунок 6.21 – Розрахункова схема кінцево-елементної моделі процесу електроконтактного наварювання стрічкою плоских деталей: 1 – електродна стрічка; 2 – плоска деталь; 3 – ролик-електрод

Згідно з результатами розрахунку кінцево-елементної моделі при електроконтактному наварюванні плоских деталей стрічкою без асиметрії процесу (рис.6.22) дотичні контактні напруження розподіляються досить рівномірно відносно нейтрального перетину. Ділянки їх дії рівні, як у зоні контакту з роликом-електродом, так і у зоні контакту з поверхнею деталі. Проте, через те, що процес електроконтактного наварювання відбувається на плоску поверхню, тобто має місце геометрична асиметрія процесу за рахунок співвідношення радіусу ролику-електроду контактної машини та радіусу поверхні деталі, що наближається до нескінченості, значення дотичних контактних напружень в цьому випадку дещо більші (близько 37 МПа) у порівнянні з випадком електроконтактного наварювання на циліндричну деталь (27-30 МПа).

Крім того спостерігається зміщення зони дії дотичних контактних напружень відносно нейтрального перетину по товщині електродної стрічки у термодеформаційному осередку.

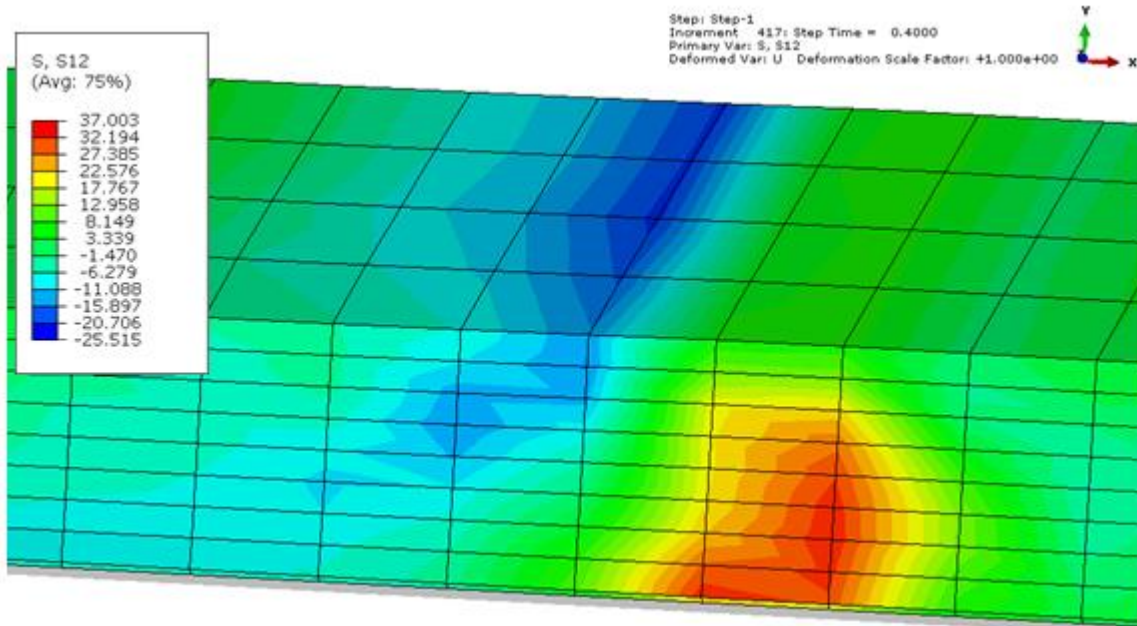


Рисунок 6.22 – Розподіл дотичних контактних напружень в термодформацийному осередку при $K_V=1,0$ при електроконтактному наварюванні стрічкою плоских деталей

Збільшення значення коефіцієнту кінематичної асиметрії K_V до 1,015 приводить до збільшення максимальних значень дотичних контактних напружень при електроконтактному наварюванні здебільшого у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі (рис.6.23).

Причому спостерігається значне зміщення поля дії дотичних контактних напружень у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі відносно нейтрального перетину. Крім того збільшується площа їх дії у цій ділянці. Величина дотичних контактних напружень у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі становить близько 42 МПа У той час як у зоні контакту стрічки з ролик-електродом значення дотичних контактних напружень дещо зменшуються і сягають близько 19 МПа. Зменшується також і площа дії дотичних контактних напружень на цій ділянці товщини електродної стрічки.

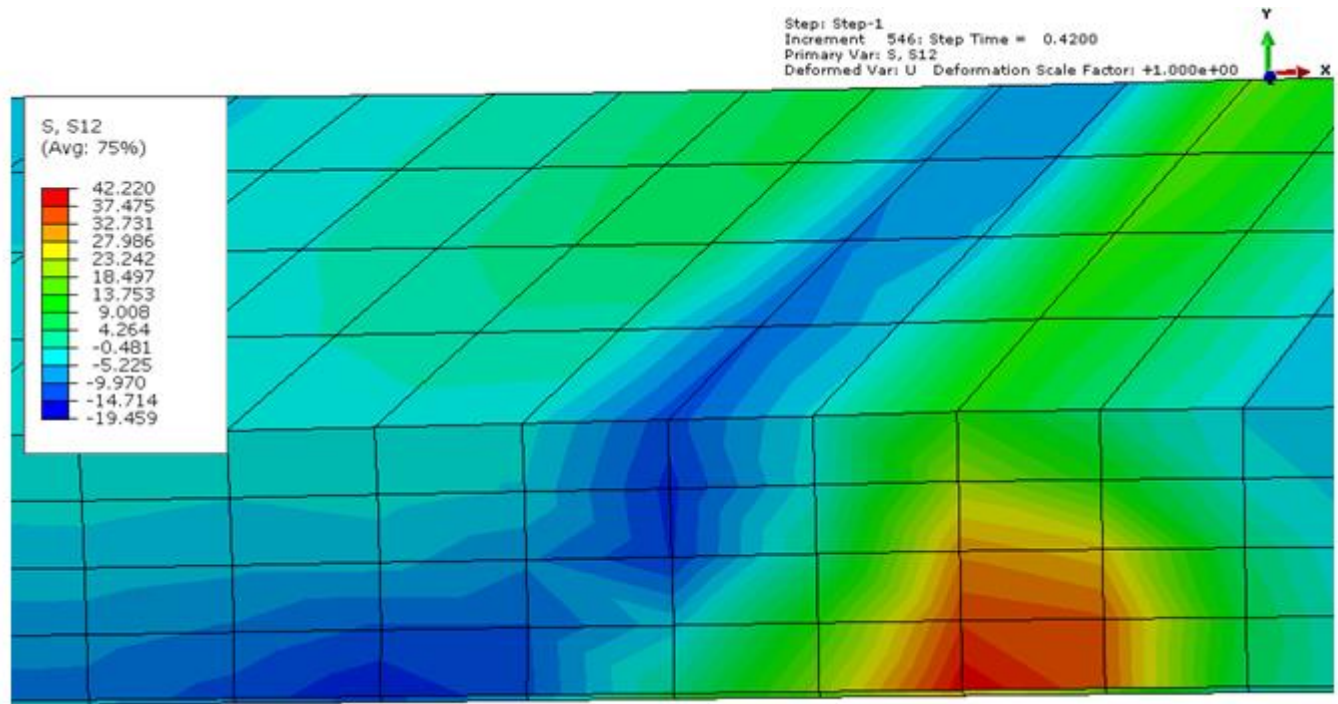


Рисунок 6.23 – Розподіл дотичних контактних напружень в термодформаційному осередку при $K_v=1,015$ при електроконтактному наварюванні стрічкою плоских деталей

Аналогічна картина спостерігається при подальшому підвищенні коефіцієнту кінематичної асиметрії до 1,025 (рис.6.24). Причому у зоні контакту електродної стрічки з роликком-електродом дотичні контактні напруження істотно знижуються, що супроводжується зменшенням і площі їх дії у цій ділянці. На цій ділянці електродного матеріалу дотичні контактні напруження набувають значення 13 МПа. У той час як у зоні контактну електродної стрічки з поверхнею відновлюваної деталі дотичні контактні напруження при електроконтактному наварюванні збільшуються до 45МПа.

Така істотна зміна картини напружено-деформованого стану при збільшенні коефіцієнту кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання плоских деталей електродною стрічкою пояснюється спільною дією і кінематичної асиметрії, яку навмисно створюють спеціальними технологічними прийомами, і геометричної асиметрії, яка обумовлена формою відновлюваної

деталі та ролика-електрода, а саме співвідношенням їх радіусів, який для плоскої деталі прагне до безкінечності.

Розподіл дотичних контактних напружень відносно нейтрального перетину по товщині електродної срічки істотно не змінюється при збільшенні коефіцієнту кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання.

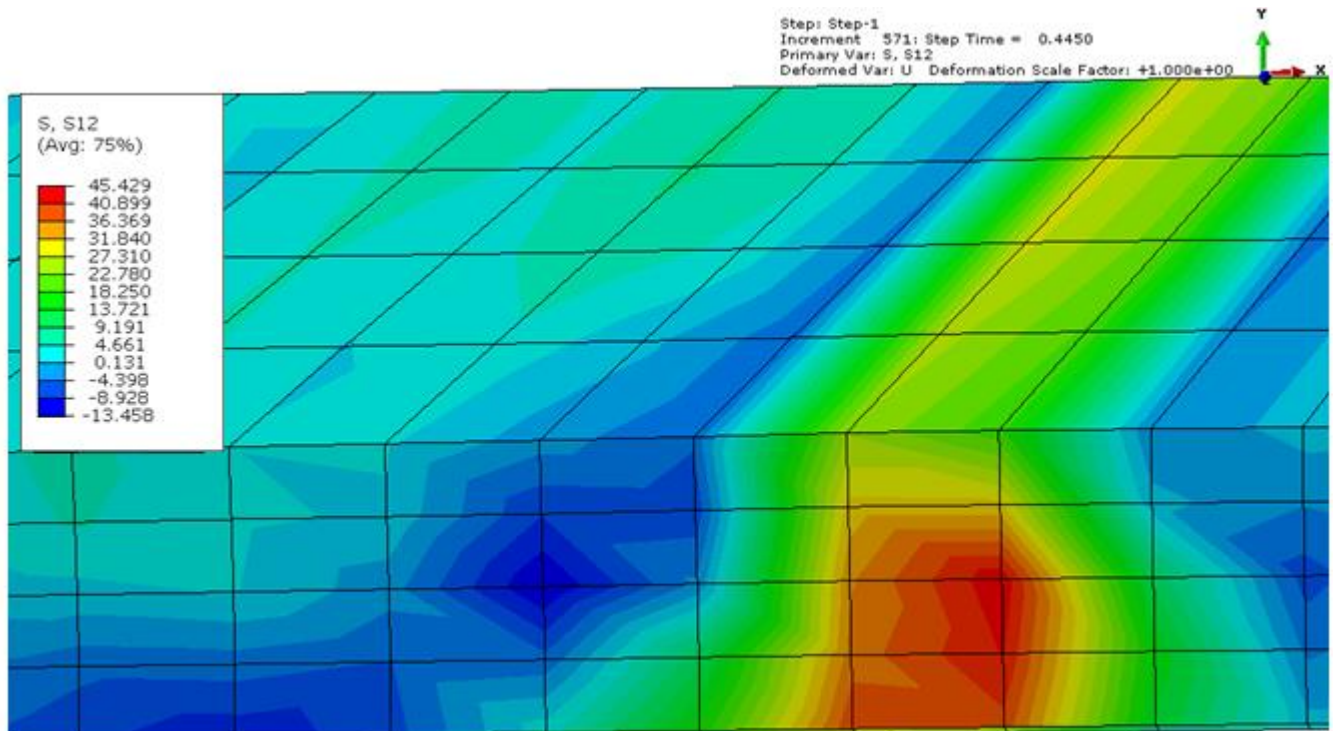


Рисунок 6.24 – Розподіл дотичних контактних напружень в термодформаційному осередку при $K_V=1,025$ при електроконтактному наварюванні стрічкою плоских деталей

Порівняльний аналіз для кінцево-різнецевої математичної моделі та кінцево-елементної моделі процесу електроконтактного наварювання електродною стрічкою плоских деталей (рис.6.25) свідчить про те, що відхилення у розрахунках енергосилових параметрів процесу становлять не більше 13%, що є задовільним результатом, який підтверджує адекватність запропонованих моделей та дозволяє використовувати результати моделювання при проектуванні технології електроконтактного наварювання плоских деталей електродною стрічкою.

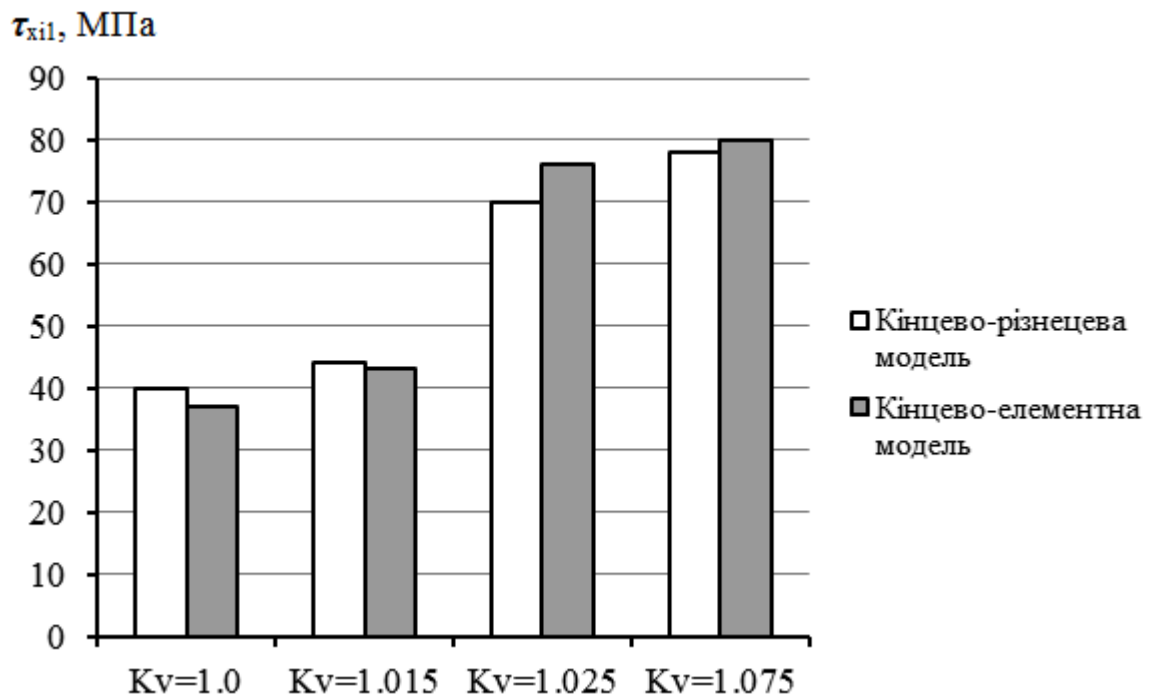


Рисунок 6.25 – Порівняльний аналіз розрахованих значень дотичних контактних напружень, одержаних з використанням запропонованих кінцево-різнецевої та кінцево-елементної моделей для електроконтактного наварювання плоских деталей

Міцність зчеплення привареного електроконтактним методом шару визначали шляхом відриву штифта нормально прикладеним зусиллям на зразках Стеффенса довжиною 20 мм і діаметром 4 мм на розривній машині Р-20 ГОСТ 7855-74. Для підвищення точності вимірювань при випробуванні методику було вдосконалено [347].

Результати експерименту (рис.6.26), проведеного на наварених зразках при $R_1=50\text{мкм}$, $I = 6,5 \text{ кА}$, $P = 1,5 \text{ кН}$, показали, що при величині коефіцієнту кінематичної асиметрії $K_v=1,015$ процесу електроконтактного наварювання міцність зчеплення навареного шару з основним металом максимальна.

Таким чином, в ході кінцево-елементного моделювання підтверджено дані кінцево-різнецевої моделі про вплив коефіцієнту кінематичної асиметрії на збільшення міцності зчеплення навареного шару з поверхнею відновлюваної деталі за рахунок підвищення коефіцієнту тертя в зоні їх контакту.

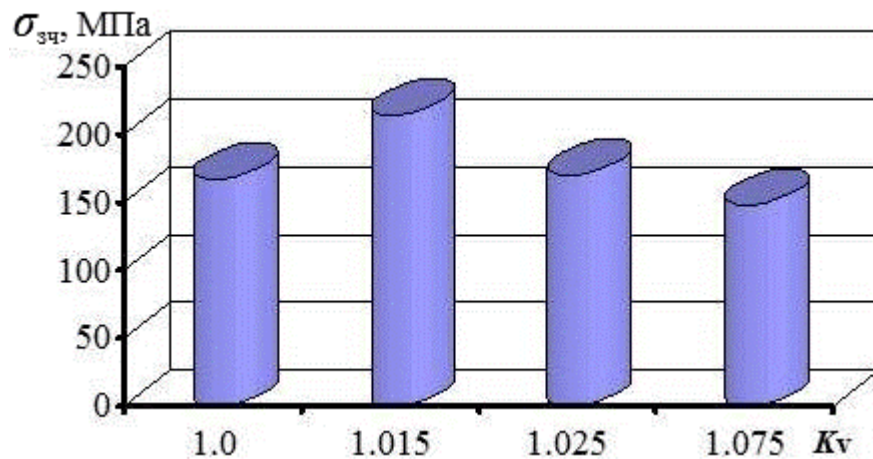


Рисунок 6.26 – Міцність зчеплення наварених зразків при електроконтактному наварюванні з різними значеннями коефіцієнту кінематичної асиметрії

Згідно з отриманими даними оптимальне значення коефіцієнту кінематичної асиметрії складає 1,015 при інших рівних параметрах режиму, що дозволяє підвищити міцність зчеплення навареного шару і одночасно уникнути збільшення механічного та теплового навантаження на метал навареного шару, а також перешкодити підвищенню коефіцієнту тертя в зоні контакту електродного матеріалу з роликоелектродом, що підвищує експлуатаційну стійкість інструменту.

6.2. Проектування системи керування процесом електроконтактного наварювання

6.2.1. Структура системи автоматизації керування процесом електроконтактного наварювання

Істотним недоліком електроконтактного методу відновлення деталей є можливість утворення дефекту у вигляді непровару. Візуально визначити наявність цього дефекту неможливо. В зв'язку з цим необхідне використання методів контролю протікання процесу електроконтактного наварювання в реальному часі, які б забезпечили високу міцність зчеплення привареного шару з поверхнею виробу.

Існуючі автоматизовані системи керування електрозварювальним обладнанням представляють собою складну структуру тісно пов'язаних між собою

підсистем керування, контролю і діагностики процесу наварювання, до якої пред'являються підвищені вимоги відносно функціональних, технічних і експлуатаційних характеристик, що дозволяє забезпечити:

- збирання, обробку та надання інформації щодо ходу технологічного процесу та стану обладнання;
- зберігання в пам'яті бібліотеки стандартних режимів і автоматичний вибір необхідного режиму;
- логічне керування пневматичними, гідравлічними та електромеханічними виконавчими пристроями;
- керування приводами переміщення ролику-електроду;
- керування електричними параметрами процесу наварювання.

Припустимий час на обчислення керуючої дії при керуванні процесом електроконтактного наварювання обмежується кількома мілісекундами. Сучасні мікропроцесорні засоби керуючої обчислювальної техніки оперують з восьми- та шістнадцятирозрядними двійковими числами, при цьому час виконання однієї короткої операції типу «регістр – регістр» знаходиться у межах 1 мкс, обсяг пам'яті не перевищує декількох десятків Кбайт. Підвищення обчислювальної потужності мікропроцесорних засобів керуючої обчислювальної техніки призводить до різкого зростання їх вартості та як наслідок – скороченню галузі застосування. Таким чином, існує протиріччя між високим рівнем вимог, що пред'являються до систем керування електрозварювальним обладнанням, і обмеженими можливостями сучасних мікропроцесорних засобів керуючої обчислювальної техніки [348]. Вирішити це протиріччя можна шляхом максимального врахування специфіки конкретного об'єкту керування в структурі майбутньої автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наварювання.

Вирішення задачі синтезу автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наварювання доцільно проводити з використанням математичної моделі процесу електроконтактного наварювання, що забезпечить прогнозування відклику об'єкту керування на дію збурювальних чинників, а також зафіксувати зміну таких технологічних параметрів процесу електроконтактного

наварювання, як ступінь деформації електродного матеріалу під час наварювання, що необхідне для корекції керуючого сигналу [349, 350]. Розробка автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наварювання передбачає адаптивне керування технологічним процесом, яке забезпечує діагностику та компенсацію збурювальних чинників (наявність водоохолодження ролика-електроду, зниження електроопору в термодформаційному осередку через підплавлення електродного матеріалу), а також урахування можливих змін параметрів об'єкту керування залежно від матеріалів, що використовуються, і геометричних параметрів виробів і електродних матеріалів [351]. При цьому необхідно враховувати, що запропонована математична модель відрізняється від реального об'єкту керування низкою обмежень і спрощень, таких як: втрати тепла, викликані тепловідведенням у деталь і водоохолоджуваній ролик-електрод; зниження сили струму, обумовлене електропровідністю електродного матеріалу та матеріалу деталі.

Забезпечення відповідності створюваних автоматизованої системи керування висунутим вимогам, включаючи їх адаптивні властивості при випадкових збуреннях, передбачає розробку та використання нетривіальних законів керування. Перспективні шляхи вирішення цієї проблеми пов'язані з комплексним застосуванням сучасних інтелектуальних технологій для створення принципово нового покоління систем автоматизації керування складними динамічними об'єктами.

Розвиток цього напрямку дозволяє створювати універсальні, високоточні, швидкодіючі та економічні автоматизованої системи керування різного призначення. В таких системах поєднуються основні переваги сучасних технологій інформаційного забезпечення:

- можливість роботи з базами даних, що дозволяють пояснювати рішення, які приймаються;
- здатність до навчання та корегування даних;
- масивно-паралельна обробка сигналів і, як наслідок, висока швидкодія;
- висока відмовостійкість.

Практичне використання інтелектуальної технології нейросітьового регулювання дозволяє розробити регулятор, який має високі адаптивні властивості і велику функціональну гнучкість [349]. Застосування алгоритму оцінювання збурювальних чинників, виникаючих в процесі електроконтактного наварювання, та оптимальний вибір інформації з бази даних дозволить забезпечити високу ефективність роботи регулятора. Адаптація математичної моделі до особливостей процесу відновлення деталей, а також керування процесом з високою ефективністю та швидкістю здійснюється за допомогою нейрорегулятора, побудованого з використанням відомих методів синтезу нейронних сіток.

Нейронні мережі поділяють за методами навчання: сітки Кохонена з навчанням «без вчителя»; динамічні мережі Хопфілда; мережі прямого та зворотного розповсюдження. Навчальні правила, що застосовуються для створення алгоритму навчання, визначають, яким чином змінюються міжнейронні зв'язки під впливом дії вхідних параметрів. З метою навчання нейронних мереж застосовуються наступні правила: зворотного розповсюдження помилки, квазіньютонівські методи, градієнтні методи і т.і. Найпростіший спосіб навчання нейронної мережі полягає у почерговій зміні коефіцієнту мережі, який також називається вагою зв'язку, таким чином, щоб оптимізувати критерій якості роботи мережі (середньоквадратичне відхилення), але через низьку ефективність способу його розповсюдження обмежене. Спосіб навчання мережі, що полягає у визначенні градієнту помилки по вагам зв'язків вважається більш ефективним. Одним з відомих алгоритмів, які дозволяють розрахувати градієнт помилки, є алгоритм зворотного розповсюдження помилки [353].

На цей час є декілька підходів для побудови нейроконтролерів на базі багат шарової нейронної мережі прямого та зворотного розповсюдження. Всі вони представляють собою послідовну або паралельну схему нейрокерування [354]. Для системи керування процесом електроконтактного наварювання, що розробляється найбільш відповідною є послідовна схема включення нейрорегулятора, що базується на

попередньому навчанні. Навчання здійснюється на множині співвідношень вхід-вихід об'єкту, одержаних при проведенні експерименту на об'єкті та його моделі.

Можливості експериментального навчання нейронної мережі та формування при цьому бази даних значно обмежені у зв'язку з необхідністю проведення великої кількості експериментів, що обумовлене різноманіттям номенклатури використовуваних електродних матеріалів і відновлюваних виробів. Істотним недоліком застосування попередньо навченої моделі є неможливість урахування впливу на протікання процесу електроконтактного наварювання збурювальних чинників і змін у самому об'єкті керування, які вони викликають. В зв'язку з цим внутрішні критерії визначаються спільно на основі результатів безпосередніх експериментів і на основі математичної моделі процесу електроконтактного наварювання.

Задачею використання нейронного регулятора є видача скорегованого керуючого вхідного сигналу, одержаного з бази даних. Дана задача вирішується шляхом навчання нейронної мережі на прикладах із навчальної множини. Критерієм навчання є середньоквадратична помилка навчання E . Для одержання помилки узагальнення та оцінки часу прогнозування поведінки об'єкту керування необхідна адаптація нейронної мережі за тестовою вибіркою. В цьому випадку розрахована помилка E буде зовнішнім критерієм, який дозволяє оцінити час прогнозування за помилкою моделювання. В зв'язку з цим можна сформулювати наступні вимоги до функціонування нейрорегулятора: нейрорегулятор повинен задавати силу струму наварювання електроконтактної машини з урахуванням зусилля на ролик-електроді і часу імпульсу струму наварювання; нейрорегулятор повинен сформувати сигнал корегування керуючої дії з урахуванням зміни ступеню деформації електродного матеріалу в процесі електроконтактного наварювання.

Таким чином, для синтезованої системи керування процесом електроконтактного наварювання доцільно вести послідовне включення програмного і нейронного регулятора (рис.6.27).

