НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

КАФЕДРА ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН ТА ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій ПИСКУНОВ
«___»_____2022 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Динаміка і міцність машин»

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Дослідження накопичення втомних пошкоджень у зварних з'єднаннях при багатоступеневому та блочному навантаженнях»

Виконав:
студент VI курсу, групи МП-11мп
Романюк Антон Миколайович _____

Керівник:
д.т.н., проф.
Боронко Олег Олександрович _____

Рецензент:
д.т.н., проф.
Данильченко Юрій Михайлович _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Динаміка і міцність машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Сергій ПИСКУНОВ
«___»_____2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Романюк Антон Миколайович

1. Тема дисертації «Дослідження накопичення втомних пошкоджень у зварних з'єднаннях при багатоступеневому та блочному навантаженнях», науковий керівник дисертації Боронко Олег Олександрович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від 04.11.2022 р. № 4055-с

2. Термін подання студентом дисертації: 06.12.2022 р.

3. Об'єкт дослідження: накопичення втомних пошкоджень з'єднань сплаву 09Г2С, отриманих зварюванням.

4. Предмет дослідження: закономірності опору руйнуванню при багатоступеневому та блочному навантаженнях.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1) Огляд сучасного стану проблеми отримання таврових зварних з'єднань.
2) Структурний аналіз основного металу та матеріалу шва зварного з'єднання сплаву 09Г2С.
3) Визначеня механічних характеристик при статичному навантаженні зварних з'єднаня для сплаву 09Г2С.

4) Встановлення закономірностей накопичення втомних пошкоджень у зварних з'єднаннях при багатоступеневому та блочному навантаженнях.
5) Розробка стартап–проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу – 6 і більше.

7. Орієнтовний перелік публікацій – немає.

8. Дата видачі завдання: 01.09.2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури	01.09.22 – 20.10.22	
2	Структурний аналіз	21.10.22 – 31.10.22	
3	Механічні характеристики	01.11.22 – 05.11.22	
4	Вибір циклограм навантаження	06.11.22– 10.11.22	
5	Побудова кривих втоми	11.11.22 – 19.11.22	
6	Стартап-проект та висновки	20.11.22 – 06.12.22	

Студент _____ Антон РОМАНЮК
(підпис)

Науковий керівник _____ Олег БОРОНКО

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація містить 81 сторінка, 30 таблиць, 14 рисунків, список використаної літератури з 72 найменувань.

Актуальність роботи полягає в тому, що сталі та сплави які використовуються для виготовлення мостів, будівельних конструкцій, важкого залізничного транспорту експлуатуються в умовах знакозмінного навантаження, тому постає необхідність у вдосконаленні існуючих та створення нових методів з'єднання таких сплавів з визначенням відповідного опору циклічному навантаженню в залежності від умов експлуатації, а також пошук методів підвищення втомних характеристик такого типу з'єднань.

Метою магістерської дисертації є дослідження накопичення втомних пошкоджень у зварних з'єднаннях при багатоступеневому та блочному навантаженнях в заданих умовах близьких до експлуатаційних.

Як об'єкт випробувань було взято накопичення втомних пошкоджень з'єднань сплаву 09Г2С з тавровим поперечним з'єднанням, отриманих зварюванням.

Для вирішення задачі було визначено закономірності опору руйнуванню при статичному та циклічному навантаженні зварного з'єднання сталі 09Г2С; оптичним методом було проведено кількісну оцінку зміни в мікроструктурі матеріалу в зоні термічного впливу та зварному шві, а також досліджено тріщини, що виникають при циклічному навантаженні у заданому діапазоні частот.

Ключові слова: зварне з'єднання, багатоциклова втома, нерегулярне навантаження, сталі та сплави, циклічна довговічність, електронно-променеве зварювання.

ABSTRACT

The thesis contains 81 pages, 30 tables, 14 drawings, a list of used literature of 72 titles.

The urgency of the work is that fact that steels and alloys used for the manufacture of bridges, building structures, heavy railway transport are operated under conditions of variable load, therefore there is a need to improve the existing and create new methods of joining such alloys with the determination of the appropriate resistance to cyclic loading in depending on the operating conditions, as well as the search for methods of increasing the fatigue characteristics of this type of connections.

The aim of the thesis is to study the accumulation of fatigue damage in welded joints under multi-stage and block loads under given conditions close to operational ones.

The regularities of the master's thesis is to study the accumulation of fatigue damage in welded joints under multi-stage and block loads under given conditions close to operational ones. As an object of testing, the accumulation of fatigue damage of the joints of the 09G2C alloy with a T-shaped transverse joint, obtained by welding, was taken.

To solve the problem, the patterns of of resistance to fracture under static and cyclic loading of the welded joint of 09G2C steel were determined; a quantitative assessment of the change in the microstructure of the material in the heat-affected zone and the weld seam was carried out using an optical method, and cracks arising under cyclic loading in a given frequency range were also investigated.

Keywords: welded joint, high-cycle fatigue, variable amplitude loading, cyclic life, steel, alloys, electron-beam welding.

Зміст

ВСТУП 7

1 СУЧАСНИЙ СТАН СПРАВ У ВИЗНАЧЕННІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННІ 9

1.1 Загальні відомості про сплав 09Г2С сфери його використання в несучих конструкціях мостів 9

1.2 Визначення рівня втомного пошкодження зварних з'єднань 16

1.3 Розрахунок кривих втоми зварних з'єднань металоконструкцій при експлуатації 23

1.4 Висновки та постановка задачі 34

2 ЕКСПРЕРИМЕНТАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ, МЕТОДИКИ І МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ 36

2.1 Лабораторне обладнання для визначення механічних характеристик 36

2.2 Методики експериментального дослідження при втомних випробуваннях 38

2.3 Матеріали і підготовка зразків до випробувань 40

2.4 Висновки по розділу 41

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ СПЛАВУ 09Г2С ПРИ БАГАТОСТУПЕНЕВОМУ ТА БЛОЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ 42

3.1 Структурний аналіз основного металу та зони зварювального з'єднання сплаву 09Г2С 42

3.2 Механічні властивості зварних з'єднань сплаву 09Г2С 52

3.3 Опір втомі сплаву 09Г2С та його зварних з’єднань 54

3.4 Висновки по розділу 62

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 63

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ 64

4.1 Опис ідеї проекту 64

4.2 Технологічний аудит 65

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту 73

Список використаних джерел 75

ВСТУП

Актуальність теми. Втома - основний фактор, який визначає термін служби зварних вузлів машин та елементів металоконструкцій, призначених для тривалої експлуатації (мости, шляхопроводи, антенно-щоглові споруди, крани, рами візків залізничного транспорту тощо). При проектуванні таких конструкцій зазвичай не допускається наявність втомних пошкоджень протягом призначеного терміну служби. Однак практика показала, що в зварних конструкціях різного призначення, що відповідають вимогам норм їх проектування та виготовлення, в процесі експлуатації в найбільш навантажених вузлах накопичуються втомні ушкодження, які призводять до передчасної появи тріщин. Як найбільш небезпечний вид дефектів, втомні тріщини істотно знижують циклічну довговічність пошкоджених елементів і конструкції в цілому.

На сьогодні обсяг інженерних конструкцій, введених в експлуатацію в другій половині минулого століття, становить значну частину від їхнього загального обсягу. Окремі вузли та елементи зі втомними ушкодженнями вимагають заміни. Заміна пошкоджених конструкцій новими пов'язана зі значними матеріальними витратами та часом, тому все частіше елементи великогабаритних конструкцій замість заміни піддають різним ремонтно-відновлювальним роботам. У світовій практиці спостерігається загальна тенденція пошуку високотехнологічних способів максимального продовження терміну безпечної експлуатації металоконструкцій, що діють. Систематичні дослідження проведені в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, показали, що високочастотне нові методи зварювання, та автоматизація цього процесу забезпечує найвищі фізико-механічні показники зміцненого шару металу і на сучасному розвитку ресурсозберігаючих технологій є найбільш ефективним способом зміцнення зварних конструкцій, що працюють в умовах змінного навантаження.

Мета дослідження. Метою дослідження даної теми є встановлення закономірностей пошкоджуваності та опору руйнуванню низколегованої салі 09Г2С при циклічному навантаженні методом побудови блок-програмного навантаження із заданим рівнем зусилля, та отримання на їх основі метод прогнозування механічної поведінки матеріалів в даних умовах близьких до експлуатаційних. Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі: визначити закономірності зміни форми зереної будови в основному металі, зоні термічного впливу та металі шва; визначити границю міцності таврового зварного з'єднання при статичному навантаженні; визначення довговічності таврового зварного з'єднання при циклічному навантаженні та побудова відповідної кривої втоми; дослідити тріщини, що виникають в зразках на початкових етапах руйнування при малих навантаженнях до моменту полного зламу дослідного зразку.

Об'єкт дослідження – закономірності механічної поведінки крихких матеріалів при локальному навантаженні методом дряпання з відколюванням.

Предмет дослідження – пошкоджуваність та опір руйнуванню крихких матеріалів при локальному навантаженні краю зразка за допомогою індентора (пуансона).

Методи дослідження – експериментальне дослідження механічної поведінки крихких матеріалів при крайовому локальному навантаженні, застосування статистичної обробки емпіричних даних для уточнення оцінок пошкоджуваності та опору руйнуванню краю; порівняння експериментальних даних з результатами досліджень інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в: У цій монографії розглянуті технологічні та конструктивні способи відновлення несучої здатності експлуатованих металоконструкцій з тривалим напрацюванням в умовах змінного навантаження. Показана їх ефективність на всіх стадіях опору зварного елемента втомному руйнуванню: від накопичення втомних ушкоджень до розвитку магістральної тріщини. На стадії накопичення пошкоджень до

утворення втомної тріщини досліджено ефективність зміцнення сполук новітніми технологіями зварювання. Для стадії стабільного розвитку втомних тріщин досліджено ефективність застосування різних способів їх гальмування, включаючи ремонт елементів з повним видаленням пошкодженого металу з тріщиною. Для обґрунтування терміну безпечної експлуатації елементів конструкцій з тріщинами втоми розроблений метод розрахункової оцінки циклічної довговічності стадії розвитку тріщини в полях залишкових напружень.