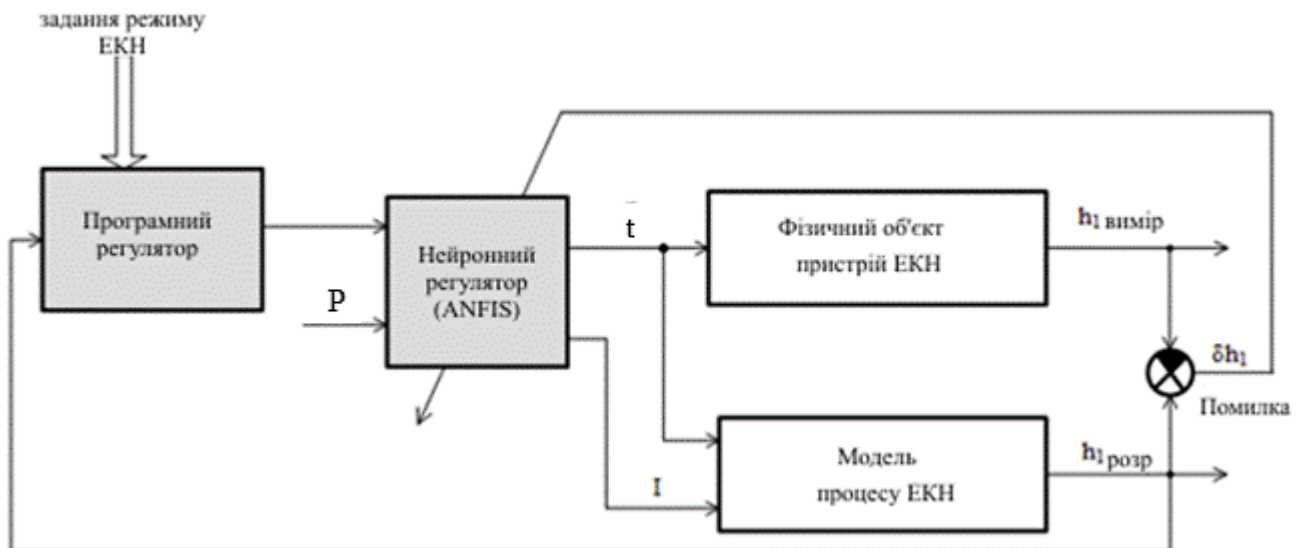


Рисунок 6.27 – Послідовна схема включення програмного регулятора, нейрорегулятора і моделі процесу електроконтактного наварювання

6.2.2. Оцінка ступеню інформативності бази даних процесу електроконтактного наварювання

Інформацію, яка накопичена в базі даних і використовується для генерації коригуючої дії при керування процесом електроконтактного наварювання, представлено у вигляді числових даних, сформованих або за допомогою пасивного експерименту, або на основі математичного моделювання процесу відновлення. На практиці широко розповсюджене керування складними об'єктами за допомогою таблиць попередньо заданих значень, які враховують всі імовірні ситуації, що дозволяє забезпечити необхідне протікання процесів. Реалізація цієї задачі обмежена обсягом даних, необхідних для забезпечення високої якості результату процесу керування, тобто таблиця параметрів повинна мати певну достатність [355].

Мірою невизначеності будь-яких даних, які описуються множиною змінних x_1, x_2, \dots, x_n , що містять ознаки наявності або відсутності інформації, а також відповідні їм імовірності p_1, p_2, \dots, p_n , є інформаційна ентропія p_k :

$$H_u = -\sum_{k=1}^n p_k \ln p_k \quad \text{при} \quad \sum_{k=1}^n p_k = 1. \quad (6.1)$$

Невизначеність інформації відсутня при $H_u = 0$ і будь-якому з p_k рівному 1. Найбільше значення ентропії досягається при тотожності p_k між собою, що означає максимальну інформаційну невизначеність системи. Таким чином, інформативність системи відображає не саме значення ентропії, а її інтегральне вираження, яке відображає зміну ентропії в процесі заповнення таблиці даними.

Постанова задачі виглядає наступним чином. Дана таблиця даних з n кількістю елементів, m параметрів і $n-m$ пробілів. Необхідно знайти величину ентропії H і визначити достатність інформації таблиці даних, що дозволить здійснювати успішне регулювання процесу. При цьому під час керування технологічним процесом використовуються дані таблиці, які знаходяться в елементах об'ємом k значень (рис. 6.28). Враховуючи, що число елементів об'ємом k не перевищує чисел m і $n-m$, технологічний процес може мати k варіантів результатів. Тоді сприятливі результати протікання процесу можуть бути позначені через $A_0, A_1, A_2, \dots, A_k$ з імовірністю p_{A_i} , а несприятливі через $\overline{A_0}, \overline{A_1}, \overline{A_2}, \dots, \overline{A_k}$ з імовірністю $p_{\overline{A_i}}$.

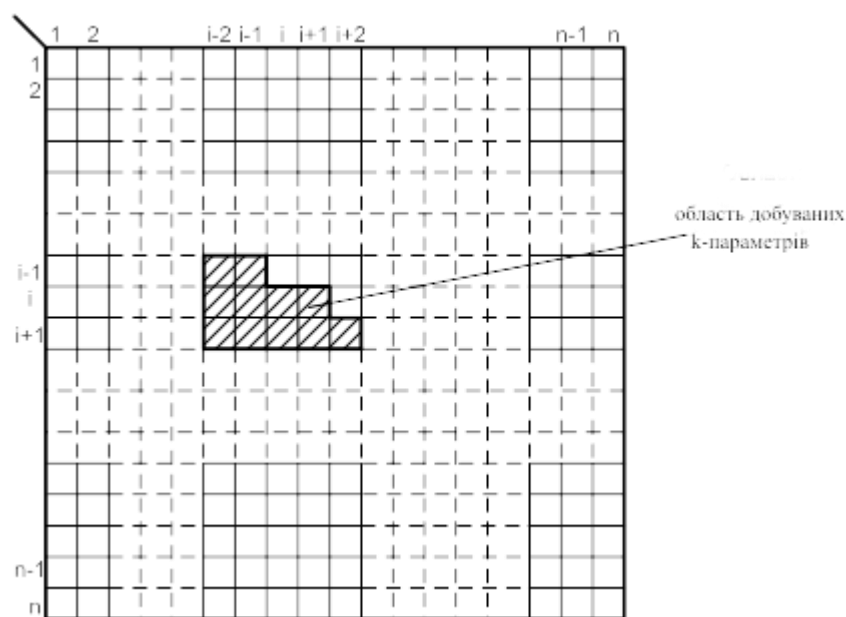


Рисунок 6.28 – Область добуваних із таблиці параметрів

Якщо невідомий результат A_i , то в таблиці даних після вилучення інформації залишиться $(m - i)$ значень і $(n - m - k + i)$ пробілів, а імовірності p_{A_i} і $p_{\bar{A}_i}$ приймають наступні значення, відповідно:

$$p_{A_i} = \frac{m-i}{n-k}, \quad p_{\bar{A}_i} = \frac{n-m-k+i}{n-k}. \quad (6.2)$$

Таким чином, інформаційна ентропія таблиці даних при послідовному вилученні інформації може бути визначена наступним чином:

$$H_{u_i} = \sum_{i=1}^k -p_{A_i} \log(p_{A_i}) = \sum_{i=1}^k \left(-\frac{m-i}{n-k} \log\left(\frac{m-i}{n-k}\right) \right). \quad (6.3)$$

В якості міри інформативності скористаємося функцією бажаності Харрінгтона [356, 357]:

$$d = e^{-e^{-y}}, \quad (6.4)$$

де y – відносний параметр масштабу аргументу функції.

Для переходу від ентропії до міри інформативності d необхідно привести функцію бажаності Харрінгтона до наступного вигляду [358]:

$$d = \sum_{i=1}^k \left(-e^{\frac{-1}{p_{A_i}}} \log e^{\frac{-1}{p_{A_i}}} \right). \quad (6.5)$$

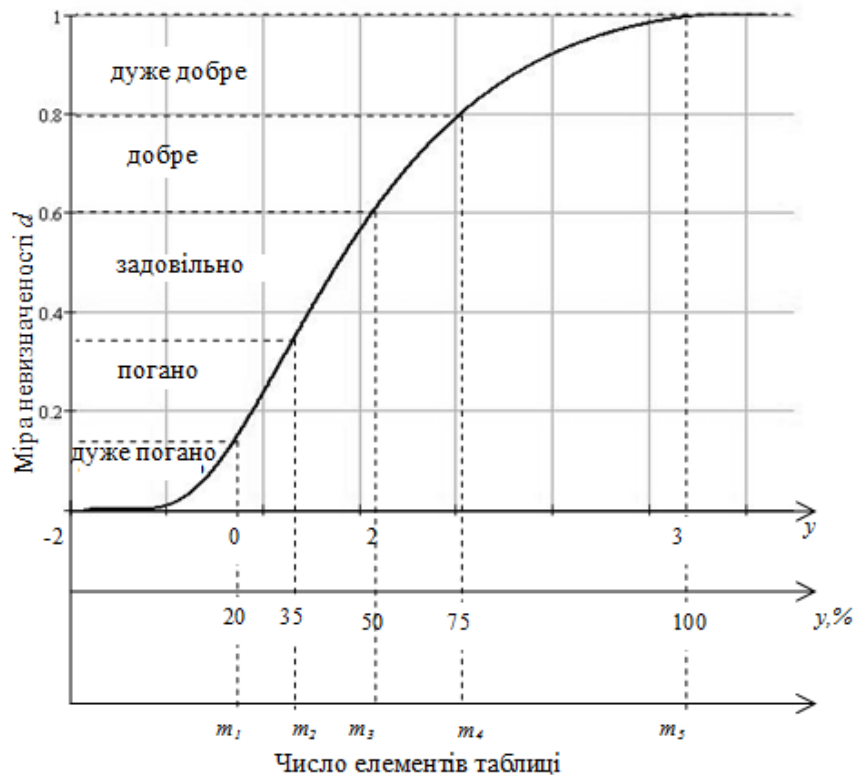


Рисунок 6.29 – Графік зміни міри невизначеності d залежно від числа елементів таблиці з даними

Оцінка інформативності таблиці даних за допомогою ентропії та функції бажаності Харрінгтона представлена у вигляді графіку зміни інформативності (рис.6.29) зі шкалою міри інформативності, яка має стандартні для функції Харрінгтона відмітки (табл.6.5).

Таблиця 6.5

Оцінка інформативності за шкалою міри інформативності

| Оцінка інформативності | Рівень d | Резюме |
|---------------------------------|------------|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Дуже погано, менше 20% даних | 0-0,17 | Проведення технологічного процесу неможливе, необхідно доповнити таблицю даних |
| Погано, менше 35% даних | 0,17-0,37 | Проведення технологічного процесу небажане, необхідні додаткові дані |

Продовження таблиці 6.5

| 1 | 2 | 3 |
|-----------------------------|-----------|--|
| Задовільно, до 50% даних | 0,37-0,60 | При проведенні технологічного процесу можливі невірні дії через відсутність достатньої кількості значень |
| Добре, від 51 до 75% даних | 0,60-0,80 | Можливий хороший результат проведення технологічного процесу, кількість параметрів, занесених в елементи таблиці, достатня |
| Дуже добре, понад 75% даних | 0,80-1,00 | Успішне керування технологічним процесом |

6.2.3. Корегування та аналіз параметрів бази даних технологічного процесу електроконтактного наварювання

База даних системи керування процесом електроконтактного наварювання містить інформацію про наступні параметри:

- час протікання імпульсу зварювального струму та зусилля на ролику-електроді;
- величина зварювального струму.

Для здійснення ефективного керування протікання процесом електроконтактного наварювання необхідно встановити певну тривалість імпульсу зварювального струму при заздалегідь заданих значеннях зусиллях на ролику-електроді і силі зварювального струму. Дана вимога робить необхідним створення бази даних, яка містить відомості про силу та тривалість імпульсу зварювального струму при різних товщинах електродного матеріалу та різних зусиллях на ролику-електроді.

Математичне моделювання процесу електроконтактного наварювання дозволило сформулювати таблицю бази даних на основі розрахованих значень режимів процесу залежно від товщини електродного матеріалу. Крім того, формування ба-

зи даних також проводилось із застосуванням пасивного експерименту, що, проте, не дозволяє заповнити всю таблицю через обмежену кількість експериментів. В зв'язку з цим заповнення пробілів здійснювалось із застосуванням регресійного аналізу. Необхідно також передбачити ситуацію, коли одержані за допомогою модулювання дані стануть неадекватними, що потребує перенавчання математичної моделі. Таким чином, доцільно використовувати наступну методику заповнення пробілів у таблиці бази даних [359-361], згідно з якою на початковій стадії заповнення пробілів виконують оцінку інформативності таблиці знань з використанням ентропії та функції бажаності Харрінгтона. Така процедура забезпечує оцінку точності заповнення таблиці ітераційному методом. Наступний етап реалізує алгоритм заповнення пробілів. При цьому вектор даних x (тривалість імпульсу зварювального струму $t_{\text{имп}}$) з k пробілами представлена у вигляді тривимірної лінійної багатобразності L_x , що є паралельною трьом координатним осям $(I_{\text{в}}, P_{\text{в}}, \delta)$, які відповідають пропущеним даним. З урахуванням прийнятих обмежень на пропущенні значення місце L_x займає прямокутний паралелепіпед $\delta_x \subset L_x$ [361]. Особливу роль у всьому подальшому дослідженні відіграють дві точки: $\text{Pr}_P(x)$ – найближча до x (відповідно до L_x або δ_x) точка P , і для некомплектних даних – $\text{Im}_P(x)$ – найближча до P точка L_x (або, відповідно, P_x) [360].

Застосування багатобразності P дозволяє виконувати низку операцій, серед яких:

- заповнення пробілів – заміна x на $\text{Im}_P(x)$,
- ремонт даних (заміщення даних моделлю) – заміна x на $\text{Pr}_P(x)$.

Регресійна залежність зміни даних таблиці визначається заповненням пробілів, які відповідають залежним змінним, по відомим значенням незалежних.

Ітераційний процес моделювання даних складається у тому, що для вихідних даних будується найкраща (в певному смислі) модель – багатобразність P малої розмірності. Далі з даних x віднімаються проекції $\text{Pr}_P(x)$. При цьому одержуємо відхилення від першої моделі. Для цієї множини відхилень знову будується проста модель і т.і., доки всі відхилення не стануть достатньо близькими до нуля.

При заповненні пробілів у таблицях бази даних виникає необхідність вирішення декількох задач: власне заповнення пропусків у таблиці; редагування значень у таблиці для одержання найкращого результату роботи моделі; створення у таблиці обчислювача для заповнення пробілів у необхідному рядку. Вирішення вказаних задач здійснюється методом послідовного наближення множини векторів даних прямими.

Основна процедура полягає у вирішенні задачі визначення найбільш наближеного значення рядку таблиці з пропусками $A=(a_{ij})$ матрицею виду $x_i y_j + b_j$ методом найменших квадратів [360]:

$$\Phi = \sum_{\substack{i,j \\ a_{ij} \neq @}} (a_{ij} - x_i y_j - b_j)^2 \rightarrow \min. \quad (6.6)$$

Визначивши фіксовані два фіксовані вектори, третій вектор знаходять за відомими формулами. Після визначення приблизних вихідних значень перших двох векторів, та розрахунку значення третього, оголошують невідомим інший вектор, і відповідно визначають його значення. [362] Фіксовані значення x_i дозволяють визначити значення векторів y_j і b_j , виконуючи таким чином розщеплення лише на дві складові.

При фіксованих векторах y_j і b_j значення x_i , що дозволяють досягти мінімуму у виразі (6.6), визначаються з умови $\partial\Phi/\partial x_i=0$ наступним чином [360]:

$$x_i = \left(\sum_{\substack{j \\ a_{ij} \neq @}} (a_{ij} - b_j) y_j \right) / \left(\sum_{\substack{j \\ a_{ij} \neq @}} (y_j)^2 \right). \quad (6.7)$$

При фіксованому вектору x_i значення y_j і b_j , які дозволяють досягти мінімального значення при розрахунку виразу (6.6), визначаються з умов

$\partial\Phi/\partial y_j=0$ і $\partial\Phi/\partial b_j=0$ [361]. Для кожного значення j створюють систему з двох рівнянь відносно y_j і b_j [361]:

$$\begin{cases} y_j A_{01}^j + b_j A_{00}^j = B_0^j \\ y_j A_{11}^j + b_j A_{10}^j = B_1^j \end{cases}, \quad (6.8)$$

$$\text{де } A_{kl}^j = \sum_{\substack{i \\ a_{ij} \neq @}} x_i^{k+l}, \quad B_k^j = \sum_{\substack{i \\ a_{ij} \neq @}} a_{ij} x_i^k, \quad k=0..1, l=0..1.$$

Виражаючи з першого рівняння b_j і підставляючи одержане значення у друге, отримаємо [361]:

$$y_j = \frac{B_1^j - B_0^j \frac{A_{10}^j}{A_{00}^j}}{A_{11}^j - A_{01}^j \frac{A_{10}^j}{A_{00}^j}}, \quad b_j = \frac{B_0^j - y_j A_{01}^j}{A_{00}^j}. \quad (6.9)$$

Початкові значення становлять:

y – випадковий, нормований на 1 (тобто $\sum_j y_j^2 = 1$).

$$b_j = \frac{1}{n_j} \sum_{\substack{i \\ a_{ij} \neq @}} a_{ij}, \quad \text{де } n_j = \sum_{\substack{i \\ a_{ij} \neq @}} 1 \quad (\text{число відомих даних у } j\text{-му стовбці}), \quad \text{тобто } b_j$$

визначається як середнє значення у стовбці.

Критерієм зупинки є малість відносного зменшення помилки $\Delta\Phi/\Phi$, де $\Delta\Phi$ – одержане за цикл зменшення значення Φ , а Φ – власне поточне значення. Другий критерій – малість власне значення Φ . Остаточню: процедура зупиняється, якщо $\Delta\Phi/\Phi < \varepsilon$ або $\Phi < \delta$ для деякий ε при $\delta \rightarrow 0$ [361].

Послідовне вичерпання матриці A . Для даної матриці A знаходиться найкраще наближення матрицею P_1 виду $x_i y_j + b_j$. Далі, для $A - P_1$ знаходять найбільше наближення того ж виду P_2 і т.і.

Q -факторне заповнення пропусків представляє собою їх визначення із суми Q одержаних матриць виду $x_i y_j + b_j$, Q -факторний “ремонт” таблиці здійснюється за рахунок її заміни на суму Q матриць виду $x_i y_j + b_j$. В результаті описаного процесу будується послідовність матриць P_q виду $x_i y_j + b_j$ ($P_q = x_i^q y_j^q + b_j^q$), яка вичерпує вихідну матрицю A із заданою точністю [361].

Операція відновлення даних у рядку a_j , який надходить на обробку, з пробілами (деякі $a_j = @$) описується наступним чином. Для кожного q по заданому рядку визначають число $x^q(a)$ і вектор a_j^q [361]:

$$\begin{aligned}
 a_j^0 &= a_j \quad (a_j \neq @); \\
 x^1(a) &= \left(\sum_{\substack{j \\ a_j \neq @}} (a_j^0 - b_j^1) y_j^1 \right) / \left(\sum_{\substack{j \\ a_j \neq @}} (y_j^1)^2 \right); \\
 a_j^1 &= a_j^0 - b_j^1 - x^1(a) y_j^1 \quad (a_j \neq @); \\
 x^q(a) &= \left(\sum_{\substack{j \\ a_j \neq @}} (a_j^{q-1} - b_j^q) y_j^q \right) / \left(\sum_{\substack{j \\ a_j \neq @}} (y_j^q)^2 \right); \\
 a_j^q &= a_j^{q-1} - b_j^q - x^q(a) y_j^q \quad (a_j \neq @), \tag{6.10}
 \end{aligned}$$

де багатобразність P – пряма, координати точок якої на P задаються параметричним рівнянням $z_j = t y_j + b_j$, а проекція $Pr_P(a)$ визначається згідно виразу (6.10):

$$Pr(a) = t(a) y_j + b_j; \tag{6.11}$$

$$t(a) = \left(\sum_{\substack{j \\ a_j \neq @}} (a_j - b_j) y_j \right) / \left(\sum_{\substack{j \\ a_j \neq @}} (y_j)^2 \right). \quad (6.12)$$

Для Q -факторного відновлення даних приймали:

$$\bar{a}_j = \sum_{q=1}^Q x^q(a) y_j^q + b_j^q, \quad (a_j \neq @). \quad (6.13)$$

Якщо пробіли відсутні, то описаний метод приводить до сингулярного розкладання вихідної таблиці даних. В такому разі, починаючи з $q=2$, $P_q = x_i^q y_j^q$ ($b=0$), що в загальному випадку не підтверджується.

6.2.4. Синтез регулятора та алгоритму керування процесом електроконтактного наварювання на основі бази даних

Керування процесом електроконтактного наварювання за допомогою бази даних потребує створення правил обробки одержуваних даних і видачі певної керуючої дії, що робить необхідним розробку такого регулятора, який би об'єднав числову інформацію з лінгвістичною, яка представляє собою базу правил. Формування лінгвістичних знань про протікання процесу електроконтактного наварювання задається режимами технологічного процесу, які можуть бути представлені у вигляді нечітких правил. З метою здійснення операції керування необхідно визначити значення керуючих сигналів, які забезпечують компенсацію збурювальних чинників, враховуючи поточний стан об'єкту керування [363].

В зв'язку з цим синтез регулятора процесу електроконтактного наварювання доцільно проводити з використанням методу нечіткого нейрокерування на базі гібридної багатошарової мережі з прямим розповсюдженням [363, 364]. На першому етапі розробки регулятора формують базу правил для нечіткої системи, що предста-

вляє собою складання таких нечітких правил, які дозволяли б за значеннями вхідних сигналів сили зварювального струму $x_1(i)$ і зусилля на ролику-електроді $x_2(i)$ одержати вихідні сигнали $d(i)$ на включення регулятора часу протікання імпульсу зварювального струму [365]. Для цього необхідно виїняти множини навчальних пар з бази знань у наступному вигляді [366]:

$$[x_1(i), x_2(i), d(i)], \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6.14)$$

Графічне зображення пар бази знань представлено на рис. 6.30.

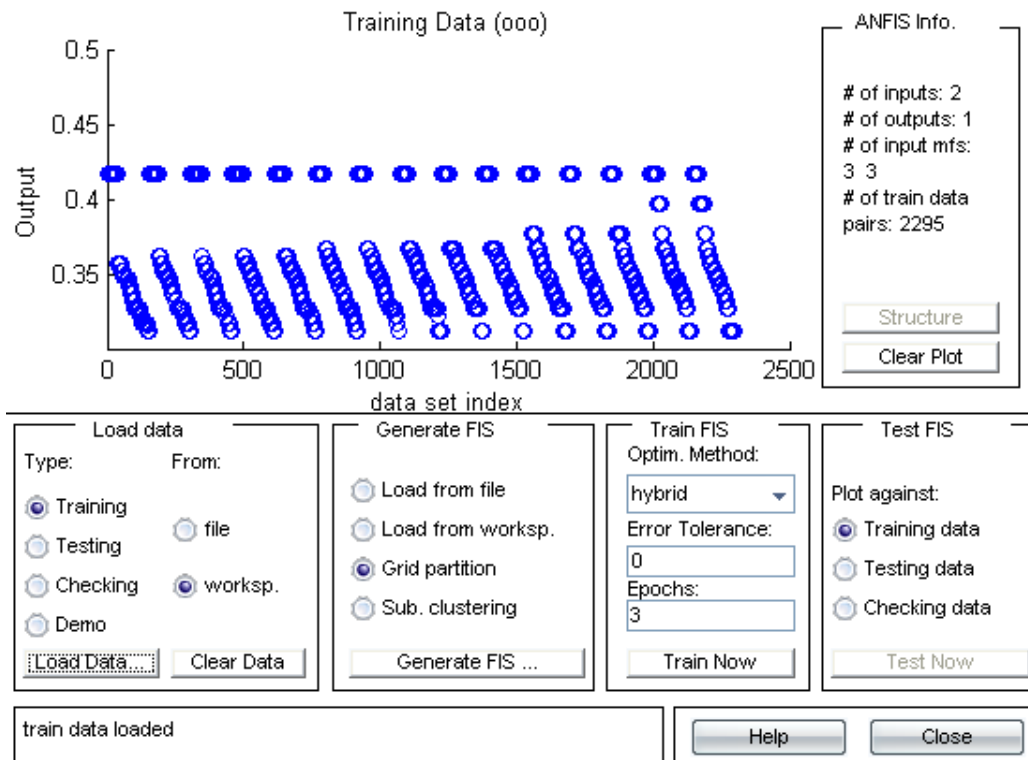


Рисунок 6.30 – Графічне зображення пар бази знань [97]

На другому етапі простори вхідних і вихідних сигналів розділяються в табличній базі даних наступним чином [366]:

$$\begin{aligned}
 x_1^- &= \min(x_1), x_1^+ = \max(x_1); \\
 x_2^- &= \min(x_2), x_2^+ = \max(x_2); \\
 d^- &= \min(x), d^+ = \max(d).
 \end{aligned}
 \tag{6.15}$$

Кожен певний інтервал лінгвістичних змінних поділяють на $(2N+1)=5$ областей ($N=2$). Далі в кожній області виконують фазифікацію параметрів [366]:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \{NB, NS, Z, PS, PB\}; \\
 X_2 &= \{NB, NS, Z, PS, PB\}; \\
 D &= \{NB, NS, Z, PS, PB\},
 \end{aligned}
 \tag{6.16}$$

де NB – дуже мала величина;

NS – мала величина;

Z – середня величина;

PS – велика величина;

PB – дуже велика величина.

Загальна форма нечіткого правила для коректного функціонування модулю нечіткого керування представлена у вигляді [367]:

$$R^k: \text{IF } (x_1 \text{ is } A_1^k) \text{ AND } (x_2 \text{ is } A_2^k) \text{ THEN } (D \text{ is } B^k)
 \tag{6.17}$$

Стосовно до синтезованого модулю нечіткого нейрокерування з використанням додатку *MatLabFuzzyLogicToolbox* база нечітких правил має вигляд:

$R^1: \text{IF } (x_1 \text{ is in1mf1}) \text{ AND } (x_2 \text{ is in2mf1}) \text{ THEN } (D \text{ is out1mf1});$

$R^2: \text{IF } (x_1 \text{ is in1mf1}) \text{ AND } (x_2 \text{ is in2mf2}) \text{ THEN } (D \text{ is out1mf2});$

$R^3: \text{IF } (x_1 \text{ is in1mf1}) \text{ AND } (x_2 \text{ is in2mf3}) \text{ THEN } (D \text{ is out1mf3});$

$R^4: \text{IF } (x_1 \text{ is in1mf2}) \text{ AND } (x_2 \text{ is in2mf1}) \text{ THEN } (D \text{ is out1mf4});$

$R^5: \text{IF } (x_1 \text{ is in1mf2}) \text{ AND } (x_2 \text{ is in2mf2}) \text{ THEN } (D \text{ is out1mf5});$

R^6 : IF (x_1 is in1mf2) AND (x_2 is in2mf3) THEN (D is out1mf6);

R^7 : IF (x_1 is in1mf3) AND (x_2 is in2mf1) THEN (D is out1mf7);

R^8 : IF (x_1 is in1mf3) AND (x_2 is in2mf2) THEN (D is out1mf8);

R^9 : IF (x_1 is in1mf3) AND (x_2 is in2mf3) THEN (D is out1mf9).