1 СУЧАСНИЙ СТАН СПРАВ У ВИЗНАЧЕННІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

1.1 Загальні відомості про сплав 09Г2С сфери його використання в несучих конструкціях мостів

Сталь 09Г2С - це дуже затребувана сталь, що використовується як у будівництві, так і в багатьох галузях промисловості. Існують вітчизняні та зарубіжні аналоги цього виду. Найчастіше використовується виготовлення труб, металопрокату і зварних металоконструкцій, температурний діапазон використання яких від -70 до 4250С9 з допустимими навантаженнями на них) [1].

Сталь 09Г2С 12: розшифрування

Розуміння того, як формується маркування дозволяє чітко уявляти, який товар представляє виробник, а також його основні особливості. Для тих, кого цікавлять подробиці про 09Г2С – розшифрування сталі має такий вигляд [2]:

- 09 - кількісна частка вмісту вуглецю в сплаві (0,09%);
- Г2 – це марганець та його частина у всьому обсязі коливається в районі 2% (точна цифра коливається від 1,3 до 2%);
- С – означає кремній, відсутність цифр після символу свідчить, що його менше 1%.

Після марки сталі (через тире) пишеться категорія (приклад: 09Г2С-12). Категорія позначає які нормовані характеристики був випробуваний металопрокат.

Як видно з таблиці, розшифрування сталі 09Г2С не обмежується тільки трьома легуючими компонентами. Крім вуглецю, кремнію і марганцю, її доповнюють такі елементи: нікель, сірка, фосфор, хром, азот, мідь, інше. Процентна складова легуючих металів трохи більше 1-2 сумарних % [3-5].

Таблиця 1.1

Розшифрування 09Г2С наочно виглядає так

Елемент	**Вміст, %**
С (вуглець)	до 0,12

Si (кремній)	0,5 – 0,8
Mn (марганець)	1,3- 1,7
Ni (нікель)	до 0,3
S (сірка)	до 0,04
P (фосфор)	до 0,035
Cr (хром)	до 0,3
N (азот)	до 0,008
Cu (мідь)	до 0,3
As (миш’як)	до 0,08
Fe (залізо)	96-97

Також для сталі 09Г2С враховується як рівень легування, а й інші чинники. Ось лише деякі з них, значущі для конкретного випадку [6]:

- конструктивність (призначення);
- евтектоїдність (структура: гексагональна, кубічна, інше;
- зміни після загартування тощо); спосіб виробництва (мартенівська, конвентна або електросталь);
- хім. склад сталі 09Г2С (у разі низьколегована).

Як результат, з'являються аналоги стосовно яких часто ставлять питання подібні до наступного: сталь 345 це і є 09Г2С. Позначення С345 введено для будівельників, де цифри позначають не хімічний склад матеріалу, яке важлива властивість – межа плинності, для сталі 09Г2С він відповідає будівельним стандартам С345, що у ряді ГОСТів (27772-88).

Технічні характеристики: тонкощі використання довідкових посібників

Властивості сталі 09Г2С багато в чому визначаються хімічним складом сплаву, його специфічними параметрами, які досить точно прораховуються металургами.

Марка сталі 09Г2С має такі критичні точки [7-10]:

- Ac1 = 732, коли аустеніт перетворюється на перліт процесах охолодження;
- Ac3(Acm) = 870 (з – від французького chauffage/нагрів) точка кінця розчинення цементиту;
- Ar3(Arcm) = 854 (refroidissement – охолодження) початок виділення Fe3C;
- Ar1 = 680 доевтектоїдна сталь, відповідає виділенню фериту.

Умовні позначення класичні, цифри 1 та 3 позначають номери точок на графіку. Символами cm зазвичай відзначають заевтектоїдні сталі.

Якщо говорити про інші особливості ст 09Г2С, характеристики відзначаються такі: легка зварюваність матеріалу. Для цього використовують РДС, АДС під флюсом та газовим захистом. Не піддаються зварюванню лише вироби, що пройшли хіміко-термічну обробку [11].

Механічні властивості сталі 09Г2С - це табличні величини, які розроблені рядом ГОСТів та описують матеріал при кімнатній температурі, а також для інших його станів.

Серед важливих механічних властивостей сталі 09Г2С виділяють такі:

- Межа плинності для залишкової деформації, що вимірюється в МПа;
- Відносні величини подовження при розриві та звуженні;
- ударна в'язкість (використання під навантаженням – одне з основних застосувань);
- Твердість за Брінеллем (НВ).