Одержані лінгвістичні знання у вигляді бази правил можна представити у вигляді нечітких множин із функцією належності декартового добутку [366]:

$$\mu_{A^k}(x) = \mu_{A_1^k \times \dots \times A_n^k}(x) = \mu_{A_1^k}(x_1) \dots \mu_{A_n^k}(x_n). \quad (6.18)$$

На третьому етапі проводиться опис блоку виводу на функції належності нечіткої множини B^k [367]:

$$\mu_{B^k}^-(y) = \sup_{x_1 \dots x_n \in x} \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \mu_{A_i^k}(x_i) \}. \quad (6.19)$$

Блок фазифікації реалізується на основі операції типу сінглтон, що дозволить отримати [363]:

$$A(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = \bar{x} \\ 0, & \text{если } x \neq \bar{x} \end{cases}. \quad (6.20)$$

В формулі (6.19) максимум досягається тільки у випадку, коли $x = \bar{x}$, тобто для $\mu_{A_i^k}(\bar{x}) = 1$. При цьому вираз (6.19) приймає вигляд [367]:

$$\mu_{B^k}^-(y) = \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \}. \quad (6.21)$$

На п'ятому етапі описується блок дефазифікації. Тут доцільно застосовувати метод дефазифікації *centeraveragedefuzzification*, відповідно до якого:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \mu_{B^k}(\bar{y}^k)}{\sum_{k=1}^N \mu_{B^k}(\bar{y}^k)}, \quad (6.22)$$

де \bar{y}^k – центр (*center*) нечіткої множини B^k , що являє собою точку, в якій $\mu_{B^k}(y)$ сягає максимального значення:

$$\mu_{B^k}(\bar{y}^k) = \max_y \{\mu_{B^k}(y)\}. \quad (6.23)$$

При підстановці виразу (6.21) у формулу (6.22) одержуємо рівність:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \left(\mu_{B^k}(\bar{y}^k) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\mu_{B^k}(\bar{y}^k) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}. \quad (6.24)$$

Враховуючи, що максимальне значення, яке $\mu_{B^k}(y)$ може отримати в точці \bar{y}^k , дорівнює 1, тобто $\mu_{B^k}(\bar{y}^k) = 1$, то формула (6.24) приймає вигляд:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \right)}. \quad (6.25)$$

Заключним етапом проектування модулю нечіткого керування є визначення форми зображення нечітких множин A_i^k , $i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, N$. В якості форми нечітких множин застосовано функцію Гаусса:

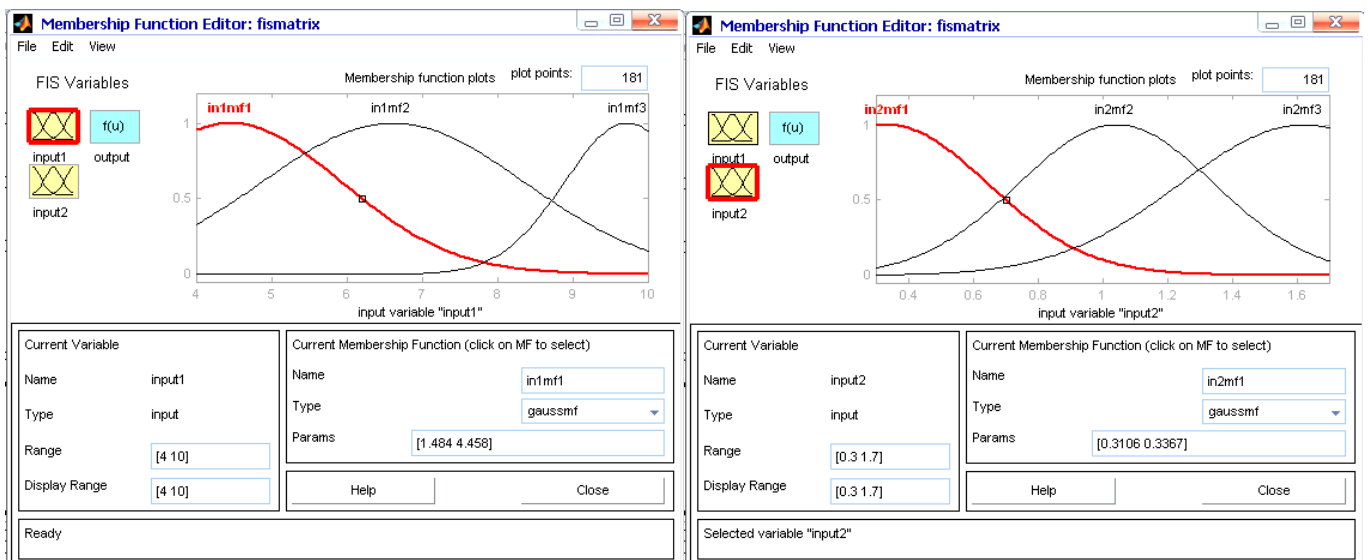
$$\mu_{A_i^k}(x_1) = \exp\left[-\left(\frac{x_1 - \overline{x}_i^k}{\sigma_i^k}\right)^2\right], \quad (6.26)$$

де \overline{x}_i^k і σ_i^k – параметри, які мають фізичну інтерпретацію;

\overline{x}_i^k – центр;

σ_i^k – ширина гауссової кривої.

Фазифікація та форми зображення функцій належності нечітких множин вхідних даних зображені на рис. 6.31.



а)

б)

Рисунок 6.31 – Поділення просторів вхідних змінних на області та відповідні їм функції належності для вхідної змінної x_1 (а) та x_2 (б)

Математичний опис проектованого модулю нечіткого керування може бути одержаний шляхом об'єднання методу дефазифікації (6.24), функції належності (6.19) і блоку фазифікації з операцією типу сінглтон (6.20), а також із гауссовою функцією належності (6.26) [368]. Тоді модуль нечіткого керування набуде остаточного вигляду:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N y^k \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}. \quad (6.27)$$

Застосування математичного опису модулю нечіткого керування на базі функції Гаусса (6.26) і програмного додатку *AnfisMatLabFuzzyLogicToolbox* [369] дозволило розробити структурну схему реалізації модуля нечіткого керування, яка зображена на рис. 6.32, що представляє собою сітку з двома входами та нечіткими правилами. Структура модуля нечіткого керування містить чотири шари, де функція Гаусса реалізована у першому шарі.

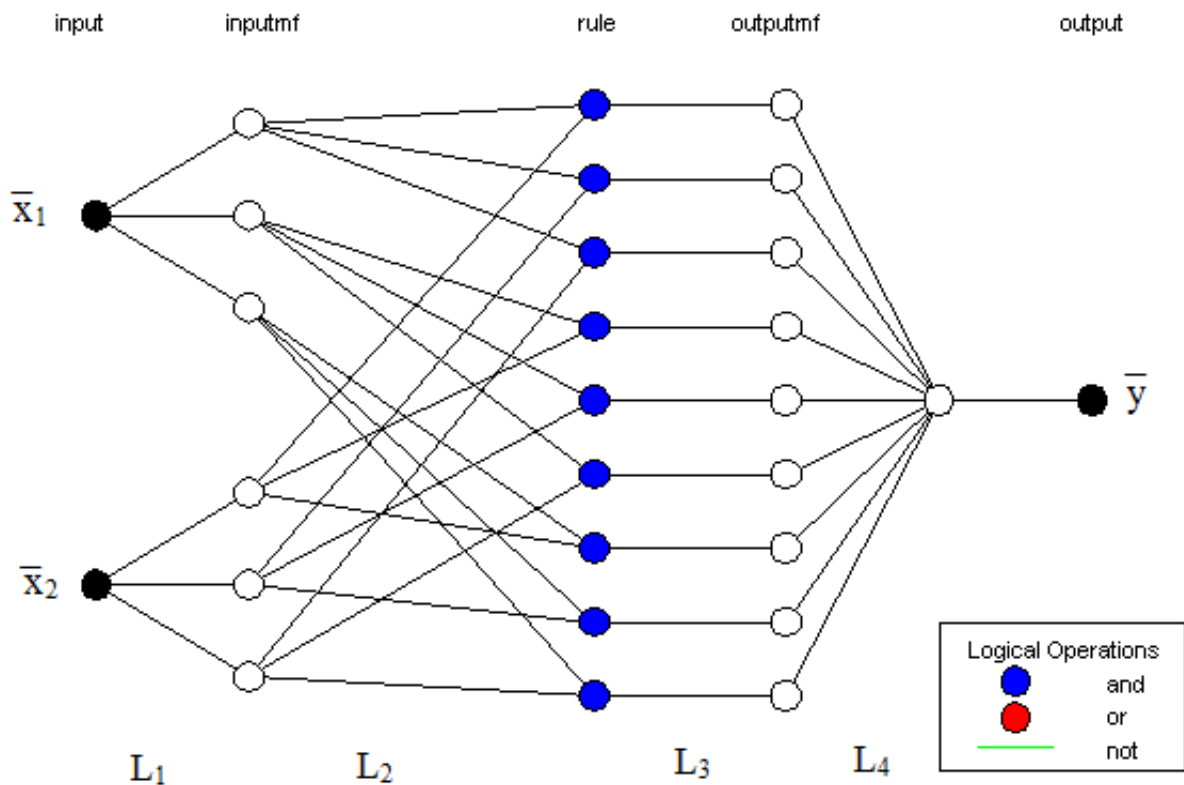


Рисунок 6.32 – Структурна схема модулю нечіткого керування (Fuzzy)

Кожен елемент шару 1 (L1) реалізує функцію належності нечіткої множини A_i^k , $i = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, N$. У шарі L1 параметри функції Гаусса \overline{X}_i^k і σ_i^k є центром і шириною цієї функції. Кількість вузлів у шарі L1 одержаної структури модулю нечіткого керування відповідає кількості нечітких правил. У другому шарі L2 результатом виводу є значення функції належності $\mu_{\overline{B}^k}(\overline{y}^k)$. Зв'язок між вузлами другого шару та першого здійснюється таким чином, щоб кожен вузол другого шару з'єднувався зі всіма вузлами першого шару. У третьому та четвертому шарах реалізується функція дефазифікації (6.24). На виході четвертого шару формується чітке вихідне значення модулю керування \overline{y} .

Навчальна вибірка (\overline{x}, d) з вихідним вектором $\overline{x} = [\overline{x}_1, \dots, \overline{x}_n]$ та еталонним сигналом d дозволяє проводити навчання мережі на базі алгоритму зворотного розповсюдження помилки, що є доцільним через багат шарову структуру модулю нечіткого керування. Для визначення погрішності застосовується формула [369, 370]:

$$e = \frac{1}{2} [\overline{y}(\overline{x}) - d]^2, \quad (6.28)$$

Необхідність одержання мінімального значення погрішності (6.28) для забезпечення ефективної роботи системи керування робить доцільним застосування наступного виразу для модифікації параметрів модулю нечіткого керування [369]:

$$\overline{y}^m(t+1) = \overline{y}^m(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial \overline{y}^m(t)} \quad \text{для } m=1 \dots 9, \quad (6.29)$$

де $t = 0, 1, 2, \dots$ – номер ітерації;

$\overline{y}^m(0)$ – початкове значення ваги;

$\eta \in (0, 1)$ – коефіцієнт, який визначає швидкість навчання (шаг корекції).

Вихідний сигнал модуля нечіткого керування процесу електроконтактного наварювання визначається наступним чином [369]:

$$\bar{y} = \frac{a}{b} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \bar{z}^k}{\sum_{k=1}^N \bar{z}^k}, \quad \text{где} \quad \bar{z}^k = \prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i}{y_i^k} \right)^2 \right]. \quad (6.30)$$

З використанням методу диференціювання похідна \bar{y} відносно \bar{y}^m , враховуючи те, що знаменник не містить значення ваги \bar{y}^k , може бути визначена за виразом [367]:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial \bar{y}}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial \bar{y}^m} = (\bar{y} - d) \frac{1}{b} \bar{z}^m. \quad (6.31)$$

За допомогою підстановки (6.27) у (6.30), одержимо вираз:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^m} = \frac{\partial}{\partial \bar{y}^m} \left[\frac{1}{2} (\bar{y} - d)^2 \right]. \quad (6.32)$$

Враховуючи, що вага не впливає на значення еталонного сигналу d і вважаючи його константою, вираз (6.32) набуде вигляду:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial (\bar{y} - d)}{\partial \bar{y}^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{y}^m}. \quad (6.33)$$

Перетворення (6.33) з використанням похідної дозволить одержати наступний вид виразу:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial}{\partial \bar{y}^m} \left(\frac{a}{b} \right) = (\bar{y} - d) \frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{a}{b} \right) \frac{\partial a}{\partial \bar{y}^m} = (\bar{y} - d) \frac{1}{b} \frac{\partial a}{\partial \bar{y}^m}. \quad (6.34)$$

Похідна визначається підстановкою $a = \sum_{k=1}^N (\bar{y}^{-k} \bar{z}^{-k})$ у вираз $\frac{\partial a}{\partial \bar{y}^m}$ [367], що до-

зволить отримати наступний вигляд формули:

$$\frac{\partial a}{\partial \bar{y}^m} = \frac{\partial}{\partial \bar{y}^m} \sum_{k=1}^N (\bar{y}^{-k} \bar{z}^{-k}) = \sum_{k=1}^N \frac{\partial (\bar{y}^{-k} \bar{z}^{-k})}{\partial \bar{y}^m}. \quad (6.35)$$

Враховуючи умову [367]:

$$\sum_{k=1}^N \frac{\partial (\bar{y}^{-k} \bar{z}^{-k})}{\partial \bar{y}^m} = \begin{cases} 0 & \text{для } k \neq m, \\ \bar{z}^{-m} & \text{для } k = m, \end{cases} \quad (6.36)$$

одержимо:

$$\frac{\partial a}{\partial \bar{y}^m} = \bar{z}^{-m}, \quad (6.37)$$

що дозволить сформулювати у результаті наступний вираз:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^m} = (\bar{y} - d) \frac{1}{b} \bar{z}^{-m}. \quad (6.38)$$

Визначення способу алгоритму навчання з підстановкою (6.38) у вираз для визначення способу модифікації (6.29) набуває вигляду:

$$\bar{y}^m(t+1) = \bar{y}^m(t) - \eta (\bar{y} - d) \frac{1}{b} \bar{z}^{-m} \Big|_t. \quad (6.39)$$

Умова (6.27) дозволяє сформулювати вираз алгоритму навчання наступним чином:

$$\bar{y}(t+1) = \bar{y}^m(t) - \eta \frac{(\bar{y} - d) \sum_{k=1}^N \bar{y}^{-k} \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)} \Bigg|_t. \quad (6.40)$$

Навчання модулю нечіткого керування відбувається поступово. Спочатку при подачі на вхід модуля нечіткого керування сигналу \bar{x} визначається значення вихідного керуючого сигналу з розповсюдженням його у прямому напрямку. При цьому відбувається також визначення параметрів \bar{z}^k ($k = 1, \dots, N$), a , b та \bar{y} .

Після завершення визначення \bar{y} відбувається зворотне розповсюдження помилки з порівнянням еталонного значення d з визначеним вихідним сигналом \bar{y} . Цей етап дозволяє корегувати на необхідну величину значення \bar{y}^m .

За аналогічним алгоритмом з використанням методу рекурсії визначається параметр \bar{x}_i^m [369]:

$$\bar{x}^m(t+1) = \bar{x}(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial \bar{x}^m(t)}, \quad (6.41)$$

З використанням виразу для визначення похідної матимемо:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{x}^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{z}^m} \frac{\partial \bar{z}^m}{\partial \bar{x}^m} = \left(\bar{y}^m - \bar{y} \right) \frac{\bar{y} - d}{b} \frac{2(\bar{x}_i - \bar{x}_i^m)}{(\sigma_i^m)^2}. \quad (6.42)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{x}^m} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}^m} \left[\frac{1}{2} (\bar{y} - d)^2 \right]. \quad (6.43)$$

З урахуванням умови (6.27) вираз (6.41) набуває вигляду:

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{x}^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial (\bar{y} - d)}{\partial \bar{x}_i^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{z}^m} \frac{\partial \bar{z}^m}{\partial \bar{x}_i^m}. \quad (6.44)$$

Зважаючи на те, що $\bar{y} = \frac{a}{b}$, де a і b залежать від \bar{z}^m , вираз для похідної $\frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{z}^m}$

матиме вигляд:

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{z}^m} = \frac{\partial}{\partial \bar{z}^m} \left(\frac{a}{b} \right) = \frac{\frac{\partial a}{\partial \bar{z}^m} b - a \frac{\partial b}{\partial \bar{z}^m}}{b^2}, \quad (6.45)$$

тому при заміні a і b на відповідні математичні вирази з визначенням похідних (6.45) набуває вигляду:

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{z}^m} = \frac{\frac{\partial}{\partial \bar{z}^m} \left[\sum_{k=1}^N \left(\bar{y}^{-k} \bar{z}^{-k} \right) \right] b - a \frac{\partial}{\partial \bar{z}^m} \left[\sum_{k=1}^N \left(\bar{z}^{-k} \right) \right]}{b^2} = \frac{\bar{y}^m b - a}{b^2} = \frac{\bar{y}^m b - \bar{y} b}{b^2} = \frac{\bar{y}^m - \bar{y}}{b}. \quad (6.46)$$

Підстановкою заміни $\bar{z}^m = \prod_{j=1}^n \exp(s_j^m)$, де $s_j^m = - \left(\frac{\bar{x}_j - \bar{x}_l}{\sigma_j^m} \right)^2$, можна визначити

$\frac{\partial \bar{z}^m}{\partial \bar{x}_i^m}$ [369]:

$$\frac{\partial \bar{z}^m}{\partial \bar{x}_i^m} = \frac{\partial}{\partial s_i^m} \left[\prod_{j=1}^n \exp(s_j^m) \right] \frac{\partial}{\partial x_i^m} \left[- \left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_l}{\sigma_i^m} \right)^2 \right], \quad (6.47)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s_i^{-m}} \left[\prod_{j=1}^n \exp(s_j^{-m}) \right] &= \frac{\partial}{\partial s_i^{-m}} \left[\exp \left(\sum_{j=1}^n s_j^{-m} \right) \right] = \\ &= \exp \left(\sum_{j=1}^n s_j^{-m} \right) \frac{\partial}{\partial s_i^{-m}} \left(\sum_{j=1}^n s_j^{-m} \right) = \left[\prod_{j=1}^n \exp(s_j^{-m}) \right] = \bar{z}^{-m}, \end{aligned} \quad (6.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i^m} \left[- \left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m}}{\sigma_i^m} \right)^2 \right] &= \left[-2 \left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m}}{\sigma_i^m} \right) \right] \frac{\partial}{\partial x_i^m} \left[- \left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m}}{\sigma_i^m} \right) \right] = \\ &= \left[-2 \left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m}}{\sigma_i^m} \right) \right] \frac{-1}{\sigma_i^m} = 2 \cdot \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m}}{(\sigma_i^m)^2}. \end{aligned} \quad (6.49)$$

В результаті отримаємо:

$$\frac{\partial \bar{z}^{-m}}{\partial x_i^m} = \bar{z}^{-m} \frac{2(\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m})}{(\sigma_i^m)^2}, \quad (6.50)$$

що дозволяє виразу набути наступного остаточного вигляду:

$$\frac{\partial e}{\partial x^m} = (\bar{y} - d) \frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{z}^{-m}} \frac{\partial \bar{z}^{-m}}{\partial x^m} = (\bar{y} - d) \frac{\bar{y}^m - \bar{y}^{-m}}{b} \bar{z}^{-m} \frac{2(\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m})}{(\sigma_i^m)^2}. \quad (6.51)$$

Алгоритм навчання для \bar{x}^m визначається підстановкою (6.44) у (6.43):

$$\bar{x}^m(t+1) = \bar{x}(t) - \eta \frac{\bar{y} - d}{b} (\bar{y}^m - \bar{y}) \bar{z}^{-m} \frac{2(\bar{x}_i - \bar{x}_i^{-m})}{(\sigma_i^m)^2} \Bigg|_t, \quad (6.52)$$

де b і \bar{z}^m – визначаються з використанням формули (6.30).

За аналогічною методикою визначається алгоритм навчання для σ_i^m , що набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma_i^m(t+1) &= \sigma_i^m(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial \sigma_i^m(t)} = \\ &= \sigma_i^m(t) - \eta \frac{\bar{y} - d}{b} (\bar{y}^m - \bar{y}) \bar{z}^m \frac{2(\bar{x}_i - \bar{x}_i^m)^2}{(\sigma_i^m)^2} \Bigg|_{(t)}. \end{aligned} \quad (6.53)$$

Математичні вирази (6.39), (6.52) і (6.53) дозволяють визначити спосіб модифікації ваг і параметрів на основі алгоритму зворотного розповсюдження помилки [364], що працює наступним чином: спочатку відбувається розповсюдження вхідного параметру \bar{x} по мережі у прямому напрямку, після чого послідовно визначаються параметри \bar{z}^k ($k = 1, \dots, N$), a , b і \bar{y} ; наступним етапом роботи алгоритму є визначення ваг зв'язків $\bar{y}^k(t+1)$, $\bar{x}_i^k(t+1)$ і $\sigma_i^k(t+1)$ для $i=1, \dots, n$; $k=1, \dots, N$, що дозволяє замінити попередні значення ваг зв'язків розрахованими на цьому етапі; далі відбувається збільшення ітерацій t на 1 з наступним повтором наведених операцій, що дозволяє значно підвищити ефективність роботи системи керування за рахунок врахування попередньо розрахованих значень $\bar{y}_i^m(t)$, $\bar{x}_i^m(t)$ і $\sigma_i^m(t)$ при визначенні кожного нового наступного значення $\bar{x}_i^m(t+1)$.

Погрішність $(\bar{y} - d)/b$ розповсюджується у зворотному напрямку до третього шару мережі (див. рис. 6.32) аж до значень \bar{y}^k , де відбувається модифікація згідно з (6.39). Параметри \bar{x}_i^m і σ_i^m модифікуються за алгоритмами (6.52) і (6.53), відповідно. Алгоритм навчання модулю нечіткого керування представлено на рис. 6.33 [364].

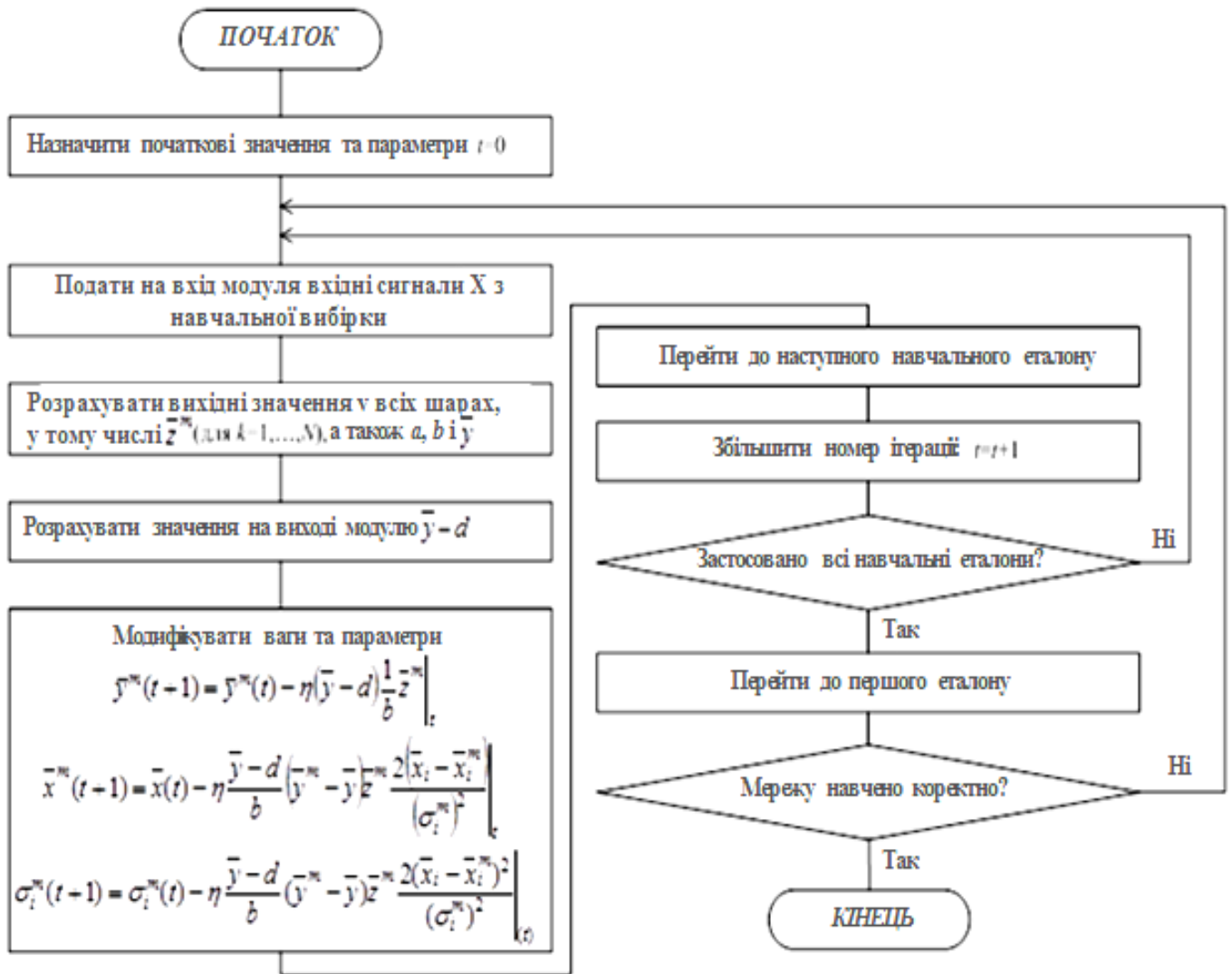


Рисунок 6.33 – Алгоритм навчання модулю нечіткого керування, заданого виразом (6.27)

Моделювання модулю нечіткого керування на базі програмного забезпечення MatLab [370, 367, 369] дозволило виявити здатність модулю до навчання при зміні технологічних параметрів процесу електроконтактного наварювання (зусилля на ролику-електроді та сили зварювального струму).

В результаті моделювання модулю нечіткого керування одержано:

- поверхні зміни керуючого сигналу тривалості протікання імпульсу зварювального струму при електроконтактному наварюванні стрічками (рис. 6.34);
- графік сигналів помилки на виході модулю нечіткого керування процесу електроконтактного наварювання стрічками відносно еталонного сигналу (рис. 6.35).