Клас міцності сталі 09Г2С: таблиця для переліку марок включає і зазначену, як зазначалося відповідає С345. Сюди належить ряд інших марок. Таким чином, відмінні за хімічним складом і навіть способом одержання сталі можуть мати однаковий клас міцності. Ці дані можна знайти для 09Г2С за ДСТУ 19281-2014, характеристики сплавів представлені в зручних таблицях, якими легко орієнтуватися. ДСТУ 19281-2014 ви можете подивитися [13].

Але можлива й ситуація, навпаки. Наприклад, для 09Г2С ГОСТі 19281-89 та марки 16ГС є дані про класи міцності 265 та 296.

- У цьому ж ГОСТі описують типи металопрокату:
- Сортовий, круглий, фасонний за різних перерізів (зокрема коло 09Г2С).
- Широкосмуговий профіль з певною товщиною виробів.
- Подібна інформація представлена для інших марок.
- Щільність сталі 09Г2С коливається десь біля позначки 7800кг/м^3.

Але легуючі елементи можуть як збільшувати питому вагу, так і зменшувати його. До першого схильний вольфрам. Другого досягають додаванням: кобальту, нікелю, міді [13].

Твердість сталі 09Г2С може визначатися за Брінеллем, Роквеллом, Віккерсом і т.д. вибір системи визначається типом виробів, котрим потрібно визначення параметра. Також він важливий при виборі способу зварювання, твердість сталі на шві має зберігати високі показники.

Більшість перелічених параметрів можна знайти у ТУ 14 3 1128 2000 для сталі 09Г2С, як та інших марок. Технічні умови описують вимоги до матеріалів, у тому числі виготовляються труби обслуговування газових родовищ, інших напрямах галузі.

Допустима напруга для сталі 09Г2С розраховується в залежності від таких значень:

- класу міцності та марки;

- температури, за яких вона буде експлуатуватися;
- товщин, рідко змін (коло, лист, інше).

Існуючі 09Г2С зарубіжні аналоги (європейські, азіатські, інші), найбільш збігаються за механічними, технічними властивостями із зазначеною маркою. Однак хімічний склад може відрізнятися. Найбільш близьку конфігурацію має болгарська версія цієї марки.

Сталь 09Г2С: характеристики та застосування

Основні галузі використання цієї марки: листовий та фасонний прокат. Для гарячекатаної смуги використовують нормативи ДСТУ 103-2006, але сталевий круг згідно з ДСТУ 2590-2006.

Як зазначалося сталь 09Г2С і аналоги легко піддаються зварюванню. Вже перелічені характеристики дозволяють використовувати цей матеріал для виробів, що вимагають високої зносостійкості: балки, швелери, куточки.

Марка 09Г2С, її технічні характеристики, необхідні у створенні транспортних засобів, будівництві, нафтовій та хімічній промисловостях. Широкий температурний діапазон дозволяє використовувати матеріал там, де відбуваються сильні деформації за тривалий експлуатаційний термін. При цьому гранична температура -70 градусів, сприяє застосування виробів зі сталі 09Г2С в суворих кліматичних умовах.

Під цей опис також добре підходить сталь 09Г2С-15. Її використовують за всіма перерахованими пунктами. Залишається тільки додати, що окрім зварювання, монтаж може виконуватись болтовими сполучними елементами. Стійкість металу до хімічних впливів робить його цікавим у відповідній галузі. При цьому високі механічні якості використовують для будівництва мостів, доріг, портових станцій тощо.

Популярна у будівельників та марка 09Г2С-12. Вона також має стабільні пластичні властивості. Відрізняється особливим хімічним складом, до якого

входить миш'як. Задіюється виготовлення трубопровідної арматури. Не може застосовуватися в харчовій промисловості.

На по всій території України багатокілометрові магістралі трубопроводів зведені саме з цієї марки. Там, як ніде корисні стійкість до морозів та легка зварюваність виробів. Це дозволяє створювати складні, одночасно соціально значущі об'єкти (металоконструкції) з 09Г2С та аналогів.

Водночас для міст з помірним або континентальним кліматом сталь 09Г2С за ДСТУ різної нумерації підходить для облагородження вулиць. Квадратна труба вкрай популярна як огородження, стовпчики для рекламних щитків, установка пересувних торгових майданчиків, багато іншого. З цією ж метою використовують і прямокутну конфігурацію виробів.

Сталь 09Г2С, показники якої вже досить докладно розглянуті у цьому викладі, цікава зварювальників незалежно від способу виконання. Особливо популярні фланці із цього матеріалу. Особливості роботи описані у ГОСТ19281-73. Майстри досить привітно сприймають новину про необхідність роботи з цією маркою.

Сталь 09Г2С з різним класом міцності може застосовуватися для парових котлів, а також обладнання, що використовується в сільськогосподарському комплексі. Подробиці про вимоги до сталі 09Г2С в ГОСТ 5520-79.