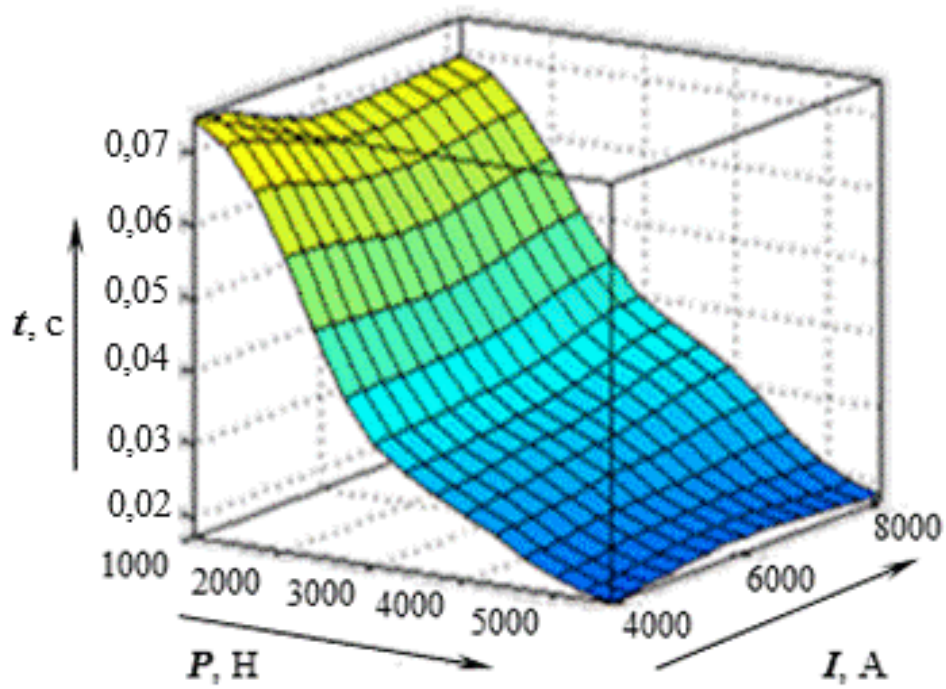


Рисунок 6.34 – Поверхня відклику зміни часу протікання імпульсу струму залежно від значень сили струму та зусилля на ролику-електроді при електроконтактному наварюванні стрічками

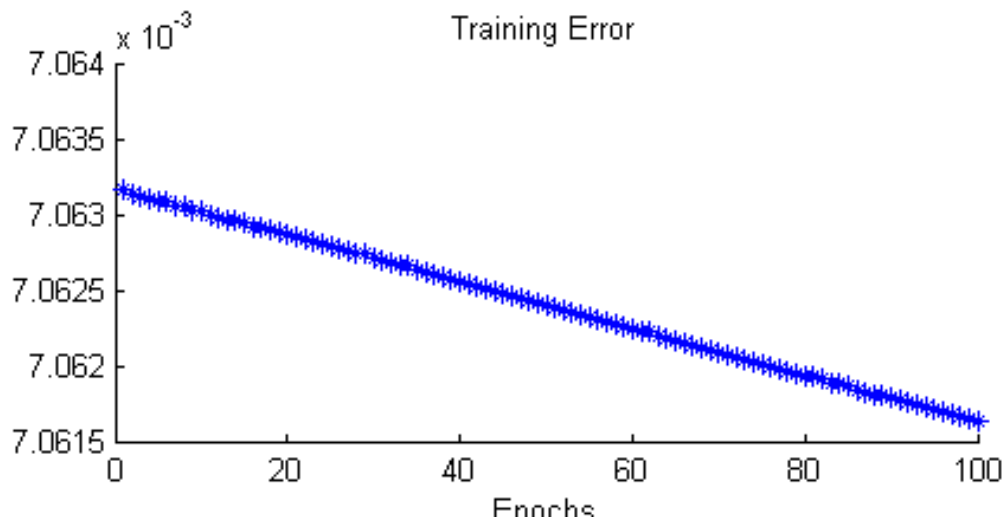


Рисунок 6.35 – Помилка навчання модулю нечіткого керування процесом електроконтактного наварювання стрічками

6.3. Впровадження результатів роботи

Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень у вигляді програмних засобів, нових технологічних рішень і технологічних рекомендацій використано у промислових умовах. Зокрема числова математична модель напружено-деформованого стану функціонального покриття при електроконтактному наварюванні стрічками з використанням методів прокатки та програмні засоби з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу використано у рамках комплексу науково-дослідницьких робіт з удосконалення технологій та обладнання на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ, 2012 р.) (Додаток Б).

Програмні засоби для автоматизованого проектування режимів процесу електроконтактного наварювання та практичні рекомендації з керування процесом електроконтактного наварювання за розробленим алгоритмом були використані у «Науково-дослідному і проектно-технологічному інституті машинобудування» (м. Краматорськ, 2012р.) при проектуванні технології та обладнання для відновлення деталей, що працюють при динамічних та повторно-перемінних навантаженнях (Додаток В).

У рамках угоди про партнерство, співробітництво та науковий обмін між Донбаською державною машинобудівною академією та Донецьким фізико-технічним інститутом ім. А. А. Галкіна НАН України (м. Донецьк, 2013р.) №ТС-06-04 встановлено, що покриття, нанесене за розробленою технологією, збільшує стійкість деталей до зношування на 37% (Додаток Г).

В ході польових випробувань в умовах фермерського господарства «Діхтер» (Слов'янський р-н, 2013р.) у складі чотирьох орних агрегатів лемешів тракторних плугів, зміцнених електроконтактним методом, встановлено, що їх стійкість, яка вимірюється напрацюванням до граничного затуплення, у середньому на 15-20 Га вища порівняно з лемехами у заводському виконанні (Додаток Д).

На виробничих ділянках науково-виробничої компанії «Регіон Інноватика Еніон – Балтика» (м. Донецьк, 2014р.) впроваджено технологію електроконтакт-

ного наварювання для відновлення деталей різної конфігурації, що працюють в умовах тертя ковзання та змащування, а також нерухомих посадок (Додаток Е).

Комплекс математичних моделей та відповідних програмних засобів з автоматизованого розрахунку процесу формування шару, нанесеного електроконтактним методом, а також практичні рекомендації, що забезпечують одержання стабільно високої якості покриття з необхідними показниками механічних характеристик використано у Державному підприємстві «Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енергосталь» (м. Харків, 2014р.) Міністерства промислової політики України при проектуванні технології та обладнання для зміцнення і відновлення зношених деталей обладнання на спеціалізованих ділянках підготовки виробництва. Це дозволило покращити техніко-економічні показники роботи нових та реконструкції діючих агрегатів, економити матеріальні ресурси, знизити собівартість та забезпечити високу якість готової продукції (Додаток Є).

В умовах ПАТ «Завод напівпровідників» (м. Запоріжжя, 2015р.) відновлено робочі поверхні деталей валково-роликового типу технологічного обладнання. Виробничі випробування показали підвищення їх працездатності у 1,7-2,4 рази, збільшення продуктивності труда, зниження витрат металу та енерговитрат (Додаток Ж).

В умовах ЗАТ «Краматорський завод металоконструкцій» (м. Краматорськ, 2016р.) впроваджено технологію відновлення місць посадок та шийок валів з конструкційних вуглецевих сталей, що працюють в умовах циклічного навантаження. Виробничі випробування показали високу міцність з'єднання шару з поверхнею деталі без збільшення кількості введеної теплової енергії у матеріал з'єднання (Додаток З).

На ПАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» (м. Сєверодонецьк, 2017р.) впроваджено комбіновану технологію відновлення деталей ґрунтообробних машин електродними стрічками, що пройшли попередню хіміко-термічну обробку за розробленою технологією (Додаток И).

Технологічні рекомендації з підбору режимів електроконтактного наварювання та формування шару металопокриття із заданими службовими властивос-

тями, що забезпечують збільшення ресурсу деталей, які працюють у рухомих та нерухомих з'єднаннях механізмів, було використано при розробці технічних пропозицій для ремонту дефектів вантажопідйомних об'єктів: рудно-грейферних перевантажувачів фірми «ТАКРАФ» марки РГП-2, мостових кранів, автокранів, талів електричних, а також кранів (за госпдоговорами №У-13-2012 от 23.02.12г. і №У-12-2013/4600006706 від 29.03.13р. з ПАТ «Кримський содовий завод», №У-06-2012 від 12.01.12р. з ПАТ Снежнянський машинобудівний завод «МоторСіч», №У-18-2012/2459 від 11.04.12р., №У-13-2013/1428 від 26.03.13р., №У-09-2013/1360 від 16.04.13р. з ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча»). це дозволило збільшити міжремонтний термін служби на 20% та знизити витрати на придбання запасних частин у 1,5 рази (Додаток І).

Окремі положення дисертації впроваджені у навчальний процес (Додаток К).

Об'єкти та форми впровадження результатів роботи приведені у табл.6.6

Форма впровадження – технологія наварювання, програмні засоби.

Об'єкти впровадження – деталі, що працюють умовах зношування.

Таблиця 6.6

Впровадження результатів роботи

| ЗАТ «Краматорський завод металоконструкцій», м. Краматорськ 2016р. | |
|--|---|
| Місця посадок та шийки валів малого діаметру | <ul style="list-style-type: none"> – Контрольовані показники якості – Збільшення робочого ресурсу деталей – Підвищення продуктивності труда труда <p style="text-align: center;">750,4 тис.грн.</p> |
| ТОВ «НВК» «Регіон Інноватика Еніон-Балтика», м. Донецьк 2014р. | |
| Сталеві деталі різної конфігурації, що працюють в умовах тертя ковзання та нерухомих посадок | <ul style="list-style-type: none"> – Зниження витрат металу та енерговитрат – Збільшення міжремонтного ресурсу <p style="text-align: center;">117,0 тис.грн.</p> |

| | |
|---|--|
| ПАТ Снежнянський машинобудівний завод «Мотор-Січ», м. Снежнянськ 2012 р. | |
| Зношені поверхні деталей вантажопідйомних об'єктів | <ul style="list-style-type: none"> – Збільшення міжремонтного терміну служби на 20% – Зниження витрат на придбання запасних частин у 1,5 рази |
| ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча», м. Маріуполь 2013р. | |
| Зношені деталі рудно-грейферних перевантажувачів, талей електричних | <ul style="list-style-type: none"> – Зниження трудомісткості ремонтних робіт |
| ПАТ «Завод напівпровідників», м. Запоріжжя 2015.р | |
| Технологічне обладнання | <ul style="list-style-type: none"> – Підвищення працездатності обладнання у 1,7-2,4рази – Збільшення продуктивності труда – Зниження витрат металу та енерговитрат <p style="text-align: center;">415,6 тис.грн.</p> |
| Фермерське господарство «Діхтер», Слов'янський р-н 2013р. | |
| Лемеші плугів | <ul style="list-style-type: none"> – Усунення простоїв та витрат часу на регулювання – Підвищення терміну служби |
| Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енерго-сталь», м. Харків 2014р. | |
| Зміцнення та відновлення робочого інструменту та деталей прокатних станів | <ul style="list-style-type: none"> – Підвищення техніко-економічних показників роботи обладнання – Економія матеріальних ресурсів – Зниження собівартості продукції |
| ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ», м. Сєверодонецьк 2017р. | |
| Деталі ґрунтообробних машин | <ul style="list-style-type: none"> – Підвищення ефективності ремонтних заходів – Підвищення продуктивності труда <p style="text-align: center;">160,0 тис.грн.</p> |

| | |
|--|--|
| ПАТ «Кримський содовий завод», м. Красноперекіпськ 2012-2013 рр. | |
| Деталі, що працюють у рухомих та нерухомих з'єднаннях | — Підвищення якості ремонтних робіт |
| ПАТ «Науково-дослідний та проектно-технологічний інститут машинобудування», м. Краматорськ 2012р. | |
| Деталі типу «вал» діаметром до 120 мм | — Підвищення ефективності ремонтних робіт 256,0 тис.грн. |
| ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», м.Краматорськ 2012р. | |
| Програмні засоби з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу | — Зниження трудомісткості проектно-конструкторських та проектно-технічних робіт — Підвищення якості та збільшення виходу металопродукції 752,0 тис.грн. |
| Фізико-технічний інститут НАНУ ім. А.А. Галкіна, м. Донецьк 2013р. | |
| Деталі обладнання | — Збільшення терміну служби виробів у 1,3-1,7 разів — Зниження витрат привареного металу на 17-20% |

Висновки до розділу 6

1. На основі методів кінцево-елементного моделювання з використанням спеціальних програмних засобів встановлено вплив коефіцієнту кінематичної асиметрії на енергосилові характеристики формоутворення привареного шару, проаналізовано розподіл теплових полів залежно від параметрів режиму процесу електроконтактного наварювання, що дозволило розробити практичні рекомендації щодо проведення електроконтактного наварювання.

2. Проведено синтез регулятора технологічного процесу електроконтактного наварювання та модуля нечіткого нейронного керування, що дозволяє системі керу-

вання адаптуватися до зміни локальних та інтегральних характеристик процесу відновлення деталей та врахувати і компенсувати зміну параметрів теплового стану електродного матеріалу у термодформаційному осередку.

3. Дослідження інформаційної бази даних процесу керування режимом електроконтактного наварювання дозволило одержати поверхню зміни товщини привареного шару залежно від зусилля на ролик-електроді та сили струму.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації виконано нові науково-обґрунтовані розробки у галузі технології, матеріалів для електроконтактного наварювання стрічками, що забезпечують зносостійкість та якість привареного металу, економію матеріальних ресурсів на основі ефективних технологічних рекомендацій, спрямованих на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення терміну служби деталей.

1. Експериментально підтверджено вплив коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно до циліндричних деталей, відновлених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей з наступною термічною обробкою. Встановлено, що найбільш високий опір мікропластичній деформації спостерігається у наварених зразках зі структурою сорбіту та трооститу у зв'язку з розвинутою міжзеренною поверхнею та збільшенням числа перешкод для ковзання, що обумовлює більш високі стартові напруження (для наварених зразків зі сталі 40X після термопокращення з відпуском при 640-660°C – 59МПа та після термопокращення з відпуском при 540-560°C – 201МПа). Приварений метал, що містить великий об'єм зерен надлишкового фериту, відрізняється меншою кількістю перешкод для зсувів, а стартові напруження складають 30,5 МПа.

2. В результаті проведених досліджень розроблено режим індукційного нагріву валів діаметром 50-120 мм, наварених стрічками з конструкційних сталей, який забезпечує необхідні значення температури на поверхні та на заданій глибині прогрітого шару при постійній питомій потужності та різниці температур не більше 50°C, що забезпечує проведення нормалізації відновлених циліндричних деталей на глибину 3-5мм.

3. Експериментально встановлено, що застосування у якості охолоджуючого середовища при термообробці наварених валів теплоізолюючої суміші складу: 8-12% шарувате з'єднання графіту з коефіцієнтом терморозширення 150-170 см³/г при температурі 200-250°C, решта – графіт ГЛ1 дозволяє наблизити умови охолодження до пічних.

4. Застосування розробленої комбінованої технології відновлення валів (електроконтактне наварювання стрічками з конструкційних сталей з наступним локальним нагрівом ТВЧ до 880°C та уповільненим охолодженням у теплоізолюючій суміші) забезпечує зниження швидкості охолодження нанесеного шару від температури аустенізації до початку перлітного перетворення та підвищення середнього вмісту надлишкового фериту на 4,7% при збільшенні розміру зерна у середньому на 11 мкм. Для деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження, така структура є найменш чутливою до концентрації напружень: швидкість зростання втомної тріщини знижується на 15,8-17,3%, а втомна міцність відновлених деталей підвищується на 17% зі 198 МПа до 232 МПа.

5. На основі експериментальних досліджень розроблено регресійні математичні моделі для визначення залежності зносостійкості та напруження відколу навареного шару від співвідношення компонентів суміші для попередньої комплексної хіміко-термічної обробки стрічки. Встановлено, що при співвідношенні $\text{V}_4\text{C}:\text{FeTi}=1:1,7$ досягається зносостійкість, близька до зносостійкості боридного шару, при одночасному підвищенні напруження відколу у 2,5 рази за рахунок рівномірного розподілу твердої складової (боридів заліза з $\text{H}_{100}=15300$ МПа) у пластичній матриці (твердий розчин феротитану з $\text{H}_{100}=2060$ МПа).

6. На основі теоретичного аналізу умов процесу електроконтактного наварювання стрічками з використанням методів кінцевих різниць та кінцевих елементів встановлено вплив на зміну локальних енергосилових параметрів процесу величини коефіцієнту кінематичної асиметрії K_v , що визначається співвідношенням лінійних швидкостей на ролику-електроді та відновлюваному виробі. Показано, що при $K_v=1,015$ збільшується площа розподілу та величина дотичних контактних напружень у зоні приварювання до 30 МПа при збереженні незмінними дотичних контактних напружень у зоні контакту з роликом-електродом, що необхідно враховувати при проектуванні технологічного процесу відновлення деталей. Експериментально встановлено вплив K_v на міцність зчеплення привареного шару з поверхнею деталі $\sigma_{зч}$: при $K_v=1,015$ $\sigma_{зч}$ підвищується у 1,54 разі до 217 МПа.

7. На основі експериментальних досліджень процесу електроконтактного наварювання стрічками встановлена адекватність розроблених кінцево-різнецевої та кінцево-елементної моделей. Згідно з результатами проведеної експериментальної перевірки похибка обчислень при розрахунку значень зусилля на ролик-електроді та сили імпульсу струму не перевищує 10%.

8. На основі автоматизованого проектування технологічних режимів процесу електроконтактного наварювання стрічками сформульовано та вирішено програмно задачі забезпечення необхідних геометричних параметрів нанесеного шару залежно від вихідної товщини електродної стрічки, зусилля на ролик-електроді, сили імпульсу струму та величини коефіцієнту кінематичної асиметрії, що дозволило визначити всі вихідні параметри процесу та здійснити вибір електродного матеріалу.

9. На основі розробленої бази даних вихідних параметрів процесу електроконтактного наварювання побудовано структурну схему та проведено моделювання модулю нечіткого керування процесом, реалізація якого забезпечує контроль параметрів режиму протягом імпульсу зварювального струму. Це компенсує дію збурюючих факторів, які викликають утворення несплавлінь, прожогів, виплесків та інших дефектів, за рахунок навчання модуля на основі алгоритму зворотнього розповсюдження помилки.

10. Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних засобів, технічних рішень та практичних рекомендацій використано на ряді промислових підприємств України з одержанням реального економічного ефекту.

ПОСИЛАННЯ

1. Ходякова, К.С. (2017). Ефективна промислова політика – запорука високо-технологічного рівня держави. *Державне будівництво*, №1, С. 1-11.
2. Bhushan, B. (2009). The economic importance of welding and joining in Europe: production values, values added and employees. *Welding and cutting*, N5, PP. 292–296
3. Bhushan, B. (2014). Study shows resilience of joining technology in Europe . *Ibid*, N1, PP. 8–9.
4. Robin, F. (2013). Worldwide demand for welding machines. *The Japan Welding News for the World*, N 64.
5. Bhushan, B. (2002). *Introduction to tribology*. New York: John Wiley & Sons, 732p.
6. Туревский, И. С. (2005). *Техническое обслуживание автомобилей*. М.: Инфра-М, 432 с.
7. Захарова, О.В. (2002). Экономические аспекты энергосбережения на промышленных предприятиях. *Інтегровані технології та енергозбереження*, №2, С.40-45.
8. Bulychev, V.V., Zezyulya, V.V. (2011). Electrical resistance deposition with a wire and deceleration of the roller electrode. *Welding International*, Vol. 25, № 5, PP. 374-377.
9. Robin, F. (1991). The wear of steels by abrasives. *Revue de Metallurgie*, V.8, PP.47-84.
10. Гаркунов, Д.Н., Польцер, Г.А. (1992). Анализ изнашивания и избирательный перенос при трении. *Эффект безызносности и триботехнологии*, №1, С. 9-11.
11. Суслов, А.Г., Дальский, А.М. (2002). *Научные основы технологии машиностроения*. М.: Машиностроение, 684с.
12. Гарынин, Н.В. (1996). Тенденции развития современного материаловедения. *Судостроение*, №10, С. 133-135.
13. Фролов, Ю. Н. (2001). *Техническая эксплуатация и экологическая безопасность автомобильного транспорта*. М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 135 с.
14. Безъязычный, В.Ф., Сутягин, А.Н. (2009). Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин на основе изучения накопленной энергии в поверх-

ностном слое детали при деформационном упрочнении при обработке. *Упрочняющие технологии и покрытия*, №7, С. 3-6.

15. Хромченко, Ф.А. (2005). *Сварочные технологии при ремонтных работах*. М.: Интернет Инжиниринг, 368с.

16. Балтер, М.А. (1971). Влияние структуры стали на усталостную прочность после поверхностного упрочнения. *Металловедение и термическая обработка металлов*, №3, С. 47 - 50.

17. Булычев, В.В., Зезюля, В.В. (2008). Технология восстановления стальных коленчатых валов комбинированной наплавкой. *Ремонт, восстановление и модернизация*, № 12, С.14-18.

18. Канарчук, В.Е. (1995). *Восстановление автомобильных деталей. Технология и оборудование*. М.: Транспорт, 304 с.

19. Черноиванов, В. И., Лялякин, В.П. (2003). *Организация и технология восстановления деталей машин*. М.: ГОСНИТИ, 488 с.

20. Дубровский, В.А., Булычев, В.В., Хабаров, В.Н. (2001). Восстановление деталей путевых машин электроконтактной наплавкой. *Путь и путевое хозяйство*, № 2, С.13-15.

21. Микипорис, Ю. А. (2002). *Эксплуатация и ремонт автотехники*. Ковров: КГТА, 88 с.

22. Кузнецов, С. А. (2006). *Технология ремонта автотранспортных средств*. Кемерово: Куз ГТУ, 186 с.

23. Батищев, А. Н., Голубев, И.Г., Лялякин, В.П. (1995) *Восстановление деталей сельскохозяйственной техники*. М.: Информагротех, 296 с.

24. Хоменко, І.М. (2008). Критерії гранично допустимого зносу машин. *Проблеми тертя та зношування*, №50, С. 27-33.

25. Пащенко, В.М., Кузнецов, В.Д., Солодкий, С.П. (2006). Проблеми ефективності захисних покриттів у інженерії поверхні машин і обладнання. *Вестник Национального технического университета Украины «КПИ»*, №49, С. 178-186.

26. Dubrovskiy, V.A., Bulychev, V.V. (1998). Electric resistance surfacing with a wire and with melting of the mefalstobe joined. *Welding International*, Vol. 12, № 7, PP. 570-572.
27. Erich Lugscheider, Ait-Mekideche Azedine (1990). Standzeiterhöhung von Bauteileiten durch Plasmaauftragsschweißen mit Hartstoff-Hartlegierung-Verbundpulvem. *Schweissen und Schneiden*, № 42, S.76-82.
28. Бурумкулов, Ф. Х., Лезин, П.П., Сенин, П.В. (2003). *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)*. МГУ им. Н.П.Огарева, 504 с.
29. Пантелеев, Ф. И., Лялякин, В.П., Иванов, В.П. (2003). *Восстановление деталей машин*. М.: Машиностроение, 672 с.
30. Михед, А.М., Черныш, В.П. (2000). Восстановление размеров и свойств чугуновых цилиндрических деталей электроконтактной наплавкой. *Автоматическая сварка*, №3, С.42.
31. Хмелевская, В.Б., Мяконьков, М.Б., Петров, В.М. (2010). *Технологические процессы восстановления и упрочнения деталей механизмов*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 192с.
32. Буравцев, С.К. (2006). О состоянии характеристик коленчатых валов и их влиянии на показатели двигателей. *Двигателестроение*, №1, С. 38-42.
33. Мышкин, Н. К., Петроковец, М.И. (2007). *Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии*. М.: Физматлит, 368с.
34. Бурмаков, Ф.Х., Лезин, П.П. (1993). *Работоспособность и долговечность восстановленных деталей и сборочных единиц машин*. Мордовский университет, 120с.
35. Каракозов, Э.С., Латыпов, Р.А., Молчанов, Б.А. (1991). *Состояние и перспективы восстановления деталей электроконтактной приваркой материалов*. М.: Информагротех, 85с.
36. Lima, C.R.C., Bette, V.V., Camargo, F., Fals, H.C., Ferraresi, V.A. (2013). Wear Performance of Thermally Sprayed and Welded Coatings Using Conventional and Nanostructured Materials. *Proc. of ITSC 2013, ASM International*.

37. Фальченко, Ю.В., Устінов, А.І., Федорчук, В.Є., Харченко, Г.К., Новомлинець, О.О. (2008). Особливості зварювання у твердій фазі алюмінідів титану з вуглець-вуглецевим композиційним матеріалом. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 34, С. 133–137.

38. Булычев, В.В., Латыпов, Р.А. (2012). Оценка прочности соединения однородных металлов при электроконтактной приварке. *Сварочное производство*, №6, С. 17-21

39. Клименко, Ю.В. (1978). *Электроконтактная наплавка*. М.: Металлургия, 128с.

40. Каракозов, Э.С. (1986). *Сварка металлов давлением*. М.: Машиностроение, 280с.

41. Сайфуллин, Р.Н. (2008). *Электроконтактная приварка порошковых материалов при восстановлении деталей и получении защитных покрытий: Монография*. Уфа: Изд-во БашГАУ, 196 с.

42. Чернышов, Г.Г., Коберник Н.В., Орлик, А.Г., Чернышова, Т.А. (2011). Влияние структуры наплавленных покрытий на стойкость к абразивному износу. *Физика и химия обработки материалов*. №5. С. 44-50. ISSN: 0015-3214.

43. Шейнман, Е.Л. (2005) Абразивный износ. Обзор американской печати. *Трение и износ*. №1. Т. 26. С. 100-111. ISSN: 0202-4977.

44. Блохин, В.Н., Котиков, Ф.Н., Случевский, А.М. (2016). Исследование износа рабочей поверхности лемеха от удельного давления и скорости движения абразивной частицы почвы. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. № 2(54). С. 93-97.

45. Измайлов, А.Ю., Лискин, И.В., Лобачевский, Я.П., Сидоров, С.А. (2016). Применение теории подобия для моделирования износа почворезущих лезвий в искусственной абразивной среде. *Российская сельскохозяйственная наука*. №6. С. 48-51. ISSN: 2500-2627.

46. Першин, Г.Д., Погуца, С.С., Лапина, Т.М. (2016). Расчетная оценка энергетическим методом абразивного износа технически чистых металлов и углеродистых сталей. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. №1. Т.1. С. 6-9. ISSN: 2306-8493.

47. Маслов, Л.В. (2011). Выбор технологических методов упрочнения абразивно изнашиваемых деталей. *Вестник Ижевского государственного технического университета*. №3. С. 27-29. ISSN: 1813-7903.
48. Костюченко, Н.В., Фурсов, В.А., Козак, А.И., Шугубаев, Ж.Б. (2016). Изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих машин и способы восстановления их работоспособности. *Вестник Курганской ГСХА*. №2 (18). С. 68-70. ISSN: 2227-4227.
49. Козырев, В.В., Петров, М.Ю., Козырева, Л.В. (2006). Влияние состава композиционных порошков на износостойкость покрытий при плазменном напылении. *Сварочное производство*, №6, С. 44-46.
50. Когаев, В.П., Дроздов, Ю.Н. (1991). *Прочность и износостойкость деталей машин*. М.: Высшая школа, 319с.
51. Кузнецов, В.Д., Пащенко, В.Н., Смирнов, И.В., Степанов, Д.В. (2014). Порівняльна оцінка зносостійкості поверхневих шарів різного складу в умовах тертя без змащення та абразивного зношування. *Проблеми тертя та зношування*, №2 (63), С.85-91.
52. Guardial, A. (1996). The fundamental benefits if preventive rail grinding. *Rail Engineering International*, №1, PP. 4-6.
53. Сидоренко, С.И., Пащенко, В.Н., Кузнецов, В.Д. (2001). *Материаловедческие основы инженерии поверхности: Монография*. К.: Наукова думка, 230с.
54. Брыков, М.Н. (2003). Оптимальная схема стандартных испытаний металлических материалов на изнашивание закрепленным абразивом. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, №1, С. 86-89.
55. Гулаков, С.В., Псарьова, І.С., Лаврентік, О.О., Щербаков, С.В. (2001). Зміцнення деталей машин та інструменту наплавленням робочого шару з регламентованим розподілом властивостей . *Машинознавство*, №7, С.45 – 48.
56. Бренштейн, Д.Б. (2002). Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, №6, С. 39 – 42.