Додатковою причиною використання сплавів цієї марки є висока економічність, що досягається не тільки за рахунок дешевизни виробництва. Легкість та швидкість будівництва будівель, споруд, монтажу обладнання – також дозволяють оптимізувати витрати підприємств різних галузей.

Особливості електрозварювання

До робіт із цим матеріалом пред'являються особливі вимоги, які зумовлюються необхідністю дотримання технологічного процесу [14]. Необхідність збереження міцності сталі на швах вже наголошувалося. Однак у звичайних умовах навряд чи можна досягти абсолютно позитивного результату.

Наприклад, умова запобігання перегріву досягаються застосуванням струмів низької сили 40-50 А/1 мм електрода. Зварні роботи супроводжуються наступним загартуванням матеріалів при температурі 650°С [15]. Проте, виходячи з критичних точок сплаву, можна зробити і власні розрахунки для проведення цих робіт. Причому зазначену Т загартування застосовують послідовно до кожних 25 мм шва приблизно годину [16]. Охолодження виробляють у звичайній воді або на повітрі. Завдяки дотриманню технологій досягають якості, що не поступається за властивостями ще дорожчим сплавам.

Порівняння з іншою маркою стали

Наприклад, для 09Г2С і ст3 різниця визначається насамперед вмістом вуглецю. Для Ст3сп воно в 10-20 разів перевищує те, що є в металі низьколегованої марки.

Ст3сп - відноситься до вуглецевих сплавів. Ця марка сталі відрізняється високою крихкістю, швидким руйнуванням за низьких температур. Якщо описувана марка має нижню межу -70 градусів, об'єкт порівняння всього -20.

Якість Ст3сп - звичайне, що говорить про можливо високу присутність сірки і фосфору. Тоді як 09Г2С високоякісна. Всі інші достоїнства вже є в попередньому описі. Залишається тільки відзначити, що вартість цієї марки значно вища, ніж ціна Ст3сп [13].

1.2 Визначення рівня втомного пошкодження зварних з'єднань

Зварні металоконструкції тривалого призначення (мости, трубопроводи, підйомно-транспортні та висотні споруди, морські стаціонарні платформи та ін.) під час експлуатації піддаються впливу змінних навантажень. У процесі експлуатації таких конструкцій відбувається накопичення втомних ушкоджень в найбільш навантажених зварних вузлах і елементах, які викликають зміну властивостей металу в зонах зварних швів, зародження мікротріщин втоми з

подальшим утворенням магістральної тріщини, розвиток якої в кінцевому підсумку призводить до руйнування [1,2,17].

Більшість конструкцій експлуатуються при режимах навантаження, коли рівні прикладених навантажень, їх тривалість і повторюваність змінюються випадковим чином, тому, навіть знаючи найбільш ймовірні місця виникнення втомних тріщин в зварних елементах металоконструкцій (як правило, втомні пошкодження накопичуються в навколошовних зонах в місцях залишкових напружень), безпосереднє використання кривих втоми, отриманих при постійній амплітуді циклу, стає скрутним. Складність розв'язання задач із прогнозування ресурсу елементів металоконструкцій також пов'язана з відсутністю технічних засобів кількісного визначення рівня накопичених втомних ушкоджень до моменту утворення мікротріщин. Пропоновані підходи до оцінки пошкодженості щодо зміни механічних властивостей (твердості, мікротвердості, щільності, ударної в'язкості тощо), акустико-емісійних та магнітних характеристик (пружних хвиль, магнітної індукції, коерцитивної сили тощо), стану поверхні матеріалу (використання тензодатчиків, різних плівок, покриттів тощо) залежать від безлічі факторів і не завжди застосовні до реальних зварних металоконструкцій. Тому вирішення завдань з оцінки прогнозування втомної довговічності елементів металоконструкцій, що працюють при випадкових режимах навантаження, як правило, передбачає розрахункове визначення накопиченої втомної пошкодженості [18-20].

В 1924 Пальмгреном вперше був запропонований закон лінійного підсумовування втомних ушкоджень без його фізичного пояснення [1]. В 1945 Майнер, представивши втомне пошкодження як наслідок накопичення матеріалом роботи пропорційно кількості циклів навантаження, привів лінійну гіпотезу Пальмгрена до математичної форми [2]. Згідно з гіпотезою Пальмгрена-Майнера при випадковому навантаженні ушкодженість *D*, при любом і-м уровне напряжений в спектре нагружения прямо пропорциональна отношению числа циклов его действия n, к числу циклов до разрушения на этом уровне *N*. Утверждается, что разрушение произойдет, когда сумма накопленных

усталостных повреждений D достигнет своего предельного значения, равного единице:

$$D = \sum_{i=1}^{k} D_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (1.1)$$

Експериментальною перевіркою цієї гіпотези займалося багато дослідників. Було встановлено, що навіть при випробуваннях гладких зразків величина D істотно залежить від черговості та тривалості навантаження різних рівнів і може змінюватися в досить широкому діапазоні від 0,1 до 10 [3-5]. Так, при режимах навантаження, коли низька напруга передує високим, відбувається так зване тренування, і сума накопичених втомних ушкоджень, як правило, більше одиниці. Найбільш суттєво тренування проявляється, коли початковий розмах напруг нижче за межу витривалості збільшують на невелику величину через інтервали в кілька мільйонів циклів. При режимах навантаження, коли висока напруга передує низьким, відбувається так зване навантаження, і сума накопичених втомних ушкоджень, як правило, менше одиниці.