57. Чигарев, В.В., Малинов, В.Л. (2000). Выбор экономнолегированных наплавочных материалов для различных условий ударно-абразивного воздействия. *Автоматическая сварка*, №5, С. 58-60.
58. Черновол, М.И., Мачок, Ю.В. (1991). Контактная наварка композиционных покрытий. *Сварочное производство*, №12, С. 23-25.
59. Каракозов, Э.С. (1976). *Соединение металлов в твердой фазе*. М.: Металлургия, 264с.
60. Фальченко, Ю.В., Новомлинець, О.О., Петрушинець, Л.В., Нагорна, І.В. (2017). Основи використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском. *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 7–19.
61. Латыпов, Р.А., Молчанов, Б.А. (2009). Управление качеством покрытия при восстановлении и упрочнении деталей электроконтактной приваркой. *Сварочное производство*, №5, С. 21-28.
62. Бурак, П.И. (2008). *Электроконтактная приварка материалов через промежуточный слой: Монография*. М.: Изд. центр МГАУ им. Горячкина, 98с.
63. Сайфуллин, Р.Н. (2004). Присадочный материал для восстановления изношенных деталей машин. *Техника в сельском хозяйстве*, №5, С. 23-24.
64. Тарасов, Ю. С., Пустоханов, В.К. (1988). Технология восстановления коленчатых валов дизельных двигателей ЯМЗ-240Б электроконтактным напеканием металлических порошков. *Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин: научно-техническая конференция стран-членов СЭВ и СФРЮ*, Ч. 2, С. 19-20.
65. Нафиков, М. З., Юдин, Н.С. (2007). Наплавка валиков различной ширины одной электродной лентой. *Ремонт, восстановление, модернизация*, № 8, С.22-24.
66. Нафиков, М. З., Загиров, И.И., Левин, Э.Л., Сайфуллин, Р.Н. (2008). Особенности формирования структуры металлопокрытий, нанесенных электроконтактной наплавкой проволокой из углеродистых и легированных сталей. *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 6, С. 31-37.

67. Поляченко, А. В. (1999). Технологические предпосылки управления износостойкостью восстанавливаемых деталей. *Состояние и перспективы восстановления, упрочнения и изготовления деталей*, С. 201-204.
68. Беречикидзе, А. В. (1995). Оптимизация режима электроконтактной приварки стальной ленты к стальному изделию. *Техника в сельском хозяйстве*, №5, С. 26-28, ISSN 0131-7105.
69. Каракозов, Э.С., Латыпов, Р.А., Молчанов, Б.А. (1991). *Состояние и перспективы восстановления деталей электроконтактной приваркой материалов*. М.: Информагротех, 85 с.
70. Латыпов, Р.А. (2002). Восстановление и упрочнение деталей электроконтактной наплавкой компактных и порошковых материалов. *Ремонт, восстановление, модернизация*, №4, С. 11-18.
71. Сайфуллин, Р.Н. (2009). *Технологии ремонта агрегатов сельскохозяйственной техники с использованием методов электроконтактной приварки порошковых материалов: рекомендации*. Уфа: Изд-во БашГАУ, 40 с.
72. Saifullin, R.N. (2007). Improvement of performance of machine parts by electrocontact welding of composite materials. *Journal of friction and wear c/c of trenie i iznos*, Vol. 28, Number 2, PP. 206-211.
73. Saifullin, R.N. (2008). Bonding strength and porosity of coatings produced by electric resistance deposition of powder compositions. *Welding International*, Vol. 22, Number 8, PP. 551-554.
74. Saifullin, R.N. (2009). Production of metal mesh-based sintered powder bands using electrocontact rolling. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, Vol. 50, Number 5, PP. 518-521.
75. Левин, Э.Л., Сайфуллин, Р.Н. (2008). Установки для локального нагрева деталей при восстановлении. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, № 6, С. 32.
76. Левин, Э.Л., Сайфуллин, Р.Н. (2008). Использование электроконтактного нагрева в технологических процессах ремонта машин. *Ремонт, восстановление, модернизация*, № 8, С. 19-21.

77. Левин, Э.Л., Сайфуллин, Р.Н. (2008). Оценка прочности сцепления ленты с основным металлом при восстановлении деталей электроконтактной приваркой. *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 10, С. 48-49.
78. Сайфуллин, Р.Н., Наталенко, В.С. (2009). Прочность сцепления покрытий, полученных электроконтактной приваркой армированных спеченных лент. *Ремонт, восстановление, модернизация*, № 5, С. 36-39.
79. Сайфуллин, Р.Н., Исламов, Л.Ф. (2009). Влияние геометрии рабочей поверхности роликового электрода на формирование порошкового покрытия при электроконтактной приварке. *Ремонт, восстановление, модернизация*, № 4, С. 8-10.
80. Заводов, Н.Н., Козлов, А.В., Лузганов, С.Н. (1990). Спекание металлических порошков серией сильноточных импульсов. *Теплофизика высоких температур*, №1, С.135-141.
81. Баланкин, С.А., Горбачев, Л.П., Григорьев, Е.Г. (1984). Тепловые процессы при электроимпульсном прессовании порошков. *Физика и химия обработки материалов*, №2, С. 124-129.
82. Zhang, J., Zavaliangos, A., Groza, J.R. (2003). Field activated sintering techniques: a comparison and contrast. *P/M Science and Technology Briefs*, Vol. 5, PP. 17-21.
83. Raychenko, A.I., Burenkov, G.L., Leschinskiy, V.I. (1973). Theoretical analysis of the elemental act of electric discharge sintering. *Physics of Sintering*, Vol. 5, N2/2, PP.215-225.
84. Grigoriev, E., Roslyakov, A. (2007). Electro discharge compaction of WC-Co composite material containing particles of diamond. *Materials Science Forum*, Vols. 534-536, PP. 1181-1184.
85. Фархшатов, М.Н., Гаскаров, И.Р., Юнусбаев, Н.М. (2005). Уменьшение потерь порошковых материалов при электроконтактной приварке. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, №11, С. 32.
86. Нафиков, М.З. (2006). Формирование сплошного металлопокрытия при электроконтактной наплавке валов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, №9, С.24-29.

87. Дорожкин, Н.Н. (1975). *Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками*. Минск: Наука и техника, 152с.
88. Дорожкин, Н.Н., Абрамович, Т.Н., Ярошевич, В.К. (1985). *Импульсные методы нанесения порошковых покрытий*. Минск: Наука и техника, 279с.
89. Божко, І. С., Санін, А.Ф., Хуторний, В.В. (2010). Вплив параметрів спікання на структуру і властивості порошкової нержавіючої сталі. *Вісник КНУ імені Михайла Остроградського*, Випуск 6 (65), Частина 1, С. 118-121.
90. Сайфуллин, Р.Н. (2008). Электроконтактная приварка ферромагнитных порошков. *Ремонт, восстановление, модернизация*, № 7, С. 22-23.
91. Сайфуллин, Р.Н. (2008). Способ электроконтактной приварки ферромагнитных порошков. *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 9, С. 42-44.
92. Сайфуллин, Р.Н. (2009). Поведение ферромагнитной частицы при электроконтактной приварке порошков. *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 4, С. 46-52.
93. Сайфуллин, Р.Н., Юнусбаев, Н.М. (2009). Расчет параметров электромагнита для электроконтактной приварки порошковых материалов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, № 1, С. 43-44.
94. Сайфуллин, Р.Н. (2009). Расчет магнитной силы притяжения частицы порошка при электроконтактной приварке. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, № 4, С. 31-33.
95. Сайфуллин, Р.Н., Фархшатов, М.Н. Устройство для электроконтактной приварки ферромагнитных порошков. Патент № 2299795 РФ. МПК В23К 11/06. Оpubл. 27.05.2007. Бюл. № 15.
96. Сайфуллин, Р.Н. Устройство для подачи ферромагнитного порошка при электроконтактной приварке. Патент № 2340432 РФ. МПК В23К 11/06, В22F 7/02. Оpubл. 10.12.2008. Бюл. № 34.
97. Сайфуллин, Р.Н. Устройство для электроконтактной приварки ферромагнитных порошков. Патент № 2342233 РФ. МПК В23К 11/06. Оpubл. 27.12.2008. Бюл. № 36.

98. Сайфуллин, Р.Н., Фархшатов, М.Н. Способ электроконтактной приварки ферромагнитных порошков. Патент № 2312746 РФ. МПК В23К 11/06. Оpubл. 20.12.2007. Бюл. № 35.

99. Дубровский, В.А., Зезюля, В.В. (2011). Применение технологий электроконтактной наварки проволокой при восстановлении различных деталей машин и механизмов. *Ремонт, восстановление, модернизация*, № 8, С.15-20.

100. Кочин, К.А., Дубровский, В.А., Булычев, В.В. (2000). Восстановление деталей электровозов электроконтактной наплавкой проволокой. *Локомотив*, № 3, С. 32-33.

101. Дубровский, В.А. (1997). Восстановление деталей сельхозмашин двухпроводочной электроконтактной наплавкой. *Техника в сельском хозяйстве*, № 5, С. 38-39.

102. Логинов, Г.П., Дубровский, В.А. (1998). Электроконтактная наплавка проволокой – эффективный способ восстановления изношенных деталей машин. *Автоматизация и современные технологии*, № 7, С. 10-12.

103. Соловей, А.Г., Дубровский, В.А. (1996). Прогрессивные технологии – в производство. *Тяжелое машиностроение*, № 10, С. 5-6.

104. Беречкидзе, А.В. (1995). Определение оптимальной частоты вращения восстанавливаемой детали при электроконтактной наварке ленты. *Сварочное производство*, № 9, С. 38-39.

105. Бурак, П.И. (2011). Продление ресурса деталей электроконтактной приваркой. *Тракторы и сельхозмашины*, №6, С. 42-44.

106. Бурак, П.И., Серов, А.В., Латыпов, Р.А. (2011). Оптимизация процесса электроконтактной приварки металлической ленты через аморфный припой. *Технология машиностроения*, №7, С. 35-40.

107. Болотов, Г. П., Новомлинец, О. А., Ганеев, Т. Р., Болотов, М. Г. (2006). Активация и модификация поверхностей металлов в вакууме перед сваркой и пайкой. *Научно-практический семинар «Сварка и родственные процессы в промышленности»*, С. 47–49.

108. Болотов, Г.П., Руденко, М. М. (2014). Отримання і застосування активованих іонною обробкою проміжних металевих прокладень при дифузійному зварю-

ванні. *Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, С. 169-170.

109. Фархшатов, М.Н. (2006). Определение остаточных напряжений покрытий, нанесенных электроконтактной приваркой ленты из коррозионностойких сталей. *Вестник Оренбургского государственного университета*, №9, С. 343-349.

110. Булычев, В.В., Латыпов, Р.А. (2012). Формирование очагов схватывания однородных металлов при электроконтактной приварке. *Сварочное производство*, №5, С.30-35.

111. Нафиков, М.З., Загиров, И.И., Игнатъев, А.Г. (2008). Остаточные напряжения в металлопокрытиях, нанесенном электроконтактной наплавкой. *Технология металлов*, №9, С. 29-33.

112. Беречикидзе, А. В. (1995). Определение оптимальной частоты вращения восстанавливаемой детали при электроконтактной наварке ленты. *Сварочное производство*, № 9, С. 38-39, ISSN 0491-6441.

113. Беречикидзе, А. В. (1989). Оптимальные значения шага и подачи при электроконтактной приварке ленты на шейках коленчатого вала. *Труды Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (ГОСНИТИ)*, Т.87, С.120-124, ISSN 0131-9299.

114. Левин, Э.Л., Сайфуллин, Р.Н. (2007). Особенности электроконтактной приварки стальной ленты к нормализованным и цементованным деталям. *Сварочное производство*, №10, С. 23-24.

115. Латыпов, Р.А., Молчанов, Б.А. (2009). Управление качеством покрытия при восстановлении и упрочнении деталей электроконтактной приваркой. *Сварочное производство*, №5, С. 21-28.

116. Латыпов, Р.А., Бурак, П.И. (2005). Электроконтактная приварка стальной ленты через промежуточный слой порошкового материала. *Технология металлов*, №5, С. 37-43.

117. Агеева, Е.В., Агеев, Е.В. (2011). Повышение качества ремонта и восстановления деталей современных транспортных систем. *Известия ТулГУ. Технические науки*, №4, С. 208-2013.
118. Сайфуллин, Р.Н., Гаскаров, И.Р. (2010). Долговечность деталей, восстановленных электроконтактной приваркой стальной ленты. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*, №1, С. 44-46.
119. Буше, Н. А., Копытько, В.В. (1981). *Совместимости трущихся поверхностей*. М.: Наука, 223 с.
120. Власов, В. М., Жанказиев, С.В., Круглов, С.М. (2004). *Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: Учебник*. М.: Академия, 480 с.
121. Сайфуллин, Р.Н. (2015). Способ электроконтактной наплавки порошков и порошковых композиций. *Инженерное обеспечение в АПК*, №3, С. 31-37.
122. Шнырев, А.П., Голиницкий, П.В. (2014). К вопросу об электроконтактном напекании металлических порошков на бронзовые поверхности. *Природообустройство*, №3, С. 83-86.
123. Фархшатов, М.Н., Левин, Э.Л., Сайфуллин, Р.Н. (2010). Ремонт турбокомпрессора электроконтактной приваркой порошковых материалов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, №3, С. 4-5.
124. Гафо, Ю.Н., Кузнечик, О.О., Сосновский, И.А., Кашицин, Л.П., Сосновский, А.В., Клименко, С.Е., Сосновский, С.И. (2008). Электротермическая наплавка порошковых покрытий на узлы трения. *Новые материалы и технологии в машиностроении*, №8, С.23-25.
125. Ожегов, Н. М., Ружьев, В. А., Капошко, Д. А., Соловьев, С. А., Лялякин, В. П., Слинко, Д. Б. (2015). Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе совершенствования наплавочных технологий. *Труды Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (ГОСНИТИ)*, Т.121, С.273-281.
126. Многостадийная обработка поверхности деталей повышающая износостойкость. А.с. 55-41299 Япония. Кл. С23С. Опубл. 23.10.1980.
127. Воловик, Е. Л. (1981). *Справочник по восстановлению деталей*. М.: Колос, 354 с.

128. Хрущев, М. М., Бабичев, М.Л. (1960). *Исследование изнашивания материалов*. М.: Наука, 352 с.
129. Карасик, И. И. (1978). *Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения*. М.: Наука, 136 с.
130. Колмыков, В.И., Росляков, И.Н. (2009). Низкотемпературная нитроцементация как способ повышения эксплуатационных свойств деталей, восстановленных железнением. *Автомобильная промышленность*, №11, С. 28–32.
131. Колмыков, Д.В., Серебровский, В.И. (2009). Восстановление деталей машин цементованными железохромистыми покрытиями. *Главный механик*, №3, С. 9–12.
132. Костин, Н.А., Трусова, Е.В., Колмыков, В.И. (2015). Восстановление штампового инструмента наплавленными цианированными покрытиями. *Металлургия машиностроения*, №2, С. 28–30.
133. Колмыков, В.И., Горожанкин, В.В., Романенко, Д.Н. (2013). Прогнозирование абразивной износостойкости двухфазных структур в металлических композициях. *Заготовительные производства в машиностроении*, №5, С. 40–42.
134. Марусин, М. В., Щукин, В. Г. , Филимоненко, (2003). В. Н. Борирование стали при индукционной обработке. *Физика и химия обработки материалов*, №4, С. 54-62.
135. Андрюшечкин, В. И., Башнин, Ю.А. (1981). Борирование стали 38ХНМ с применением нагрева ТВЧ. *МиТОМ*, №4, С. 23-24.
136. Лысенко, А. Б., Брехаря, Г. П., Немошкаленко, В. В. (2002). Механизмы распределения насыщающего элемента в процессе лазерного борирования стали. *Металлофизика и новые технологии*, №10, С. 1363-1374.
137. Bartkowiak, K., Waligora, W. (2001). Laser boronizing of construction steel 45 using the laser beam of different section. *Materials Engineering and Baltrib 2001: 10 International Baltic Conference*, №4, С. 392-396.
138. Ляхович, Л. С., Исаков, С. А., Картошкин, В. М. (1985). Определение условий борирования стали при нагреве лазерным излучением. *МиТОМ*, №11, С. 12–14.
139. Лахтин, Ю. М., Коган, Я.Д., Бурякин, А.В. (1985). Поверхностное насыщение стали бором при воздействии излучения лазера. *МиТОМ*, №11, С. 9–11.

140. Крымов, В. Н., Абрагамович, Л.Г. (2003). Дугоразрядное борирование стали. *Металловедение черных и цветных сплавов*, С. 15-22.
141. Симоненко, А. Н., Шестаков, В.А., Побоиня, В.Н. (1982). Жидкостное борирование в индукционных соляных ваннах. *МиТОМ*, №5, С. 51–52.
142. Смольников, Е. А., Сарманова, Л.М. (1984). Борирование инструмента в электродных ваннах. *МиТОМ*, №3, С. 8–10.
143. Борисенок, Г. В., Васильев, Л. А., Ворошнин, Л. Г. (1981). *Химико-термическая обработка металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 424 с.
144. Ляхович, Л. С., Долманов, Л.С., Исаков, С.А. (1982). Борирование сталей в газовой среде. *МиТОМ*, №4, С. 25-28.
145. Минкевич, А. Н. (1965). *Химико-термическая обработка металлов и сплавов*. М.: Машиностроение. 492 с.
146. Jiang Bailing, Lei Tingquan (1991). Boronize layer's generation and growth mechanism. *Jinshu rechuli*, №4, С. 16-19.
147. Чельцов, В. Я., Щербаков, И.О. (1984). Влияние углерода и кремния на структуру борированного слоя инструментальных сталей. *Защитные покрытия на металлах*, № 18, С. 70-72.
148. Ворошнин, Л. Г. (1981). *Борирование промышленных сталей и чугунов*. Мн.: Беларусь, 205 с.
149. Коростелев, В. Ф., Петров, А.С., Игнатенко, Н.М. (1990). Особенности борирования инструментальной стали 4Х5МФС из газовой фазы. *МиТОМ*, №11, С. 26-29.
150. Минков, А. Н., Колесник, Н.М., Шульга, Т.И. (1990). Борирование штампов в порошковых смесях с применением защитной атмосферы. *Разработка, производство и применение инструментальных материалов: 6 республиканский семинар*, С. 39-40.
151. Кудрявцева, Н. Я., Громов, Ю.Н., Котофеев, В.А. (1991). Химико-термическая обработка штамповой стали 5ХНМ. *МиТОМ*, №5, С. 7-8.
152. Лабунец, В. Ф., Щепепетов, В.В. (1992). Повышение износостойкости деталей из стали У8 борированием из паст. *Технология и организация производства*, №2, С. 34-36.

153. Карпман, М. Г., Соколова, Н.Х., Дмитриева, Е.М. (1992). Износостойкие диффузионные покрытия на сталях для вырубных и чеканных штампов. *Металлургический журнал*, №10, С.7-8.
154. Xu Zangde, Wu Xuelan, Ding Junau (1989). Research study of rare-earth element's catalyzing effect on the solid-phase boronization. *Jinshu rechuli*, №6, С. 21-25.
155. Chen Chengwei, Wang Weilin, Zang Shuyan, Zang Yaming (1989). 3Cr2W8V steel boronization in the environment with the additives of the rare-earth elements. *Jinshu rechuli*, №9, С. 9-13.
156. Liu Yongxin (1996). Boride layer's fragility analysis and control. *Jixie gongcheng xuebao*, №1, С. 50-55.
157. Янцен, Г.И., Астащенко, В.И., Сергеева, Е.И. Порошкообразный состав для борирования стальных изделий. А.с. 1712462. СССР. МКИ С23 С8/70. Заявл. 13.02.90. Опубл. 15.02.92. Бюл. № 6.
158. Ni Zhenyao, Ye Pin, Wang Pengzhu (1990). Preliminary cementation and nitriding catalyze the processes of boronization and chromium coating. The investigation of the event and its mechanism. *Heat Treatment and Surface Engineering*, №6, PP. 194-200.
159. Wang Pengzhu, Ye Ping, Ni Zhenyao (1995). Study on accelerated boriding and chromizing by precarburing and prenitriding. *Heat Treatment and Surface Engineering*, №2, PP. 349-354.
160. Иванов, А. С., Карманова, О.Н., Гужева, М.Б. (1999). Бороцементация низкоуглеродистых мартенситных сталей. *Вестник ПГТУ*, №2, С. 3-8.
161. Бирук, Н. Г., Костенко, А.А., Тракшинский, Р.Б. (1990). Влияние предварительной термической обработки на формирование борированного слоя на стали 35. *Металлургический журнал*, №2, С. 22-23.
162. Руфанов, Ю. Г., Бирук, Н.Г., Бордюг, Г.К. (1983). Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства боридного слоя. *Металлургический журнал*, №12, С. 13-14.
163. Гурьев, А. М., Рубцов, А.А. (1995). Химико-термическая обработка инструментальных сталей в условиях циклического изменения температур. *Прогрессивные технологии в машиностроении*, С. 43-44.

164. Sofroshenkov, A. F., Pomelnikova, A. S., Starodubtseva, L. A. (1990). Chemical thermocyclical steel treatment. *Heat Treat. and Technol. Surface Coat.: New Process. and Appl. Exper.: Proc. 7th Int. Congr. Heat Treat. Mater*, Vol. 1, PP. 120-125.

165. Аракельян, В. С., Даутбаев, С. А., Гинатулина, В. В. Состав для титанирования стальных деталей. А. с. 1213083. СССР. МКИ С 23 С12/00. Заявл. 08.05.84. Опубл. 09.86. Бюл. №7.

166. Просвирин, В. И., Федосов, А.И., Мякишев, Ю.С. (1956). Алитирование лопаток газовых турбин из аустенитной стали. *МиТОМ*, №4, С 35-38.

167. Смольников, Е. А., Сарманова, Л.М. (1984). Борирование инструмента в электродных ваннах. *МиТОМ*, №3, С. 8–10.

168. Городнов, П. Т. (1962). *Повышение жаростойкости стальных изделий методом алитирования*. М.: Машгиз, 110 с.

169. Карпман, М. Г. (1982). Выбор метода и способа диффузионного насыщения поверхности изделий. *МиТОМ*, №4, С.19.

170. Дубинин, Н. Г. (1965). Классификация методов диффузионного насыщения поверхности сплавов металлами. *Диффузионные покрытия на металлах*, Вып.4, С.144.

171. Герасимов, В. В., Порфирьева, Р.Т. (1995). Новые активаторы для термодиффузионного алитирования и алюмосилицирования сталей. *Фундаментальные проблемы металлургии: межвузовская научно-техническая конференция*, С.77–78.

172. Заблоцкий, В. К., Белкин, М.Я., Шимко, А.И. (2006). О некоторых особенностях строения алитированного слоя. *Вестник ПГТУ*, №16, С. 101–104.

173. Заблоцкий, В. К., Белкин, М.Я., Шимко, А.И. (2004). Формирование алитированного слоя для защиты от окисления наплавленного инструмента из быстрорежущих сталей. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем*, №15, С. 103-107.

174. Заблоцкий, В. К., Шимко, А.И. (2005). Особенности влияния алитирования на структуру и свойства стали 10. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, №6, С. 33-36.

175. Андрюшечкин, В. И., Гущина, Л.К., Брио, И.А. (1982). Механические свойства борированных и алитированных сталей при кручении. *Известия вузов. Черная металлургия*, №5, С. 117-121.

176. Андрюшечкин, В. И., Гущина, Л.К., Ежов, И.П. (1982). Механические свойства алитированных и борированных сталей при изгибе. *Известия вузов. Черная металлургия*, №3, С. 153-155.

177. Рогов, В. А., Бутов, В. В. Состав для боротитанирования стальных изделий. А. с. 1008277 СССР. МКИ С23С9/04. Заявл. 06.01.82. Оpubл. 1983. Бюл. №12.

178. Субботин, А. В., Салманов, Н. С., Занозин, А. А. Способ упрочнения литого режущего инструмента из быстрорежущей стали. Патент №2172360 Россия. МПК С 23 С 12/00, С 23 F 17/00. Заявл. 16.11.1999. Оpubл. 20.08.2001.

179. Lin Yongkin, Cheng Tao (1991). Borotitanizing with the use of the slush. *Jinshu rechuli – Heat Treat. met*, №9, S. 8-14.

180. Ouyang Meng Lan, Xie Cong Xin (1990). The structure of the boroaluminized layer, which had been generated from INSYCONT 90 slush. *3 Miedzianar symp. «Zag. tribol. elementow w spolpr. stykowo»*, S. 105-112.

181. Ляхович, Л. С., Ворошнин, Л. Г., Панич, Г. Г., Щербаков, Э. Д. (1974). *Многокомпонентные диффузионные покрытия*. Минск: Наука и техника, 286 с.

182. Lou Baiyang, Lao Shanqing, Lou Cenghua (1991). Boroaluminizing with rare-earth metals at moderate temperatures and further thermal treatment. *Jinshu rechuli – Heat Treat. met*, №10, S. 3-6.

183. Ворошнин, Л. Г., Борисенок, Г. В. Состав для бороалитирования стальных изделий. А. с. 1033570 СССР. МКИ С23 С 9/04. Заявл. 05.01.82. Оpubл. 1983. Бюл. №29.

184. Ляхович, Л. С., Корнопольцев, Н. В., Шинкевич, Ю. А., Садыков, В. Б. Состав для комплексного насыщения стальных изделий. А.с. 1438269 СССР. МКИ С23С 12/02. Заявл. 14.04.87. Оpubл. 10.12.95. Бюл. №34.

185. Xr Hui-zhi, Yin Shu-tong, Fu Yu-dong (2003). The structure and properties of Cr—Ti and Al—Ti surfaces of the carbon steel. *Harbin gongcheng daxue xuebao*, № 5, PP. 539-543.

186. Юферов, К.В. Фархшатов, М.Н. Сайфуллин, Р.Н. Левин, Э.Л. (2012). Особенности электроконтактной приварки термообработанной стальной ленты. *Ремонт Восстановление Модернизация*, №1, С. 23-25.
187. Бутаков Б.И. (2007). Исследование и разработка способа обкатывания роликами стальных деталей с целью повышения их контактной прочности. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, №37, С. 63-74.
188. Нафиков, М.З. (2014). Физико-технические и эксплуатационные свойства металлопокрытий, сформированных контактной приваркой стальных проволок. *Российский электронный научный журнал*, №4, С. 46-56.
189. Нафиков, М.З., Загиров, И.И., Игнатьев, А.Г. (2008). Остаточные напряжения в металлопокрытии, нанесенном электроконтактной наплавкой. *Технология металлов*, №9, С. 29-33.
190. Юферов, К. В. (2012). Влияние мощности источника тока на трещинообразование при восстановлении деталей электроконтактной приваркой стальной высокоуглеродистой ленты. *Инновационные тенденции развития Российской науки*, №2, С.93-95.
191. Заблоцкий, В. К., Фельдман, В.Е., Фесенко, А.М., Федоринов, В.А., Шимко, О.И., Мелещенко, И.Ю., Фесенко, В.А., Корсун, В.А., Шимко, В.И. Способ термической обработки стали. Патент № 43690 Украины на полезную модель. МПК С21D 9/22 (2006.01). №u200903360. Заявл. 08.04.2009. Оpubл. 25.08.2009. Бюл. 16/2009.
192. Хасуи, А., Моригаки, О. (1985). *Наплавка и напыление*. Рипол Классик, 352с.
193. Ярошенко, А.П., Шапранов, В.В., Кучеренко, В.А., Лобачев, В.Л. (1993). *Термолиз соединений внедрения углей. Термодеструкция угля*. К.: Наук. думка, 106с.
194. Osborne, G. (1987). Intumescent coating – a look at their properties and how they perform. *Fire*, Vol.79, №980, PP.31.
195. Peper, J.M.G. (1986). Fire resistance intumescent materials. *Proc. Int. Cong. Technol. and Technol. Exchange*, PP.39-43
196. Дядин, Ю.А. (2000) Графит и его соединения включения. *Соросовский образовательный журнал*, Т.6, №10, С. 43-49.