Тому надалі при лінійному підсумовуванні накопичених втомних ушкоджень значення величини D стали приймати відмінним від одиниці, а втомну довговічність визначати з критеріального співвідношення

$$D = \sum_{i=1}^{k} D_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} < a \quad (1.2)$$

где a - предельное значение суммы накопленных усталостных повреждений, при котором происходит разрушение (критерий разрушения).

Початок експериментальним дослідженням закономірностей накопичення втомних ушкоджень у зварних з'єднаннях було покладено на початку 60-х років минулого століття [6-11]. Враховуючи експериментальні дані, отримані на гладких зразках основного металу, перші дослідження закономірностей накопичення втомних ушкоджень в зварних з'єднаннях проводили при двох-і багатоступінчастих блоках навантаження з спадною послідовністю застосування навантажень в блоці, вважаючи їх найбільш ушкоджуючими. Однак, при випробуванні зразків зварних з'єднань було встановлено, що порядок

застосування навантажень викликає зворотний ефект у закономірностях накопичення втомних ушкоджень при використанні лінійного підсумовування порівняно з основним металом, тобто при зростаючому порядку докладання навантажень значення критерію руйнування а зменшуються, а при спадному порядок застосування навантажень - збільшуються. Це пов'язувалося з релаксацією залишкової зварювальної напруги внаслідок первинного застосування більш високих рівнів напруги при багатоступінчастому навантаженні. Згідно з експериментальними даними розкид граничних значень суми накопичених втомних ушкоджень, встановлених відповідно до закону лінійного підсумовування, для зварних зразків коливається в діапазоні від 0,2 до 3 залежно від порядку застосування навантаження. Були спроби врахувати вплив зміни залишкової зварювальної напруги на накопичення втомних ушкоджень. Наприклад, у роботі [12] запропонована модель визначення рівня накопичених втомних ушкоджень при двоступінчастому навантаженні, заснована на зміні межі витривалості зварного з'єднання під впливом залишкових напруг. Показано, що при такому навантаженні накопичення втомних ушкоджень задовільно описується простим лінійним підсумовуванням з критерієм а=1, якщо враховувати зміни залишкової зварювальної напруги внаслідок впливу навантаження.

Для зручності прогнозування довговічностей елементів конструкцій, незважаючи на широкий діапазон розкиду величини а, наприкінці 70-х років XX століття було рекомендовано при проектуванні зварних конструкцій, що працюють в умовах змінного навантаження, використовувати закон лінійного накопичення втомних ушкоджень з критерієм руйнування, що дорівнює одиниці. Це аргументувалося тим, що розрахунок конструкції при складних змінних навантаженнях на основі гіпотези Пальмгрена-Майнера з критерієм руйнування, що дорівнює одиниці, - призводить до суттєвої економії металу в порівнянні з розрахунком за максимальними напругами циклу [6]. При цьому зазначалося, що такий підхід може бути небезпечним для зварних з'єднань, що працюють при

певних спектрах навантаження, коли критерій руйнування істотно нижче одиниці.

Ряд робіт з дослідження накопичення втомних ушкоджень зварних з'єднань було виконано у відділі міцності зварних конструкцій ІЕС ім. Є. О. Патона НАН України. Були проведені втомні випробування значної кількості зразків різних типів зварних з'єднань (стикових, кутових, таврових, у тому числі і з наплавками) і зразків, що моделюють зварні з'єднання, при двоступінчастому навантаженні з одноразовим і багаторазовим змінами навантажень [13-17]. Всі зразки були з високим залишковим напруженням розтягування. Як критерії завершення випробувань зразків приймалися: момент утворення тріщини, тріщина втоми глибиною 2...3 мм і повне руйнування зразків. Показано, що криві втоми зварних з'єднань, отримані за різними критеріями завершення випробувань, є паралельними один одному. Вказується, що при одноразовій зміні максимальної напруги загострення пошкоджень істотно залежить від порядку навантаження. Значною мірою ця залежність обумовлюється впливом розтягуючих залишкових напружень. Наголошується, що дія циклічного перевантаження до 20% довговічності проявляється так само, як і статичної. Якщо дія навантаження перевищує 20% довговічності, то інтенсивність накопичення ушкоджуваності різко зростає, що призводить до розміцнення з'єднання [13]. При цьому розкид граничних значень суми накопичених втомних ушкоджень знаходиться в діапазоні від 0,3 до 2,2. Для двоступінчастого навантаження з багаторазовою зміною напружень гіпотеза лінійного підсумовування ушкоджень отримала у цих роботах експериментальне підтвердження. Показано, що, починаючи з десятиблочного двоступінчастого навантаження, результати випробувань практично перестають залежати від порядку початкового навантаження (переходу з найвищого рівня на нижчий або з нижчого на вищий).