197. Фиалков, А.С. (1997). *Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе*. М.: Аспект-Пресс, 718с.
198. Уббелоде, А.Р., Льюис, Ф.А. (1965). *Графит и его кристаллические соединения*. М.: Мир, 256с.
199. Загиров, И.И., Нафиков, М.З. (2008). Математическая модель формирования соединения при электроконтактной наплавке (наварке) проволоки. *Технология машиностроения*, №6, С.62-66.
200. Klimenko, Yu V. (1978). *Electric resistance surfacing*. Moscow: Metallurgiya, 350p.
201. Bulychev, V.V., Zezyulya, V.V. (2011). Electrical resistance deposition with a wire and deceleration of the roller electrode. *Welding International*, Vol. 25, No. 5, PP. 374–377, DOI: 10.1080/09507116.2011.554231.
202. Saifullin, R.N., Natalenko, V.S. (2011). A method of production of sintered strips by electric resistance rolling. *Welding International*, Vol. 25, No. 3, PP. 205–208, DOI: 10.1080/09507116.2010.540865.
203. Гулаков, С.В., Лаврентик, О.А., Матвиенко, В.В. (2002). Повышение качества электроконтактной наплавки. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, Вип. 12, С. 134–139.
204. Гулаков, С.В., Бурлака, В.В., Мироненко, А.И. (2017). Вдосконалення технології наплавлення стрічковим електродом. *Вестник Приазовского государственного технического университета*, №34, С.94-97.
205. Зыбин, И.Н. (2014). Особенности формирования соединения при электроконтактной наварке проволокой наклонными электродами. *Современные проблемы науки и образования*, №6, С.1-6.
206. Соловых, Е.К., Волков, Ю.В., Ворона, Т.В., Лопата, Л.А., Николайчук, В.Я., Дудан, А.В. (2017). Определение оптимальных режимов электроконтактного припекания дискретных покрытий при восстановлении и упрочнении валов двигателей. *Проблеми трибології*, №1, С.79-89.
207. Патон, Б.Е., Подола, Н.В., Гавриш, В.С. (1998). Оценка качества контактной точечной сварки с помощью нейронных сетей. *Автоматическая сварка*, №12, С. 3-10.

208. Irving, B. (1996). The search goes on for the perfect resistance welding control. *Welding Journal*, № 1, PP. 63-68.
209. Васильев, А.С., Белахов, О.В., Петров, Ю.А. (1980). Система активного контроля качества контактной сварки на базе математической модели сварочного процесса. *Автоматическая сварка*, №5, С. 42-44.
210. Таран, Ю.М., Подола, Н.В. (1977). Устройство для измерения усилия сжатия электродов контактных машин. *Автоматическая сварка*, №10, С. 61-62.
211. Филиппов, Ю.И., Квицель, А.Д. (1980) Прибор для измерения и контроля параметров режима контактной сварки. *Сварочное производство*, №4, С. 38-39.
212. Гавриш, В.С. (1993). Автоматизация процессов контактной сварки (аналитический обзор). *Автоматическая сварка*, №9, С.34-42.
213. Гречушкин, Ю.Г., филиппов, Ю.И., Яшунский, А.Я. (1996). Оборудование для контактной сварки. *Сварочное производство*, №11, С. 9-13.
214. Зотиков, Р.М., Золотых, Ю.И., Куканов, Ю.А. (1998). Машины для контактной сварки. *Сварочное производство*, №8, С. 29-33.
215. Зубченко, А.С., Данилов, А.И., Чиркин, А.В. (1995). Развитие и перспективы стыковой сварки давлением в энергомашиностроении. *Тяжелое машиностроение*, №10, С.9-13.
216. Смирнов, В.В. (2000). *Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие*. СПб.: Энергоатомиздат, 848 с. ISBN 5-283-04582-5.
217. Иоффе, Ю.Е., Зайцева, Е.М. (1995). Новые разработки по автоматизации сварки в области управления и контроля. *Сварочное производство*, №5, С. 24-26.
218. Махненко, В.И., Скоснягин, Ю.А., Романов, И.Ю. (1992). Информационное обеспечение системы проектирования технологии контактной точечной сварки. *Автоматическая сварка*, №5, С. 3-7.
219. Шишмаков, И.А., Левин, М.Я., Симо, Д.К., Матвеев, А.А., Лебедев, Ю.А. (1998). Аппаратура управления и контроля для контактной сварки. *Сварочное производство*, №2, С. 33-36.

220. Подола, Н.В., Руденко, П.М., Гавриш, В.С. (2005). Алгоритмы компенсации износа электродов при контактной точечной сварке. *Автоматическая сварка*, №4, С. 18-23.

221. Подола, Н.В., Гавриш, В.С., Руденко, П.М. (1999). Адаптивная система регулирования процесса точечной контактной сварки низкоуглеродистой стали. *Автоматическая сварка*, №6, С.3-5.

222. Подола, Н.В., Руденко, П.М., Горун, Н.П., Ягнятинский, В.М. (1999). Контроль качества контактной точечной сварки межэлементных соединений аккумуляторов на основе нечеткой логики. *Автоматическая сварка*, №5, С. 42-45.

223. Руденко, П.М., Гавриш, В.С. (2007). Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02. *Автоматическая сварка*, №11, С.43-45.

224. Подола, Н.В., Руденко, П.М. (1988). *Автоматизированные системы контроля и управления контактной и дуговой сваркой на основе микроЭВМ*. М.: Машиностроение, 60с.

225. Донченко, Н.А., Макаров, Г.Т., Сапожникова, С.Л., Урсатьев, А.А. Устройство для контроля качества контактной точечной сварки. А.с. №662296 СССР. МПК В23 К11/24. Заявл. 03.05.76. Оpubл. 15.05.79. Бюл. №18.

226. Жуков, Ю.А., Билев, К.К., Руденко, П.М. Устройство для контроля процесса контактной точечной сварки. А.с. 867565 СССР. МПК В23 К11/24. Заявл. 10.08.79. Оpubл. 30.09.81. Бюл. №36.

227. Masao, K., Yoshihiro, K., Masaru, O. Joining method. Патент № 9029450 Япония. МПК В 23 К11/24. Заявл. 20.07.95. Оpubл. 04.02.97.

228. Herman, A., Stanley, J., Robert, K. Resistance spot welder process monitor. Патент №4596917 США. МПК В 23 К11/24. Заявл. 16.01.84. Оpubл. 24.06.86.

229. Урсатьев, А.А., Подола, Н.В., Макаров, Г.Т. Способ контроля качества точечной контактной сварки. А.с. №721279 СССР. МПК В 23 К11/24. Заявл. 09.03.76. Оpubл. 15.03.80. Бюл. №10.

230. Урсатьев, А.А., Подола, Н.В. Устройство для контроля качества контактной точечной сварки. А.с. 550253 СССР. МПК В23 К11/24. Заявл. 18.03.76. Оpubл. 15.03.77. Бюл. №10.

231. Урсатьев, А.А., Подола, Н.В., Донченко, Н.А. Способ контроля качества контактной сварки. А.с. №795818 СССР. МПК В23 К11/24. Заявл. 16.11.78. Оpubл. 15.01.81. Бюл. №2.

232. Masuhiro, G., Koji, F., Makoto, R. Патент Device for monitoring weld quality of resistance welding. №07185835 Япония. МПК В23 К11/24. Заявл. 27.12.93. Оpubл. 25.07.95.

233. Masuhiro, G., Koji, F., Makoto, R., Hideki, I. Quality judging device of resistance welding. Патент №05228647 Япония. МПК В23 К11/24. Заявл. 21.02.92. Оpubл. 07.09.93.

234. Sadayuki, T., Okitoshi, H. Method and device for monitoring welding quality. Патент №11047945 Япония. МПК В23 К11/24. Заявл. 01.08.97 Оpubл. 23.02.99.

235. Makoto, R., Koji, F., Yasuhiro, G. Device and method for controlling resistance welding. Патент №9094673 Япония, МПК В23 К11/24. Заявл. 29.09.95. Оpubл. 08.04.97.

236. Tsal, C.L., Dai, W.L., Dickinson, D.W., Partian, I.C. (1991). Analysis and development of real-time control methodology in resistance spot welding. *Welding Journal*, №6, PP. 339-351.

237. Martin, P.I. (1994). Artificial neural networks in welding. *Material*, №2, PP. 62-67.

238. Гладков, Э.А. (1996). Задачи прогнозирования качества и управления формированием шва в процессе сварки с использованием нейросетевых моделей. *Сварочное производство*, №10, С. 36-41.

239. John J. Stefanski Apparatus using a neural network for power factor calculation. Патент №5450315 США, МПК В23 К11/24. Заявл. 26.09.94. Оpubл. 12.09.95.

240. Daniel, J., Sampaio, B.S., Norbert Link, Lucas A. Moscato (2006). Quality estimation using generic model parameters and neural network. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, Vol.2, PP. 765-771.

241. Подола, Н.В., Руденко, п.м., Гавриш, В.С. (2004). Применение адаптивного алгоритма для контроля качества сварки в системах управления контактными точечными машинами. *Автоматическая сварка*, №6, С. 15-18.
242. Dilthey, U., Dickersbach, J. (1999). Application of neural networks for quality evaluation of resistance spot welds. *ISIJ International*, №10, PP. 1061-1066.
243. Грибачев, В.П. (2006). Настоящее и будущее нейронных сетей. *Компоненты и технологии*, №5, С. 34-40.
244. Руденко, П.М., Гавриш, В.С. (2007). Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02. *Автоматическая сварка*, №11, С.43-45.
245. Подола, Н.В., Руденко, П.М., Горун, Н.П., Ягнятинский, В.М. (1999). Контроль качества контактной точечной сварки межэлементных соединений аккумуляторов на основе нечеткой логики. *Автоматическая сварка*, № 5, С. 42–45.
246. Андриевская, Н.В., Резников, А.С., Черанев, А.А. (2014). Особенности применения нейронечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления. *Фундаментальные исследования*, № 11-7, С. 1445-1449.
247. Леоненков, А.В. (2005) *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH*. СПб.: БХВ-Петербург, 736с.
248. Бурак, П.И. (2007). Движущие силы схватывания и образования процесса соединения поверхностей при электроконтактной приварке. *Международный технико-экономический журнал*, № 4(4), С. 33-37, ISSN 1995-4646.
249. Сайфуллин, Р.Н. (2008). Восстановление деталей машин электроконтактной приваркой металлопорошковых композиций. *Техника в сельском хозяйстве*, №2, С. 26-28, ISSN 0131-7105.
250. Сайфуллин, Р.Н. (2009). Восстановление деталей электроконтактной приваркой порошковой проволоки. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, №1, С. 27-28, ISSN 0206-572X.
251. Понтилеенко, Ф.И., Лялякин, В.П., Иванов, В.П., Константинов, В.М. (2003). *Восстановление деталей машин: Справочник*. М.: Машиностроение, 672 с.

252. Черноиванов, В.И., Лялякин, В.П. (2003). *Организация и технология восстановления деталей машин*. М.: ГОСНИТИ, 488 с.
253. Бережная, Е.В. (2012). Современные методы повышения износостойкости землеройной техники. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №3 (28), С. 33-36, ISSN: 1993-8322 (Print).
254. Бережная, Е.В. (2013). Совершенствование технологии электроконтактной наплавки. *Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: международная конференция (Киев)*, С. 161-162.
255. Головин, С. А., Пушкар, С.А. (1980). *Микропластичность и усталость металлов: монография*. М.: Металлургия, 240 с.
256. Бережная, Е.В. (2017). Повышение надежности деталей методом комбинированной обработки поверхности. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро)*, С. 282-284
257. Бережная, Е.В., Кузнецов, В.Д., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. (2017). Исследование микропластической деформации металла, наплавленного электроконтактным методом. *Автоматическая сварка*, №7, С. 24-28, ISSN: 0005-111X (Print).
258. Мадянов, С.А., Калинин, В.Р., Краев, А.П., Малиновская, С.Г. (1990). Исследование микропластической деформации как метод оценки охрупчивания металлов. *Механика и физика разрушения хрупких материалов*, №4, С.33-38.
259. Бережная, Е. В. (2016). Стойкость восстановленных валов, работающих в условиях циклического нагружения. *Университетская наука-2016: Международная научно-техническая конференция (Мариуполь)*, Т. 2, С. 130–131.
260. Chapetti, M.D., Tagawa, T., Miyata, T. (2003). Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels. Part 1: Revive and analysis of the mechanism of failure. *Materials Science and Engineering*, Vol. 356, № 1-2, PP. 227-23.
261. Подрезов, Ю.Н., Даниленко, В.И. (2012). Феноменология модуля пластичности сильнодеформируемых материалов. *Физика и техника высоких давлений*, Том 22, №4, С.47-60.
262. Кроха, В.А. (1968). *Кривые упрочнения металлов при холодной деформации*. М.: Машиностроение, 380с.

263. Wang, Q.Y., Baudry, G., Bathias, C., Berard, J.Y. (2000) Subsurface crack initiation due to ultra-high cycle fatigue. *Advanced in mechanical behavior, plasticity and damage: Proceedings of EUROMAT 2000*, Vol. 2, PP. 1083-1087.

264. Терентьев, В.Ф. (2006). Усталость высокопрочных сталей. Ч.1. Корреляция с пределом прочности, вид кривых и зарождение трещин. *Деформация и разрушения материалов*, №8, С. 2-11.

265. Трефилов, В.И., Моисеев, В.Ф., Печковский, Э.П. (1987). *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов*. Киев: Наук. думка, 245с.

266. Терентьев, В.Ф. (1987). *Физическое металловедение. Т3. Физико-механические свойства металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 662с.

267. Klesnil, M., Lukas, P. (1992). *Fatigue of Metallic Materials*. Materials Science Monographs 71: Elsevier, 240p.

268. Бурак, П.И. (2010). Продление ресурса детали электроконтактной приваркой. *Тракторы и сельхозмашины*, №6, С. 42-44, ISSN 0253-8753.

269. Нафиков, М.З. (2006). Формирование сплошного металлопокрытия при электроконтактной наплавке валов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, №9, С. 24-29.

270. Прохоров, Н.Н. (1988). Влияние параметров электроконтактной наплавки на глубину ЗТВ. *Сварочное производство*, №4, С. 8-10.

271. Головин, Г.Ф., Замятнин, М.М. (1990). *Высокочастотная термическая обработка*. М.: Машиностроение, 239 с.

272. Васильев, А.С., Царевский, В.В. (2001). Высокоинтенсивный индукционный нагрев. *Электричество*, № 12, С. 37 – 43.

273. Бровер, Г.И., Варавка, В.И., Русин, А.П. (1988). Особенности строения и свойств инструментальных сталей после высококонцентрированного нагрева и отпуска. *Физика и химия обработки материалов*, № 5, С. 107 – 113.

274. Бережная, Е.В. (2015). Повышение ресурса работы технологического оборудования литейных цехов комбинированной обработкой. *Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: Международная научно-техническая конференция (Краматорск)*, С. 30-32.

275.Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на физико-механические характеристики покрытия. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №38, С. 125-131, ISSN: 2222-9000.

276.Бережная, Е.В. (2013). К расчету температурного поля при электроконтактной наплавке многослойных покрытий. *Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: Международная научно-техническая конференция (Краматорск)*, С. 31.

277.Кидин, И.Н. (1950). *Термическая обработка стали при индукционном нагреве*. М: Металлургиздат, С.317.

278. Добровольская, В.И., Ратников, Д.Г. (1980). *Индукционный нагрев при производстве особо чистых материалов*. М.: Машиностроение, 63с.

279. Слухоцкий, А.Е., Рыскин, С.Е. (1974). *Индукторы для индукционного нагрева*. Л.: «Энергия», 264с.

280.Кассов, В.Д., Жартовский, А.В., Белозерцев, А.Н. (2007). Теплотехнический расчет индукторов для нагрева перемещающихся цилиндрических заготовок. *Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №2Е (10), С. 99-105.

281.Бережная, Е.В. (2016). Выбор режима нагрева наплавленной цилиндрической детали токами высокой частоты. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XIV Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.14, ISBN: 978-966-379-640-6.

282. Лыков, А.В. (1967). *Теория теплопроводности*. М.: «Высшая школа», 599с.

283.Янке, Е., Эмде, Ф., Леш, Ф. (1977). *Специальные функции*. М.: Наука, 344с.

284.Бережная, Е.В. (2017). Выбор режима индукционного нагрева для нормализации наплавленных поверхностей цилиндрических деталей. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, Вип. 34, С. 115-123, ISSN: 2225-6733 (Print).

285.Бережная, Е.В. (2017). Термічна обробка відновлених електроконтактним методом циліндричних деталей. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.18.

286.Бернштейн, М.Л., Рахштадт, А.Г. (1983). *Металловедение и термическая обработка стали*. М.: Металлургия, 352с.

287.Заблоцкий, В.К., Шимко, В.И. (2011). Особенности структурно-фазовых превращений в сталях 45Х3ГНМФ и 70Х5ВМФ при охлаждении в изотермических условиях. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 4 (25), С. 84-86.

288.Кассов, В.Д., Чигарев, В.В., Колесникова, О.П. (1998). Повышение прочностных характеристик сердечника порошковой проволоки. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*, С. 160-164.

289.Ярошенко, А.П., Савоськин, М.В. (1955). Высококачественные вспучивающиеся соединения интеркалирования графита – новые подходы к химии и технологии. *Журнал прикладной химии*, Т.68, Вып. 8, С. 1302-1306.

290.Бережная, Е.В. (2017). Технологические особенности термообработки деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Актуальные проблемы в машиностроении*, Том 4, №1, С. 126-131, ISSN: 2313-1020.

291.Бережная, Е.В. (2017). Влияние структуры металлопокрытия на сопротивление развитию трещин. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, Вып. 77, С.147-151, ISSN: 2219-5548 (Print).

292.Кудрявцев, И. В., Наумченков, И.В. (1976). *Усталость сварных конструкций*. М. : Машиностроение, 272 с.

293.Грибков, Е.П., Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., КассовВ.Д. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84241 України на корисну модель. МПК В23К 35/40(2006.01). №и 2013 05779. Заявл. 07.05.2013. Опубл. 10.10.2013. Бюл.№ 19. 4с.

294.Грибков, Е.П., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Чепель, Ю.А. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84906 України на корисну модель. МПК В23К 35/40 (2006.01). №и 2013 03311. Заявл. 18.03.2013. Опубл. 11.11.2013. Бюл.№21. 4с.

295.Кассов, В.Д., Грибков, Э.П., Грибкова, С.Н., Бережная, Е.В. (2016). Конечно-элементное моделирование внедрения твердых частиц в оболочку при про-

катке порошковых лент. *Обработка материалов давлением*, №2 (43), С.36-40, ISSN: 2076-2151 (Print).

296.Ситкевич, М.В. (2011). Химико-термическое упрочнение инструментальной оснастки, совмещаемое с нагревом под термообработку. *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*, Вып. 33, Ч.2, С.133-148.

297.Заблоцкий, В. К., Лапченко, А.В. (2007). Влияние упрочняющей термической обработки на структуру комплексных В – Ti – Al покрытий на углеродистых сталях. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, №3/1(27), С. 71-75.

298.Турчанин, М.А., Бережная, Е.В., Малыгина, С.В. (2013). Технико-экономические преимущества электроконтактной наплавки режущего инструмента. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №32, С.198-201, ISSN: 2222-9000 (Print).

299.Кассов, В.Д., Шевченко, И.В., Чигарев, В.В. (1998). Повышение эффективности защиты металлургических поверхностей от набрызгивания при сварке. *Вестник Приазовского гостехуниверситета*, № 6, С. 155-159.

300.Медведев, Я.И., Валисовский, И.В. (1973). *Технологические испытания формовочных материалов*. М.: Машиностроение, 312с.

301.Чигарев, В.В., Малыгина, С.В. (2003). Повышение работоспособности прокатного оборудования. *Захист металургійних машин від поломок*, Вип. 7, С. 22-27.

302.Бережная, Е.В. (2011). Перспективные направления снижения затрат на восстановление деталей подъемно-транспортного оборудования, работающих в условиях абразивного износа. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.16.

303. Бережна, О.В., Лапченко, О.В., Кузнецов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №116099 України на корисну модель. МПК В23К 11/00, В22D 19/00, В22D 19/06 (2006.01). №и 2016 11237. Заявл. 07.11.2016. Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9. 3с.

304.Гавриш, П.А., Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2016). *Нанесение защитных покрытий порошковыми материалами: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-730-4.

305. Гавриш, П.А., Бережная, Е.В., Соболев-Бутовченко, Е.А. (2016). Газотермическое напыление антифрикционного покрытия деталей перегружателя TAKRAF. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №2 (20E), С. 49-54, ISSN: 2219-7869 (Online).

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(20%D0%95\)_2016/article/10.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(20%D0%95)_2016/article/10.pdf).

306. Бережная, Е.В. (2015). Повышение ресурса работы технологического оборудования литейных цехов комбинированной обработкой. *Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: Международная научно-техническая конференция (Краматорск)*, С. 30-32.

307. Грибков, Э. П., Кассов, В. Д., Данилюк, В. А., Бережная, Е.В. (2013). *Численное математическое моделирование процессов прокатки порошковых лент: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-652-9.

308. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2012). Математическое моделирование напряжений и деформаций при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электроконтактной наплавки. *Обработка материалов давлением*, №1 (30), С. 61-64, ISSN: 20762151 (Print).

309. Грибков, Э.П., Данилюк, В.А., Бережная, Е.В. (2012). Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой электродной ленты. *Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №13 (184), Ч.1, С.74-79, ISSN: 1998-7927 (Print).

310. Данилюк, В.А., Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Разумович, О.О. (2013). Совершенствование технологии изготовления порошковых проволок сложной конструкции для восстановления деталей технологического оборудования. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №33, С. 47-51, ISSN: 2222-9000 (Print).

311. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П., Кузнецов, В.Д. (2017). Численное математическое моделирование процесса консолидации порошковой среды электроконтактным методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Математика*.

матичне моделювання в техніці та технологіях, №6 (1228), С.15-20, ISSN: 2222-0631 (Print).

312. Berezshnaya, O., Chepel, Ju., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2015). Mathematic modeling of detail's restoration combined process. *Metallurgical and Mining Industry*, №10, PP.198-201, ISSN: 20760507 (Print).

313. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Селедцов, А.С. (2012). Методика и оборудование для экспериментального определения исходных данных на проектирование процессов обработки давлением дискретных сред. *Обработка материалов давлением*, №3(32), С.137-141, ISSN: 2076-2151 (Print).

314. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гущин, В.М. (2012). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: Міжвузівська науково-технічна конференція (Донецьк)*, С.15.

315. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гущин, А.М. (2014). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(32), С. 6-9, ISSN: 1993-8322 (Print).

316. Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Кассов, В.Д., Наливайко, О.М. Машина тертя зворотньо-поступального руху. Патент №85987 України на корисну модель. МПК G01N3/56(2006.01). №и 2013 06952. Заявл. 03.06.2013. Опубл. 10.12.2013. Бюл.№23. 4с.

317. Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Гущин, А.М. Стенд для випробування на надійність ріжучих елементів машин. Патент №107668 України на корисну модель. МПК G01N 3/56 (2006.01). №и 2015 08938. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 24.06.2016. Бюл.№.12. 5с.

318. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А. (2012). Машина трения для испытания на износостойкость металла наплавки. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №31, С.112-117, ISSN: 2222-9000 (Print).

319. Бережная, Е.В. Гущин, А.М., Турчанин, М.А. (2015). Гибкопереналаживаемый триботехнический комплекс для исследования износостойкости и долговечности

наплавленных режущих элементов рабочих органов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(34), С.10-13, ISSN: 1993-8322 (Print).

320.Бережная, Е.В. Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2012). Микроконтроллерная система мониторинга интенсивности износа наплавленного металла. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №2(27), С.141-144, ISSN: 1993-8322 (Print).

321.Григоров, П.К., Катханов, Б.Б. (1972). Методика определения хрупкости борированного слоя. *Повышение надежности и долговечности деталей машин*, Вып. 16, С. 97-98.

322.Кузнецов, В.Д., Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Повышение износостойкости деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Проблеми тертя та зношування*, №3 (72), С.34-40, ISSN: 0370-2197 (Print).

323.Berezshnaya, O., Chepel, Ju., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2015). Development of welding equipment for the production of layered tapes. *Metallurgical and Mining Industry*, №12, PP.332-338, ISSN: 20760507 (Print).

324.Berezshnaya, O., Kuznetsov, V., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2016). Determining of the structural schemes and performance of linear DC motor control system for welding equipment development in the layered tapes production. *Metallurgical and Mining Industry*, №1, PP.154-157, ISSN: 20760507 (Print).

325.Сатонин, О.В., Бережна, О.В., Малигіна, С.В. Спосіб електроконтактного наплавлення. Патент №88576 України на винахід. МПК В23К 35/00 (2006.01). №и 2013 10799. Заявл. 09.09.2013. Опубл. 25.03.2014. Бюл.№.6. 4с.

326.Бережна, О.В., Гавриш, П.А., Кузнецов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей типу вал. Рішення про видачу деклараційного патенту України на корисну модель. МПК В23К11/00(2006.01), В22D19/00(2006.01), В22D19/06(2006.01). №и 2017 10242. Заявл. 23.10.2017.

327.Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. Спосіб визначення зварюваності різнорідних металів. Патент №106718 України на корисну модель. МПК В23К 31/12 (2006.01). №и 2015 08944. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 10.05.2016. Бюл. №9. 4с.

328.Зезюля, В.В., Булычев, В.В. Способ электроконтактной наплавки. Патент №2466000 России. МПК В23К 11/06. Заявл. 30.12.2010. Опубл. 10.11.2012.

329.Бережная, Е.В. (2014). Управление качеством металлопокрытия при восстановлении деталей электроконтактной наплавкой. *Все материалы. Энциклопедический справочник: ежемесячный научно-технический производственный журнал*, №6, С.22-26, ISSN: 1994-6260 (Print).

330.Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2014). Математическое моделирование формообразования слоя при электроконтактной наплавке проволокой деталей типа вал. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №6, Ч.2, С.93-96, ISSN: 1998-7927 (Print).

331.Бережная, Е.В., Грибкова, С.Н. (2013). Математическое моделирование напряжений и деформаций при электроконтактной наплавке проволок цилиндрических деталей. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць*, № 1 (14), С. 206-213, ISSN: 2218-1806 (Print).