У ряді випадків при прискореному визначенні меж витривалості зварних з'єднань також цілком допустимо приймати значення критерію руйнування а, що дорівнює одиниці. Подальші дослідження накопичення втомних ушкоджень у

зварних з'єднаннях за допомогою мідних гальванічних плівок показали, що такі дефекти зварювання, як одиночні пори, включення, підрізи можуть не проявити свого впливу при високих навантаженнях, але призвести до помітного зниження опору втоми при низьких навантаженнях [14; 18]. У роботі [19] запропоновані формули для перевірки на витривалість зварних сполук на основі використання гіпотези лінійного накопичення втомних ушкоджень, що враховують залишкові зварювальні напруги і нестаціонарність навантаження, засновані на статистичних характеристиках навантаженості. Як критерій руйнування а рекомендується значення, що дорівнює одиниці.

Починаючи з 80-х років XX століття, завдяки розвитку парку випробувальних машин при дослідженнях впливу спектра навантаження на циклічну довговічність зварних з'єднань експериментатори відмовляються від двоступінчастого блокового навантаження на користь багатоступеневого блокового навантаження, що складається, як правило, з п'яти ступенів навантаження. Оцінку ушкоджуючої здатності одного такого блоку проводять шляхом переходу до еквівалентної напруги $\Delta\sigma_{eq}$ по формуле [20]

$$\Delta\sigma_{eq} = \left[\frac{1}{N_b}\sum \quad (\Delta\sigma_i)^m\right]^{\frac{1}{m}} \tag{1.3}$$

где N_b – длина блока (количество циклов перемен напряжений в одном блоке); m – показатель степени уравнения кривой усталости $N{\cdot}\sigma^m{=}C$, полученной при заданных постоянных амплитудах нагружения.

Накопичена втомна ушкодженість за один блок навантаження визначається за кривою втоми зварних з'єднань, побудованої при регулярному навантаженні, як відношення кількості циклів напрацювання при еквівалентних напругах до довговічності з'єднання, що відповідає цим напругам. Сумарну ушкодженість всіх блоків визначають шляхом підсумовування ушкодженості D кожного блоку.

Починаючи з 90-х років XX століття, спостерігається підвищений інтерес до відтворення на зразках зварних з'єднань випадкових процесів або точного копіювання всього спектра навантажень, яким піддається конструкція під час експлуатації. Навіть при блокових випробуваннях рівні навантаження, їх тривалість і послідовність у блоці задають за законом випадкового розподілу. ня, як правило, нормального (гауссівського) або логарифмічно-нормального законів. При випадковому навантаженні формула (1.3) приймає вил

$$\Delta\sigma_{eq} = \left[\frac{\sum n_i(\Delta\sigma_i)^m}{\sum n_i}\right]^{\frac{1}{m}}. \qquad (1.4)$$

Розглядалося також застосування співвідношення (1.2) для опіки накопичених втомних ушкоджень при багатовісному навантаженні [21-23]. В оглядовій роботі [21] при лінійному підсумовуванні втомних ушкоджень у зварних з'єднаннях при багатовісному навантаженні рекомендовано приймати наступні значення критерію руйнування *a*: 0,5 – для узкополосных спектров нагружения; 0,2 – для широкополосных спектров навантаження.

Розглядалося також застосування співвідношення (1.2) для опіки накопичених втомних ушкоджень при багатовісному навантаженні [21-23]. В оглядовій роботі [21] при лінійному підсумовуванні втомних ушкоджень у зварних з'єднаннях при багатовісному навантаженні рекомендовано приймати наступні значення критерію руйнування $m'=2m - 1$ (m – показатель степени уравнения первой части кривой усталости $N=C/\sigma^m$) [24]. У роботах [25, 26] показано, що критерії руйнування а, розраховані як за традиційною, так і модифікованою гіпотезами лінійного підсумовування втомних ушкоджень істотно не відрізняються для більш ніж 90% отриманих даних.

За 90 років з дня опублікування Пальмгреном своєї гіпотези були спроби врахувати не тільки напруги нижче за межу витривалості, але й вплив послідовності застосування навантажень, нелінійності накопичення втомних ушкоджень, взаємодії навантажень, асиметрії циклу і т. д. Більше 70 таких співвідношень для основного металу, що відрізняються формою подання та

числом незалежних констант, що використовуються, представлені в оглядових роботах [3-5; 27]. Складність їх застосування до зварних елементів металоконструкцій пов'язана з необхідністю обліку взаємодії прикладених навантажень з залишковими зварювальними напругами, наведеними термічним циклом зварювання, та концентраторами напружень, зумовленими формою з'єднання, що суттєво ускладнює розрахунок та не завжди виправдано.