332.Storozhev, M. V., Popov, E. A. (1977). *Theory of metal forming: a textbook for high schools*. Mashinostroenie, 423 s.

333. Gribkov, E.P., Perig, A.V., Danilyuk, V.A. (2015). Research into the process of producing powder tapes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, Vol. 77 (95-8), PP. 1087-1104, DOI: 10.1007/s00170-014-6496-x.

334. Bartulli, C., Valente, T., Tului, M. (2002). Plasma spray deposition and high temperature characterization of ZrB₂-SiC. *Surface and coating technologies*, Vol. 155, PP. 260-273, DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00058-0.

335.Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Цывинда, Н.И. (2014). Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса восстановления деталей землеройных машин методом электроконтактной наплавки. *Гірничий вісник: науково-технічний збірник*, Вип. 97, С. 201-205, ISSN: 2306-5435 (Print).

336.Бережная, Е.В. (2011). Восстановление деталей станочного оборудования электроконтактной наплавкой порошковой проволокой. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №29, С.175-179, ISSN: 2222-9000 (Print).

337.Сатонин, А.В., Кассов, В.Д., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2013). Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при электроконтактной наплавке лент с использованием процессов прокатки. *Обработка материалов давлением*, №1 (34), С.30-35, ISSN: 2076-2151 (Print).

338.Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Грибкова, С.Н. (2016). Термонапряженное состояние износостойкого слоя при электроконтактной наплавке. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, Вип. 32, С. 99-108, ISSN: 2225-6733 (Print). (URL): <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/9895>.

339.Воскресенский, К.Д. (2013) *Сборник расчетов и задач по теплопередаче*. Рипол Классик, 342 с., ISBN 5458353811.

340.Вейник, А.И. (2013). *Приближенный расчет процессов теплопроводности*. Рипол Классик, 190 с., ISBN 5458570960.

341.Бережная, Е.В. (2015). Тепловые процессы при консолидации порошковой среды электроконтактным способом. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 14.

342.Бережная, Е.В. (2017). Моделирование теплового состояния композиционного материала при электроконтактной наплавке. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Міжнародна науково-практична конференція (Чернігів)*, С. 61-63.

343.Berezshnaya, Olena V., Gribkov , Eduard P., Kuznetsov , Valeriy D. (2016). Investigation of Thermostressed State of Coating Formation at Electric Contact Surfacing of “Shaft” Type Parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 14 p., DOI: 10/1155/2016/6597317.

344.Бережная Е.В., Грибков Э.П., Кузнецов В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №118044 (Україна). МПК В23К 11/00, В22D 19/00, В22D 19/06 (2006.01). Опубл. 25.07.2017. Бюл. №14.

345.Грудев, А.П. (1973). *Внешнее трение при прокатке*. Металлургия, 287с.

346.Арзамасова, Б. Н. (2006). *Конструкционные материалы: Справочник*. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 346с.

347.Бережная Е.В., Кузнецов В.Д. Спосіб оцінювання міцності зчеплення зносостійкого шару, нанесеного електроконтактним методом. Патент №116024 (Україна). МПК G01N 19/04 (2006.01). Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9.

348.Бережная, Е.В. (2012). Стабилизация процесса электроконтактной наплавки режущего инструмента. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 13.

349.Чепель, Ю.А., Бережная, Е.В., Кассов, В.Д. (2013). Микропроцессорная система управления электроконтактной наплавкой двумя роликовыми электродами. *Проблемы машиностроения*, №5, С. 42-45, ISSN: 0131-2928 (Print).

350.Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2013). Устройство сжатия сварочных роликов для электроконтактной наплавки. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1 (30), С. 143-148, ISSN: 1993-8322 (Print).

351.Бережная, Е.В., Кассов, В.Д., Чепель, Ю.А. (2014). Структура системы управления микроконтроллером электроконтактной наплавки. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №1 (13E), С.16-21, ISSN: 2219-7869 (Online).

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(13%D0%95\)_2014/nomer_1\(13E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(13%D0%95)_2014/nomer_1(13E)_2014.html).

352.Амосов, Н.М. (1991). *Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы*. К.: Наук. думка, 268 с.

353.Анхимюк, В.Л., Опейко, О.Ф., Михеев, Н.Н. (2002). *Теория автоматического управления*. Мн.: Дизайн ПРО, 352 с.

354.Подкучаев, В.А. (2004). *Теория автоматического управления (аналитические методы)*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 392 с.

355.Бережна, О.В., Разживін, О.В. (2016). Розробка бази даних автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наплавлення деталей машин. *Проблеми та перспективи розвитку науки і техніки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро)*, С. 53.

356.Адлер, Ю.П., Маркова, Е.В., Грановский, Ю.В. (1976). *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. М.: Наука, 279 с.

357. Корн, Г., Корн, Т. (1984). *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 832 с.

358. Разживин, А.В., Сагайда, И.М. (2000). Информационное обеспечение системы автоматического управления дуговой сталеплавильной печью по температуре металла. *Вісник Східноукраїнського державного університету імені Володимира Даля*, № 3(25), С. 215-220.

359. Горбань, А.Н., Россиев, Д.А. (1996). *Нейронные сети на персональном компьютере*. Новосибирск: Наука, 256 с.

360. Горбань, А.Н., Макаров, С.В., Россиев, А.А. (1998). Итерационный метод главных компонент для таблиц с пробелами. *Третий сибирский Конгресс по прикладной и индустриальной математике (Новосибирск)*, С. 74.

361. Горбань, А.Н., Макаров, С.В., Россиев, А.А. (1998). Нейронный конвейер для восстановления пробелов в таблицах и построения регрессии по малым выборкам с неполными данными. *Математика, компьютер, образование: Международная конференция (Дубна)*, С. 53.

362. Berezshnaya, Olena, Razzhivin, Aleksey, Zubenko, Ekaterina (2016). Synthesis of Neural Network Regulator for Electrocontact Surfacing on the Basis of Fuzzy Control Module. *Proceedings of the International Symposium on Embedded Systems and Trends in Teaching Engineering: TEMPUS (Nitra)*, PP.189-194, ISBN: 978-80-558-1041-6.

363. Круглов, В.В., Дли, М.И., Голунова, Р.Ю. (2001). *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети*. М.: Физматлит, 224 с.

364. Рутковская, Д., Пилинський, М., Рутковский, Л. (2006). *Нечеткие сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*. М.: Горячая линия – Телеком, 452 с.

365. Разживин, А.В., Бережная, Е.В. (2014). Система автоматизации процесса управления тепловым режимом электроконтактной наплавки. *Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Международная научно-техническая конференция (Вологда)*, С. 174-176.

366.Осовский, С. (2002) *Нейронные сети для обработки информации*. М.: Финансы и статистика, 344 с.

367.Штовба, С.Д. (2007). *Проектирование нечетких систем средствами MATLAB*. М.: Горячая линия – Телеком, 288 с.

368.Бережная, Е.В., Разживин, А.В. (2014). Построение интеллектуальной системы управления процессом электроконтактной наплавки. *Актуальные проблемы в машиностроении*, №1, С.49-55, ISSN: 2313-1020 (Print).

369.Медведев, В.С., Потемкин, В.Г. (2002). *Нейронные сети MATLAB 6*. М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 496 с.

370.Ануфриев, И.Е., Смирнов, А.Б., Смирнова, Е.Н. (2005). *MATLAB 7*. СПб.: БХВ – Петербург, 1104 с.

ДОДАТОК А

**Лістинг програми для розрахунку енергосилових
параметрів режиму електроконтактного наварювання**

```

unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, Mask, Grids, TeEngine, Series, TeeProcs,
  Chart;
type
  TForm1 = class(TForm)
    pnl1: TPanel;
    pnl2: TPanel;
    pnl3: TPanel;
    bbRun: TButton;
    edtRb1: TEdit;
    edtRb2: TEdit;
    edtH0: TEdit;
    pnl4: TPanel;
    mmo1: TMemo;
    Edit1: TEdit;
    Label1: TLabel;
    mmo2: TMemo;
    mmo3: TMemo;
    procedure bbRunClick(Sender: TObject);

    private
      { Private declarations }
    public
      { Public declarations }
    end;

var
  Form1: TForm1;
  Lpl,dx,hn2,lcm,xi1,xi2,hxi1,hxi2,lcm2:Currency;
  Exi1,Exi2,Kxi1,Kxi2,Gxi1,Pxi1,txi2,txi1:Currency;
  mx1i1,mx1i2,mx2i2,mx2i1,Pxi2,Gxi2,P,M1,M2:Currency;
  h0,h1,Rb1,Rb2,e,h0n,h0k,Ixi1,I1,S1,hxi1j,hxi2j,Q,Rfull,Rk,Rij:Currency;
  i,j:Integer;
  si,sPxi2,sGxi2,stxi2,stxi1,sP,sM1,sM2,sh0,sh1,sI1,se,slcm,sTij,sj,sdTij,sRfull,sRk, stj:string;
  r,Bi,Fo,Pd,yj,tj,dy,Tij,dTij:Currency;
  const
    n=40;ah=2;Kv=1.015;am1=0.5;am2=0.5;G0=0;b=5;
    m01=0.35;m02=0.35;a1=0.124;a2=0.052;a3=-3.70;Gto=60.1;
    Lambda=0.26;cg=4.5;r=0.12;timpuls=0.04;hprop=0.05; V=1;
    Gsc=1450;n1=0.25;n2=0.14;n3=0.3;
    en=0.1;ek=0.6; T0=40; po20=0.6; alphaR=0.003;
    a=0.0025; g=370;
    alpha=10; lambda=17;
    dt=0.01; cg=4.5;

implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.bbRunClick(Sender: TObject);
begin

```

```

Rb1:=StrToFloat(edtRb1.Text);
Rb2:=StrToFloat(edtRb2.Text);
h0n:=StrToFloat(edtH0.Text);
h0k:=StrToFloat(Edit1.Text);

h0:=h0n;
while (h0<=h0k) do
begin
e:=en;
while (e<=ek) do
begin
P:=0;
I1:=0;
M1:=0;
M2:=0;
h1:=h0*(1-e);
Lpl:=sqrt(abs(2*Rb1*(Rb2*(h0-h1)/(Rb1+Rb2))-(sqr(abs(h0-h1)/4))));
dx:=Lpl/n;
Gxi2:=0.01;
Sl:=0.001;
lcm:=Sl*Lpl;
while (Gxi2>0) and (lcm<Lpl) do
begin
for i:=1 to n do
begin
xi1:=Lpl-dx*(i-1);
xi2:=xi1-dx;
hxi1:=h1+(h0-h1)*(exp(ah*ln(xi1/Lpl)));
hxi2:=h1+(h0-h1)*(exp(ah*ln(abs(((xi2)/Lpl)))));
Exi1:=(h0-hxi1)/h0;
Exi2:=(h0-hxi2)/h0;
Kxi1:=1.115*(Gto+a1*Exi1+a2*Exi1*Exi1+a3*Exi1*Exi1*Exi1);
Kxi2:=1.115*(Gto+a1*Exi2+a2*Exi2*Exi2+a3*Exi2*Exi2*Exi2);
if i=1 then
begin
Gxi1:=G0;
Pxi1:=0
end
else
begin
Gxi1:=Gxi2;
Pxi1:=Kxi1+Gxi1
end;
lcm2:=Lpl*sqrt(h1*(Kv-1)/(h0-h1)+Kv*(lcm/Lpl)*(lcm/Lpl));
mx1i1:=m01*(exp(am1*ln(xi1/Lpl)));
mx1i2:=m02*(exp(am1*ln(abs(((xi2)/Lpl)))));
if (lcm<xi1) and (Lpl>xi1) and (xi2<>lcm) then
begin
mx2i2:=m02*(exp(am2*ln(abs(((Abs(xi2-lcm2))/(Lpl-lcm2))))));
mx2i1:=m02*(exp(am2*ln((Abs(xi1-lcm))/(Lpl-lcm))))
end
else

```

```

if (0<xi2) and (xi2<lcm) and (xi2<>lcm) and (lcm<>xi1) then
begin
mx2i2:=-m02*(exp(am2*ln(abs(((Abs(lcm2-xi2))/lcm2)))));
mx2i1:=-m02*(exp(am2*ln(abs(((Abs(lcm-xi1))/lcm)))));
end;
else
begin
mx2i2:=m02*(exp(am2*ln(abs(((Abs(xi2-lcm2))/(Lpl-lcm2))))));
mx2i1:=m02*(exp(am2*ln(abs(((Abs(xi1-lcm))/(Abs(Lpl-lcm))))));
end;
Pxi2:=(2*(Gxi1*hxi1+Kxi1*hxi2)-Pxi1*(hxi1-
hxi2)+dx*(Kxi1*(mx1i1+mx1i2)+Kxi2*(mx2i1+mx2i2)))/(hxi1+hxi2);
Gxi2:=Pxi2-Kxi2;

end;
lcm:=lcm+0.001;
end;
if Gxi2<=0 then
begin
for i:=1 to n do
begin
xi1:=Lpl-dx*(i-1);
xi2:=xi1-dx;
hxi1:=h1+(h0-h1)*(exp(ah*ln(xi1/Lpl)));
hxi2:=h1+(h0-h1)*(exp(ah*ln(abs(((xi2)/Lpl)))));
Exi1:=(h0-hxi1)/h0;
Exi2:=(h0-hxi2)/h0;
Kxi1:=1.115*(Gto+a1*Exi1+a2*Exi1*Exi1+a3*Exi1*Exi1*Exi1);
Kxi2:=1.115*(Gto+a1*Exi2+a2*Exi2*Exi2+a3*Exi2*Exi2*Exi2);

if i=1 then
begin
Gxi1:=G0;
Pxi1:=0
end
else
begin
Gxi1:=Gxi2;
Pxi1:=Kxi1+Gxi1;
end;
lcm2:=Lpl*sqrt(h1*(Kv-1)/(h0-h1)+Kv*(lcm/Lpl)*(lcm/Lpl));
mx1i1:=m01*(exp(am1*ln(xi1/Lpl)));
mx1i2:=m02*(exp(am1*ln(abs(((xi2)/Lpl
if (lcm<xi1) and (Lpl>xi1) and (xi2<>lcm) then
begin
mx2i2:=m02*(exp(am2*ln(abs(((xi2-lcm2)/(Lpl-lcm2))))));
mx2i1:=m02*(exp(am2*ln(abs(((xi1-lcm)/(Lpl-lcm)))));
end
else
if (0<xi2) and (xi2<lcm) and (xi2<>lcm) and (lcm<>xi1) then
begin
mx2i2:=-m02*(exp(am2*ln(abs(((lcm2-xi2)/lcm2)))));

```

```

mx2i1:=-m02*(exp(am2*ln(abs(((lcm-xi1)/lcm))))))
end
else
begin
mx2i2:=m02*(exp(am2*ln(abs(((xi2-lcm2)/(Lpl-lcm2))))));
mx2i1:=m02*(exp(am2*ln((Abs(xi1-lcm))/(Abs(Lpl-lcm))))))
end;
Pxi2:=(2*(Gxi1*hxi1+Kxi1*hxi2)-Pxi1*(hxi1-
hxi2)+dx*(Kxi1*(mx1i1+mx1i2)+Kxi2*((mx2i1+mx2i2))))/(hxi1+hxi2);
Gxi2:=Pxi2-Kxi2;
txi2:=Pxi2*mx2i2;
txi1:=Pxi2*mx2i1;
P:=P+b*((dx/2)*(Pxi1+Pxi2));
M1:=M1+(b*Rb1*((dx/2)*(Pxi1*mx1i1+Pxi2*mx1i2)));
M2:=M2+(b*Rb2*((dx/2)*(Pxi1*mx2i1+Pxi2*mx2i2)));

Str(Pxi2:5:2,sPxi2);
Str(i:2,si);
Str(Gxi2:5:2,sGxi2);
Str(e:3:2,se);
Str(h0:4:2,sh0);
Str(lcm:5:2,slcm);
Str(txi2:5:2,stxi2);
Str(txi1:5:5,stxi1);
mmo2.Lines.Add(' i=' +si + ' Gxi2=' +sGxi2 + ' txi2=' +stxi2 + ' txi1=' +stxi1);
r:=hxi1/2;
Bi:=alpha*r/lambda;
Pd:=g*r*r/a;
dy:=r/20;
Rk:=0;
begin
for j:=1 to 20 do
begin
if j=1 then
begin
yj:=0;
tj:=0;
Fo:=a*tj/(r*r);
Tij:=Pd*(Fo-0.5*(1+2/Bi-yj*yj/(r*r)))+(1/Bi)*cos((Sqrt(Bi*yj/r))*exp(Bi*Fo));
dTij:=Tij;
Rij:=(yj/(xi1*yj))*(po20*(1+alphaR*(Tij-20)));
end
else
begin
yj:=yj+dy;
tj:=tj+dt;
Fo:=a*tj/(r*r);
Tij:=Pd*(Fo-0.5*(2/Bi-yj*yj/(r*r)))+(1/Bi)*cos((Sqrt(Bi*yj/r))*exp(Bi*Fo));
dTij:=Tij-alpha*T0;
Rij:=(yj/(xi1*yj))*(po20*(1+alphaR*(Tij-20)));
end;
if j=20 then

```

```

begin
Tij:=(Pd*(Fo-0.5*(2/Bi-yj*yj/(r*r)))+(1/Bi)*cos((Sqrt(Bi*yj/r))*exp(Bi*Fo)));
I1:=(sqrt((Tij*3.14*3.14*xi1*xi1*lambda*cg)/(r*hprop*timpuls)));
Rij:=(yj/(xi1*yj))*(po20*(1+alphaR*(Tij-20)));
end;
Rk:=(2*hxi1/(Abs(xi1*yj)))*(1/(Abs(Rk+Rij)));
Str(j:2,sj);
Str(i:2,si);
Str(Tij:5:2,sTij);
Str(dTij:5:2,sdTij);
Str(Rk:5:2,sRk);
mmo1.Lines.Add('i=' +si + ' j=' +sj + ' Tij=' +sTij);
mmo3.Lines.Add('i=' +si + ' j=' +sj + ' dTij=' +sdTij);
mmo3.Lines.Add('i=' +si + ' Rk=' +sRk);
end;
end;
mmo2.Lines.Add(' e=' +se + ' h0=' +sh0);
mmo2.Lines.Add(' ');
Rfull:=(2/(xi1+0.01))*(1/(Rk+Rk));
Str(I1:10:3,sI1);
Str(h1:4:2,sh1);
Str(P:5:2,sP);
Str(M1:5:2,sM1);
Str(M2:5:2,sM2);
Str(Rfull:5:2,sRfull);
Str(tj:5:2, stj);
mmo2.Lines.Add(' P=' +sP + ' h0=' +sh0 + ' h1=' +sh1 + ' I1=' +sI1
+' Rfull=' +sRfull + ' e=' +se + ' tj=' +stj);
mmo2.Lines.Add(' P=' +sP + ' M1=' +sM1 + ' M2=' +sM2);
mmo2.Lines.Add(' ');
mmo2.Lines.Add(sh1);
end;
e:=e+0.1;
end;
h0:=h0+0.1;
end;
end;
end.

```

ДОДАТОК Б

**Довідка про використання результатів роботи у
комплексі науково-дослідницьких робіт спільно з
ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод»**

Довідка

про дольову участь кандидата технічних наук Бережної Олени Валеріївни в економічному ефекті, який одержано при використанні результатів комплексу науково-дослідницьких робіт у галузі удосконалення технологій та обладнання для виробництва листів та смуг, виконаних спільно з ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод»

Результати дисертаційної роботи Бережної Олени Валеріївни на тему «Розвиток наукових і технологічних основ підвищення ефективності та якості зносостійкого електроконтактного наварювання», представленої на здобуття вченого ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології, а саме числова математична модель напружено-деформованого стану функціонального покриття при електроконтактному наварюванні стрічками з використанням методів прокатки та програмні засоби з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу використано у рамках комплексу науково-дослідницьких робіт з удосконалення технологій та обладнання на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод».

Загальний економічний ефект при виконанні даного комплексу науково-дослідницьких робіт за рахунок зниження трудомісткості проектно-конструкторських та проектно-технічних робіт, а також за рахунок підвищення якості та збільшення виходу металопродукції склав 18 800 000 (вісімнадцять мільйонів вісімдесят тисяч) гривень (за рівнем цін кінця 2012р.).

Дольова участь кандидата технічних наук Бережної Олени Валеріївни при виконанні даних робіт у якості виконавця склала 4%, що відповідає економічному ефекту від впровадження результатів її дисертаційної роботи, представленої на здобуття вченого ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології, в обсязі 752 000 (сімсот п'ятдесят дві тисячі) гривень (за рівнем цін кінця 2012р.).

Науковий керівник комплексу
науково-дослідницьких робіт
з удосконалення технологій
та обладнання для виробництва
листів та смуг, виконаних спільно
з ПрАТ «НКМЗ»,
завідувач кафедри АММО,
кандидат технічних наук, професор



В.А. Федорінов

Підпис професора Федорінова В.А. завіряю:
проректор з наукової роботи,
управління розвитком
та міжнародних зв'язків ДДМА,
доктор хімічних наук, професор




М.А. Турчанін

ДОДАТОК В

**Акт впровадження у «Науково-дослідному і
проектно-технологічному інституті машинобудування»**

СОГЛАСОВАНО

Проректор по научной работе
и внешним связям
Донбасской государственной
машиностроительной академии



профессор И.С. Алиев

г. Краматорск

13.09.12 г.

УТВЕРЖДАЮ

Председатель правления
«Научно-исследовательский и
проектно-технологический
институт машиностроения»



В.В. Тимченко

г. Краматорск

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Основные результаты, полученные Бережной Е.В. в рамках ее докторской диссертационной работы, включающие в себя практические рекомендации по управлению процессом электроконтактной наплавки по разработанному алгоритму, были использованы в «Научно-исследовательском и проектно-технологическом институте машиностроения» при проектировании технологии и оборудования для восстановления деталей, работающих в условиях интенсивного износа. Это позволило повысить эффективность выполняемых работ, обеспечить оптимальные сварочно-технологические характеристики и качество наплавленного металла за счет корректировки параметров процесса в реальном времени.

Экономический эффект составил 256 тыс. грн.

Результаты работы могут быть рекомендованы для широкого промышленного внедрения на ремонтных предприятиях.

от ДГМА:

Доктор техн. наук



В.В. Чигарев

Кандидат техн. наук



Е.В. Бережная

От «НИИПТМаш»

Главный инженер проекта

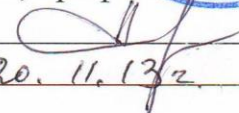
В.И. Ромашов

ДОДАТОК Г

**Акт використання в Донецькому фізико-технічному
інституті ім. А. А. Галкіна НАН України**

Утверждаю:

Проректор по научной работе и
внешним связям
Донбасской государственной
машиностроительной академии
д.т.н., проф. Алиев И.С.


20. 11. 2015



Утверждаю:

Директор
Донецкого физико-технического
института им. А.А. Галкина
НАН Украины
член-корр. НАН Украины Варюхин В.Н.


18. 11. 2015



АКТ

использования результатов диссертационной работы к.т.н. Бережной Е.В.

Комиссия в составе представителей Донбасской государственной
машиностроительной академии:

д.т.н., проф. Кассов В.Д.

к.т.н., ст.преп. Бережная Е.В.

и представителей Донецкого физико-технического института НАН Украины:

главн.н.с., д.т.н., проф. Бейгельзимер Я.Е.

м.н.с., к.т.н. Сынков А.С.

составила данный акт о том, что в результате исследований проведенных в
рамках договора о партнерстве, сотрудничестве и научном обмене между
Донбасской государственной машиностроительной академией и Донецкого
физико-технического института им. А.А. Галкина НАН Украины № ТС-06-04
(30.01.04-30.01.2014) установлено, что покрытие, нанесенное по методике,
разработанной к.т.н. Бережной Е.В., увеличивает стойкость по истиранию
матриц для винтовой экструзии на 37% по сравнению с матрицами,
подготовленными по технологическому регламенту ДонФТИ.

От Донбасской государственной
машиностроительной академии

д.т.н., проф.

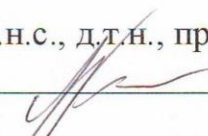

Кассов В.Д.

к.т.н., ст.преп.


Бережная Е.В.

От Донецкого физико-технического
института им. А.А. Галкина
НАН Украины

гл.н.с., д.т.н., проф.


Бейгельзимер Я.Е.

м.н.с., к.т.н.


Сынков А.С.

ДОДАТОК Д**Акт впровадження у фермерському господарстві**

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной работе
и внешнеэкономическим связям
Донбасской государственной
машиностроительной академии
проф.

 И.С. Алиев

г. Краматорск

6.06.13г.

УТВЕРЖДАЮ:

председатель фермерского
хозяйства «Діхтер»

 Дихтенко Р.Н.
с Андреевка



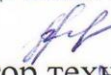
АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что в ходе полевых испытаний в составе 4-х пахотных агрегатов лемехов тракторных плугов, упрочненных электроконтактным методом (разработчик технологического процесса канд. техн. наук Бережная Елена Валерьевна), установлено, что их стойкость, измеряемая наработкой до предельного затупления, в среднем на 15-20 Га выше, по сравнению с лемехами в заводском исполнении. В течение всего срока эксплуатации при проведении отвальной вспашки упрочненные лемеха выполняли технологическую операцию пахоты с достаточно высокими качественными агротехническими показателями (снижение заглубления лемехов, ухудшение крошения почвы не наблюдалось). При этом устранены простои и потери времени на регулировки (наблюдаемые при эксплуатации затупившихся лемехов), устранены расходы на ремонт, повысились сроки службы и, соответственно, уменьшился расход запасных режущих рабочих органов.

Разработанный технологический процесс упрочнения лемехов целесообразно рекомендовать для увеличения ресурса работы широкой номенклатуры режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин, работающих в условиях интенсивного абразивного износа: лапы культиваторов, дисковые фрезы и т.д.

**От Донбасской государственной
машиностроительной академии:**

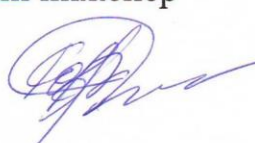
Канд. техн. наук

 Бережная Е.В.
Доктор техн. наук, проф.

 Кассов В.Д.

**От фермерского хозяйства
«Діхтер»:**

Главный инженер


 Коваль Р.Н.

ДОДАТОК Е**Акт впровадження у науково-виробничій компанії****«Регіон Інноватика Еніон – Балтика»**

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной работе
и внешним связям
Донбасской государственной
машиностроительной академии




г. Краматорск

д.т.н., профессор И.С. Алиев

15.05.14г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО "НПК" "Регион
Инноватика Энион-Балтика"



г. Донецьк

к.т.н. А.В. Кучеров

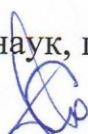
АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что на производственных площадях научно-производственной компании "Регион Инноватика Энион-Балтика" внедрена технология электроконтактной наплавки для восстановления стальных и чугунных деталей различной конфигурации, работающих в условиях трения скольжения и смазки а также неподвижных посадок, с локальным подплавлением соединяемых металлов в зоне их контакта (исполнители Бережная Е.В., Чепель Ю.А.). Оптимизированы режимы электроконтактной наплавки в диапазоне диаметров восстанавливаемых деталей, позволяющие формировать покрытие с требуемыми свойствами, адаптированное для дальнейшего применения триботехнических составов (ТС) торговой марки (НИОД) с целью увеличения межремонтного ресурса.

Получен экономический эффект в размере 117 тыс. грн. за счет снижения расхода металла и энергозатрат.

*от Донбасской
государственной
машиностроительной академии:*

Доктор техн. наук, профессор



В.Д. Кассов

Кандидат техн. наук



Е.В. Бережная

Ассистент



Ю.А. Чепель

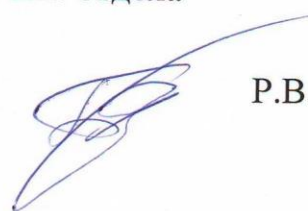
*от научно-производственной
компании "Регион Инноватика
Энион-Балтика":*

Главный технолог



С.В. Головченко

Начальник тех. отдела



Р.В. Буцкий

ДОДАТОК Є

**Акт впровадження у Державному підприємстві
«Український науково-технічний центр металургійної
промисловості «Енергосталь» Міністерства промислової
політики України**

А К Т

внедрения в промышленность результатов докторской
диссертационной работы Бережной Елены Валерьевны

Мы, представители Государственного предприятия «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», г. Харьков) Министерства промышленной политики Украины, настоящим актом подтверждаем, что результаты докторской диссертационной работы Бережной Елены Валерьевны, а именно:

- комплекс математических моделей и соответствующих им программных средств по автоматизированному расчету процесса формирования нанесенного слоя электроконтактным методом компактными материалами (проводами, лентами);
- практические рекомендации, обеспечивающие получение стабильно высокого качества наносимого слоя с требуемыми показателями механических характеристик,

использованы в ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» при проектировании технологии и оборудования для упрочнения и восстановления рабочего инструмента и отдельных деталей прокатных станов (валков рабочих клетей, роликов правильных машин, привалковой арматуры и др.) на специализированных участках подготовки производства, что позволяет улучшить технико-экономические показатели работы новых и реконструкции действующих прокатных станов, экономить материальные ресурсы, снизить себестоимость и обеспечить и высокое качество готовой продукции.

Зам. генерального директора
ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»
директор НИИ «УкрНТЦ «Энергосталь»
кандидат технических наук



Главный научный сотрудник
доктор технических наук

А.С. Рудюк

В.С. Медведев

16.10.14

ДОДАТОК Ж
Акт впровадження на
ПАТ «Завод напівпровідників»

ДОДАТОК 3
Акт впровадження на
ЗАТ «Краматорський завод металокопструкцій»



м. Краматорськ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ПрАТ «Краматорський завод металокопструкцій»

 В.А. Шевченко

28.11.16р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складено в тому, що в період з березня 2016 р. по листопад 2016р. на Краматорському заводі металокопструкцій пройшла виробничі випробування та впроваджена технологія відновлення місць посадок та шийок валів з копструкційних вуглецевих сталей малого діаметру (до 120 мм), що працюють в умовах циклічного навантаження, яка дозволяє формувати необхідну копструктуру покриття. Виробничі випробування показали високу міцність з'єднання шару, що приварюється (відсутні відшарування покриття в процесі експлуатації наплавлених деталей), без збільшення кількості введеної теплової енергії при мінімізації термічного впливу на деталі. Одержано економічний ефект у розмірі 750,4 тис. грн. (у цінах 2016р.) за рахунок збільшення продуктивності праці, зниження витрат металу та енергозатрат. За згодою розробника одержаний економічний ефект використано для розширення сортаменту відновлюваних деталей.

Від НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»: кандидат технічних наук



О. В. Бережна

Від ПрАТ «Краматорський завод металокопструкцій»: заступник директора з підготовки виробництва, кандидат технічних наук

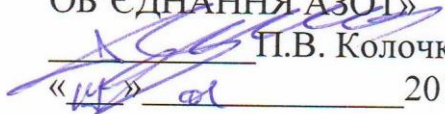



 О. В. Шевченко

ДОДАТОК И
Акт впровадження на
ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

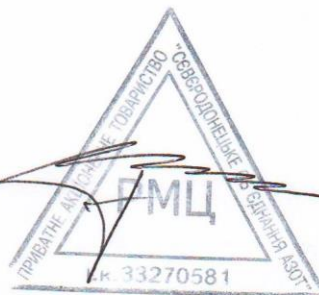
Начальник
ремонтно-механічного цеху
ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ
ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»


П.В. Колочко
«14»  2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Акт складено в тому, що в період з жовтня 2016 р. по лютий 2017 р. на ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ» пройшла виробничі випробування та впроваджена комбінована технологія відновлення деталей ґрунтообробних машин композиційними матеріалами. Економічний ефект склав 160 тис. грн. за рахунок підвищення ефективності ремонтних заходів, якості поверхневого шару відновлених деталей та продуктивності праці. Результати роботи можна рекомендувати для широкого застосування на промислових підприємствах України, що займаються ремонтом та зміцненням деталей.

Заступник начальника
ремонтно-механічного цеху



О.В. Беліцький

Підписи начальника РМЦ Колочко П.В. та заступника начальника РМЦ Беліцького О.В. засвідчую:

В.О. директора департаменту
з управління персоналом
і соціальним питанням
ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ
ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»



В.Н. Соломаха

ДОДАТОК І

Акти використання за госпдоговорами

УТВЕРЖДАЮ
 проректор по научной работе
 и внешним связям
 Донбасской государственной
 машиностроительной академии
 проф. И.С. Алиев



г. Краматорск

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты докторской диссертационной работы Бережной Елены Валерьевны, а именно типовые технологические процессы, которые обеспечивают увеличение ресурса деталей, работающих в подвижных и неподвижных соединениях механизмов, были использованы испытательной лабораторией технической диагностики Донбасской государственной машиностроительной академии при разработке технических предложений для ремонта дефектов, выявленных при экспертном обследовании рудно-грейферных перегружателей цеха №1 рег.№3467 и рег.№3875 по хоздоговорам №У-13-2012 от 23.02.12г. и №У-12-2013/4600006706 от 29.03.13г. с ПАО «Крымский содовый завод».

Это позволило повысить качество ремонтных работ.

Зав. лаборатории
 технической диагностики

В.П. Шепотько

УТВЕРЖДАЮ
 проректор по научной работе
 и внешним связям
 Донбасской государственной
 машиностроительной академии
 проф. И.С. Алиев



г. Краматорск

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

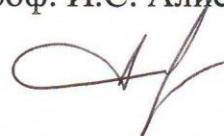
Результаты докторской диссертационной работы Бережной Елены Валерьевны, а именно технологические рекомендации, позволяющие управлять качеством зоны сплавления покрытия с деталью и самого покрытия при восстановлении изношенных поверхностей электроконтактной наплавкой, были использованы испытательной лабораторией технической диагностики Донбасской государственной машиностроительной академии при разработке технических предложений для ремонта дефектов, выявленных при экспертно-техническом диагностировании грузоподъемных объектов: кранов, управляемых с пола (в количестве 14 шт.), подъемников (АГП 22 рег. №Д-0239/ВП; ВС22 рег. № Д-0238/ВП), автокрана (рег. №91557), мостового крана грузоподъемностью 15/33т (рег. №41760) по хоздоговору №У-06-2012 от 12.01.12г. с ПАО Снежнянский машиностроительный завод «Мотор-Сич», что позволило увеличить межремонтный срок службы на 20% и снизить затраты на приобретение запасных частей в 1,5 раза.

Зав. лаборатории
 технической диагностики

В.П. Шепотько

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе
и внешним связям
Донбасской государственной
машиностроительной академии
проф. И.С. Алиев




г. Краматорск

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты докторской диссертационной работы Бережной Елены Валерьевны, а именно технологические рекомендации по подбору режимов электроконтактной наплавки и формирования слоя металлопокрытия с заданными служебными свойствами были использованы лабораторией технической диагностики Донбасской государственной машиностроительной академии при экспертном обследовании технического состояния грузоподъемного оборудования: рудно-грейферных перегружателей фирмы «ТАКРАФ» РГП-2 (рег.№77898 и рег.№718615), талей электрических (в количестве 21шт.) аглофабрики, цеха ремонта технологической оснастки №4, цеха подготовки производства, теплосилового цеха, доменного цеха по хоздоговорам №У-18-2012/2459 от 11.04.12г., №У-13-2013/1428 от 26.03.13г., №У-09-2013/1360 от 16.04.13г. с ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», что позволило снизить трудоемкость ремонтных работ.

Зав. лаборатории
технической диагностики



В.П. Шепотько

ДОДАТОК К**Акт впровадження у навчальний процес**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор, проректор
з науково-педагогічної, навчальної
та методичної роботи
Донбаської державної
машинобудівної академії



Фесенко А.М.

ДОВІДКА

Результати докторської дисертаційної роботи Бережної Олени Валеріївни на тему «Розвиток наукових і технологічних основ підвищення ефективності та якості зносостійкого електроконтактного наварювання», які пов'язані з моделюванням технологічних режимів електроконтактного наварювання та розробкою алгоритмів і програмного забезпечення для автоматизованого проектування параметрів електроконтактного наварювання, а також результати моделювання методом скінчених елементів напружено-деформованого стану електродного матеріалу у зоні приварювання, використано в учбовому процесі при викладанні розділів «Основи програмування. Розробка алгоритмів обчислювальних процесів» та «Застосування систем комп'ютерної математики для інженерних розрахунків. Програмування обчислювальних процесів у системах комп'ютерної математики» дисципліни «Інформатика» для студентів спеціальності 131 «Технологія та устаткування зварювання» для вирішення практичних задач формування шару металу при електроконтактному наварюванні та у курсовому і дипломному проектуванні й у науково-дослідній роботі студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» при визначенні способів подовження терміну експлуатації конструкцій та їх вузлів.

Завідувач кафедри
«Інформатика і інженерна графіка»
кандидат пед. наук, доцент

С.Л. Загребельний

Завідувач кафедри
«Підйомно-транспортні машини»
доктор техн. наук, професор

В.Д. Кассов

ДОДАТОК Л
Список публікацій здобувача

Список публікацій здобувача

1. Бережная, Е.В., Гавриш, П.А., Грибков, Э.П. (2016). *Нанесение защитных покрытий порошковыми материалами: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-730-4.

Дисертантом проведено математичне моделювання формування покриття методом електроконтактного зміцнення шару, нанесеного газотермічним напиленням.

2. Грибков, Э. П., Кассов, В. Д., Данилюк, В. А., Бережная, Е.В. (2013). *Численное математическое моделирование процессов прокатки порошковых лент: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-652-9.

Дисертантом проведено моделювання поведінки часток порошкового середовища в термодформаційному осередку при виготовленні порошкової стрічки

3. Berezshnaya, Olena V., Gribkov , Eduard P., Kuznetsov , Valeriy D. (2016). Investigation of Thermostressed State of Coating Formation at Electric Contact Surfacing of “Shaft” Type Parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 14 p, DOI: 10/1155/2016/6597317 [Web of Science, SCOPUS, Google Scholar] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель, що враховує розподіл теплових властивостей та геометричних параметрів вздовж термодформаційного осередку в процесі електроконтактного наварювання компактним матеріалом.

4. Бережная, Е.В. (2014). Управление качеством металлопокрытия при восстановлении деталей электроконтактной наплавкой. *Все материалы. Энциклопедический справочник: ежемесячный научно-технический производственный журнал*, №6, С.22-26, ISSN: 1994-6260 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

5. Кузнецов, В.Д., Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Повышение износостойкости деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Проблемы тертя та зношування*, №3 (72), С.34-40, ISSN: 0370-2197 (Print). [e-LIBRARY, EBSCO, Google Scholar, WorldCat] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено технологію підвищення зносостійкості деталей, відновлених методом електроконтактного наплавлення, за рахунок використання комплексної хіміко-термічної обробки електродного матеріалу.

6. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Грибкова, С.Н. (2016). Термонапряженное состояние износостойкого слоя при электроконтактной наплавке. *Вісник Приазовського державного технічного університету: збірник наукових праць*, Вип. 32, С.99-108, ISSN: 2225-6733 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено модель термонапруженого стану зносостійкого шару при електроконтактному наплавленні циліндричних деталей, встановлено вплив температури нагріву нанесеного матеріалу на розподіл напружень та деформацій вздовж термодформаційного осередку під час наплавлення.

7. Бережная, Е.В., Грибкова, С.Н. (2013). Математическое моделирование напряжений и деформаций при электроконтактной наплавке проволок цилиндрических деталей. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць*, № 1 (14), С. 206-213, ISSN: 2218-1806 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель процесу формозміни електродного матеріалу при електроконтактному наплавленні.

8. Чепель, Ю.А., Бережная, Е.В., Кассов, В.Д. (2013). Микропроцессорная система управления электроконтактной наплавкой двумя роликовыми электродами. *Проблемы машиностроения*, №5, С.42-45, ISSN: 0131-2928 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено мікропроцесорну систему керування електроконтактним наплавленням двома роликовими електродами.

9. Бережная, Е.В. (2017). Влияние структуры металлопокрытия на сопротивление развитию трещин. *Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університета*, Вип. 77, С.147-151, ISSN: 2219-5548 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

10. Бережная, Е.В. (2017). Выбор режима индукционного нагрева для нормализации наплавленных поверхностей цилиндрических деталей. *Вісник Приазовського*

державного технічного університету: збірник наукових праць, Вип. 34, С.115-123, ISSN: 2225-6733 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

11. Бережная, Е.В., Кузнецов, В.Д., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. (2017). Исследование микропластической деформации металла, наплавленного электроконтактным методом. *Автоматическая сварка*, №7, С.24-28, ISSN: 0005-111X (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

Дисертантом досліджено структурний фактор мікропластичності зразків, наплавлених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей.

12. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Цывинда, Н.И. (2014). Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса восстановления деталей землеройных машин методом электроконтактной наплавки. *Гірничий вісник: науково-технічний збірник*, Вип. 97, С.201-205, ISSN: 2306-5435 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання].

Дисертантом розроблено математичну модель, яка дозволяє визначити основні технологічні параметри процесу електроконтактного наплавлення циліндричних деталей.

13. Бережная, Е.В., Кассов, В.Д., Чепель, Ю.А. (2014). Структура системы управления микроконтроллером электроконтактной наплавки. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №1 (13E), С.16-21, ISSN: 2219-7869 (Online).

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(13%D0%95\)_2014/nomer_1\(13E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(13%D0%95)_2014/nomer_1(13E)_2014.html). [Фахове видання]

Дисертантом розроблено структуру системи керування силовою частиною обладнання для електроконтактного наплавлення.

14. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2014). Математическое моделирование формообразования слоя при электроконтактной наплавке проволокой деталей типа вал. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №6, Ч.2, С.93-96, ISSN: 1998-7927 (Print). [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель напружено-деформованого стану металу в термодформаційному осередку при електроконтактному наплавленні на основі методу полів ліній ковзання.

15. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гушин, А.М. (2014). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(32), С.6-9, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено машину тертя для дослідження триботехнічних параметрів матеріалів, що піддаються інтенсивному зношуванню.

16. Бережная, Е.В. (2011). Восстановление деталей станочного оборудования электроконтактной наплавкой порошковой проволокой. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць*, №29, С.175-179, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

17. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2012). Математическое моделирование напряжений и деформаций при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электроконтактной наплавки. *Обработка материалов давлением*, №1 (30), С.61-64, ISSN: 20762151 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом проведено вибір вихідних даних для математичного моделювання напружено-деформованого стану при виготовленні електродного матеріалу для електроконтактного наплавлення.

18. Грибков, Э.П., Данилюк, В.А., Бережная, Е.В. (2012). Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой электродной ленты. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №13 (184), Ч.1, С.74-79, ISSN: 1998-7927 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом визначено основні статистичні характеристики виготовлення електродного матеріалу для електроконтактного наварювання.

19. Бережная, Е.В. Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2012). Микроконтроллерная система мониторинга интенсивности износа наплавленного металла. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №2(27), С.141-144, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено мікроконтролерну систему моніторингу трибо-технічних параметрів наплавленого металу.

20. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Селедцов, А.С. (2012). Методика и оборудование для экспериментального определения исходных данных на проектирование процессов обработки давлением дискретных сред. *Обработка материалов давлением*, №3(32), С.137-141, ISSN: 2076-2151 (Print). [Фахове видання].

Дисертант прийняв участь у розробці методики визначення фізико-механічних властивостей дискретних середовищ при їх ущільненні.

21. Бережная, Е.В. (2012). Современные методы повышения износостойкости землеройной техники. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №3 (28), С.33-36, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

22. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А. (2012). Машина трения для испытания на износостойкость металла наплавки. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №31, С.112-117, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено машину тертя зворотно-поступового руху.

23. Сатонин, А.В., Кассов, В.Д., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2013). Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при электроконтактной наплавке лент с использованием процессов прокатки. *Обработка материалов давлением*, №1 (34), С.30-35, ISSN: 2076-2151 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено математичну модель електроконтактного наплавлення осесиметричних тіл обертання металевими стрічками.

24. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2013). Устройство сжатия сварочных роликов для электроконтактной наплавки. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1 (30), С.143-148, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено пристрій стискання роликів-електродів для електроконтактного наплавлення.

25. Турчанин, М.А., Бережная, Е.В., Малыгина, С.В. (2013). Технико-экономические преимущества электроконтактной наплавки режущего инструмента. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №32, С. 198-201, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом здійснено обґрунтування вибору методу відновлення деталей, що працюють в умовах зношування

26. Данилюк, В.А., Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Разумович, О.О. (2013). Совершенствование технологии изготовления порошковых проволок сложной конструкции для восстановления деталей технологического оборудования. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №33, С. 47-51, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено конструкцію електродного матеріалу для наварювання.

27. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2014). Электроконтактное упрочнение слоя, нанесенного газотермическим напылением. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць*, № 1, С.173-180, ISSN: 2218-1806 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель процесу електроконтактного зміцнення шару, нанесеного газотермічним напиленням.

28. Бережная, Е.В. Гущин, А.М., Турчанин, М.А. (2015). Гибкопереналаживаемый триботехнический комплекс для исследования износостойкости и долговечности наплавленных режущих элементов рабочих органов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(34), С. 10-13, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено принципову електрокінетичну схему триботехнічного комплексу для імітаційного моделювання процесу зношування.

29. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П., Кузнецов, В.Д. (2017). Численное математическое моделирование процесса консолидации порошковой среды электроконтактным методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, №6 (1228), С. 15-20, ISSN: 2222-0631 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом проведено дослідження впливу технологічних режимів електроконтактного наварювання на розподіл температурних полів у термомодеформацийному осередку.

30. Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Кассов, В.Д., Наливайко, О.М. Машина тертя зворотньо-поступального руху. Патент №85987 України на ко-

рисну модель. МПК G01N3/56(2006.01). №и 2013 06952. Заявл. 03.06.2013. Опубл. 10.12.2013. Бюл.№23. 4с.

31. Грибков, Е.П., Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Кассов В.Д. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84241 України на корисну модель. МПК В23К 35/40(2006.01). №и 2013 05779. Заявл. 07.05.2013. Опубл. 10.10.2013. Бюл.№ 19. 4с.

32. Грибков, Е.П., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Чепель, Ю.А. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84906 України на корисну модель. МПК В23К 35/40 (2006.01). №и 2013 03311. Заявл. 18.03.2013. Опубл. 11.11.2013. Бюл.№21. 4с.

33. Сатонин, О.В., Бережна, О.В., Малигіна, С.В. Спосіб електроконтактного наплавлення. Патент №88576 України на винахід. МПК В23К 35/00 (2006.01). №и 2013 10799. Заявл. 09.09.2013. Опубл. 25.03.2014. Бюл.№.6. 4с.

34. Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. Спосіб визначення зварюваності різнорідних металів. Патент №106718 України на корисну модель. МПК В23К 31/12 (2006.01). №и 2015 08944. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 10.05.2016. Бюл. №9. 4с.

35. Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Гушцін, А.М. Стенд для випробування на надійність ріжучих елементів машин. Патент №107668 України на корисну модель. МПК G01N 3/56 (2006.01). №и 2015 08938. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 24.06.2016. Бюл.№.12. 5с.

36. Бережна, О.В., Кузнецов, В.Д. Спосіб оцінювання міцності зчеплення зносостійкого шару, нанесеного електроконтактним методом. Патент №116024 України на корисну модель. МПК G01N 19/04 (2006.01). №и 2016 09945. Заявл. 28.09.2016. Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9. 4с.

37. Бережна, О.В., Лапченко, О.В., Кузнецов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №116099 України на корисну модель. МПК В23К 11/00, В22D 19/00, В22D 19/06 (2006.01). №и 2016 11237. Заявл. 07.11.2016. Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9. 3с.

38. Бережна, О.В., Грибков, Е.П., Кузнецов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №118044 України на корисну мо-

дель. МПК В23К 11/00, В22D 19/00, В22D 19/06 (2006.01). №и 2016 12406. Заявл. 06.12.2016. Оpubл. 25.07.2017. Бюл. №14. 4с.

39. Berezshnaya, O., Chepel, Ju., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2015). Development of welding equipment for the production of layered tapes. *Metallurgical and Mining Industry*, №12, pp.332-338, ISSN: 20760507 (Print)

Дисертантом розроблено технологію та обладнання для виготовлення багатошарової електродної стрічки для електроконтактного відновлення зношених деталей.

40. Berezshnaya, O., Kuznetsov, V., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2016). Determining of the structural schemes and performance of linear DC motor control system for welding equipment development in the layered tapes production. *Metallurgical and Mining Industry*, №1, pp.154-157, ISSN: 20760507 (Print)

Дисертантом розроблено конструктивні особливості обладнання для виготовлення багатошарових стрічок для електроконтактного наварювання

41. Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на физико-механические характеристики покрытия. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №38, С.125-131, ISSN: 2222-9000.

Дисертантом досліджено вплив комбінованої технології відновлення на фізичний стан шару, нанесеного електроконтактним методом.

42. Кассов, В.Д., Грибков, Э.П., Грибкова, С.Н., Бережная, Е.В. (2016). Конечно-элементное моделирование внедрения твердых частиц в оболочку при прокатке порошковых лент. *Обработка материалов давлением*, №2 (43), С.36-40, ISSN: 2076-2151 (Print).

Дисертантом проведено вибір вихідних даних для кінцево-елементного моделювання впровадження твердих часток при виготовленні порошкових стрічок.

43. Гавриш, П.А., Бережная, Е.В., Соболев-Бутовченко, Е.А. (2016). Газотермическое напыление антифрикционного покрытия деталей перегружателя TAKRAF. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №2 (20E), С. 49-54, ISSN: 2219-7869 (Online).

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(20%D0%95\)_2016/article/10.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(20%D0%95)_2016/article/10.pdf).

Дисертантом розроблено методику проведення експериментів.

44. Бережная, Е.В., Разживин, А.В. (2014). Построение интеллектуальной системы управления процессом электроконтактной наплавки. *Актуальные проблемы в машиностроении: Международная научно-практическая конференция (Новосибирск)*, №1, С.49-55, ISSN: 2313-1020 (Print). [e-LIBRARY].

Дисертантом розроблено інтелектуальну систему керування процесом електроконтактного наплавлення з послідовним увімкненням програмного та нейронного регуляторів.

45. Бережная, Е.В. (2017). Технологические особенности термообработки деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Актуальные проблемы в машиностроении: Международная научно-практическая конференция (Новосибирск)*, №1, С.126-131, ISSN: 2313-1020. [e-LIBRARY].

46. Berezshnaya, Olena, Razzhivin, Aleksey, Zubenko, Ekaterina (2016). Synthesis of Neural Network Regulator for Electrocontact Surfacing on the Basis of Fuzzy Control Module. *Proceedings of the International Symposium on Embedded Systems and Trends in Teaching Engineering: TEMPUS (Nitra)*, pp.189-194, ISBN: 978-80-558-1041-6.

Дисертантом розроблено методику синтезу регулятору електроконтактного наварювання та модуля нечіткого нейронного керування.

47. Бережная, Е.В. (2011). Перспективные направления снижения затрат на восстановление деталей подъемно-транспортного оборудования, работающих в условиях абразивного износа. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.16, ISBN: 978-966-379-640-6.

48. Бережная, Е.В. (2011). Энерго- и ресурсосберегающая технология восстановления изношенных деталей дорожно-строительной техники. *Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: 3-я міжвузівська науково-технічна конференція (Донецьк)*, С.61-63.

49. Бережная, Е.В. (2012). Стабилизация процесса электроконтактной наплавки режущего инструмента. Важке машинобудування. *Проблеми та перспективи розвитку: X Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 13, ISBN: 978-966-379-640-6.

50. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гушин, В.М. (2012). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: 4-а міжвузівська науково-технічна конференція (Донецьк)*, С.120.

Дисертантом здійснено постановку наукового завдання дослідження, вибір наукового підходу до його розв'язання.

51. Бережная, Е.В. (2013). К расчету температурного поля при электроконтактной наплавке многослойных покрытий. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: IV Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 31, ISBN: 978-966-379-647-5.

52. Разживин, А.В., Бережная, Е.В. (2014). Система автоматизации процесса управления тепловым режимом электроконтактной наплавки. *Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Международная научно-техническая конференция (Вологда)*, С. 174-176, ISBN: 978-5-87851-522-1.

Дисертантом здійснено обґрунтування вибору системи автоматизованого керування процесом електроконтактного наплавлення.

53. Бережная, Е.В. (2015). Тепловые процессы при консолидации порошковой среды электроконтактным способом. Важке машинобудування. *Проблеми та перспективи розвитку: XIII міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 14, ISBN: 978-966-379-640-6.

54. Бережная, Е.В. (2015). Повышение ресурса работы технологического оборудования литейных цехов комбинированной обработкой. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: V Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 30-32, ISBN: 978-966-379-647-5.

55. Бережна, О.В., Разживін, О.В. (2016). Розробка бази даних автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наплавлення деталей машин. *Проблеми та перспективи розвитку науки і техніки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро)*, С. 53.

Дисертантом розроблено базу даних автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наплавлення та проведено перевірку її інформативності.

56. Бережная, Е. В. (2016). Стойкость восстановленных валов, работающих в условиях циклического нагружения. *Университетская наука – 2016: Международная научно-техническая конференция (Мариуполь)*, Т. 2, С. 130–131.

57. Бережная, Е.В. (2016). Выбор режима нагрева наплавленной цилиндрической детали токами высокой частоты. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XIV Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.14, ISBN: 978-966-379-640-6.

58. Бережная, Е.В. (2017). Моделирование теплового состояния композиционного материала при электроконтактной наплавке. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VII Міжнародна науково-практична конференція (Чернігів)*, С. 61-63.

59. Бережная, Е.В. (2017). Термічна обробка відновлених електроконтактним методом циліндричних деталей. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: VI Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.18, ISBN: 978-966-379-647-5.

60. Бережная, Е.В. (2017). Повышение надежности деталей методом комбинированной обработки поверхности. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро)*, Ч. 2, С. 282-284.