Норми, що діють, з проектування зварних елементів металоконструкцій при розрахунках на втому рекомендують використовувати лінійне підсумовування втомних ушкоджень у вигляді співвідношення (1.2). При цьому в складних спектрах навантаження виділяють типові проектні режими навантаження (за параметрами циклу навантаження) і підсумовують накопичену втомну пошкодження на кожному режимі. У рекомендаціях з розрахунку на втому зварних з'єднань та елементів Міжнародного інституту зварювання за 2003 рік [28] як критерій руйнування, а при лінійному підсумовуванні втомних ушкоджень пропонували приймати одиницю. Однак завдяки науковим дослідженням, виконаним за останні роки, в оновлених редакціях цього документа, починаючи з 2006 року, як критерій руйнування рекомендується набувати значення 0,5 [29; 30].

1.3 Розрахунок кривих втоми зварних з'єднань металоконструкцій при експлуатації

Як було показано вище, щодо циклічної довговічності зварних елементів металоконструкцій, що працюють при випадкових спектрах навантаження, існуючі нормативні документи рекомендують використовувати лінійне підсумовування втомних ушкоджень за співвідношенням (1.2). При цьому необхідно мати розрахункові криві втоми типових зварних вузлів і елементів конструкцій. Розрахункові криві втоми повинні враховувати реальні значення коефіцієнтів концентрації напруги з'єднань, що встановилися в процесі

експлуатації рівні залишкових зварювальних напружень і характеристики циклу змінного навантаження, що діє на елемент [31-34].

У роботах [35; 36] для визначення розрахункових кривих втоми зварних з'єднань експлуатованих металоконструкцій пропонується використовувати базові діаграми граничних напружень зварних з'єднань сталей різних класів міцності з низькими (близькими до нульових) залишковими напругами. Необхідні базові діаграми граничної напруги для основних типів зварних з'єднань містяться в нормативному документі [37] РД 50-694-90 «Надійність у техніці. Імовірнісний метод розрахунку втома зварних конструкцій».

Розрахункові характеристики опору втоми зварних елементів та вузлів металоконструкцій у РД 50-694-90 регламентуються залежно від конструктивно-технологічного рішення зварного з'єднання; залишкових напружень; класу міцності сталі; якості звареного з'єднання; коефіцієнта асиметрії циклу.

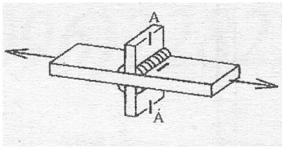
За критерій граничного стану прийнято утворення тріщини втоми глибиною 2...3 мм, при якій можливий перехід у крихкий стан. За конструктивно-технологічними ознаками зварні з'єднання, елементи та вузли конструкцій, з урахуванням дії зусиль щодо шва, поділяються на 8 груп. Оскільки 1-а груша відноситься до елементів конструкцій, що перевіряються на втому, по основному металу далеко від зварних швів, а група 8 - до умов навантаження, що рідко зустрічаються, то розрахункове визначення меж обмеженої витривалості основних типів зварних з'єднань пропонується виконувати стосовно 2... 7 груп. За рівнем залишкової зварювальної напруги ($\sigma_{ост}$) каждая группа дополнительно подразделяется на 2 подгруппы: *а* – $\sigma_{ост} > 0{,}5\sigma_т$, б – $\sigma_{ост} \leq 0{,}5\sigma_т$.

Характеристики опору втоми для 2...7 груп вузлів та зварних з'єднань із сталей різних класів міцності в РД 50-694-90 регламентуються діаграмами граничних напруг циклу в координатах σ_{min}, σ_{max}, σ_m (для чисел циклов $N = 5 \cdot 10^4$, $N = 10^5$, $N = 5 \cdot 10^5$, $N = 2 \cdot 10^6$, $N \to \infty$), побудованими за експериментальними кривими втоми (відповідним ймовірності відмови 50 %). Як приклад

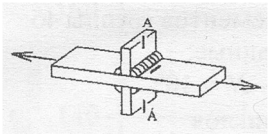
представлені елементи конструкцій групи 4 з поперечними кутовими швами (табл. 1.1) та діаграма граничних напруження циклу для елементів даної групи с $\sigma_{ост} \leq 0{,}5\sigma_т$, (рис. 1.1).

Таблиця 1.2

Зварні елементи групи 4 з поперечними кутовими швами

Елемент і схема навантаження	Конструктивно- технологічні признаки елементів та якість виготовлення	Група елементів
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\sigma_т$ Низьковуглецеві, низьколеговані та високоміцні сталі. Якісні кутові зварні з'єднання з повним проваром, що відповідають умовам виготовлення металевих конструкцій	4а

Продовження таблиці 1.2

	$\sigma_{ост} < 0{,}5\sigma_т$ Низьковуглецеві, низьколеговані та високоміцні сталі. Якісні кутові зварні з'єднання з повним проваром, що відповідають умовам виготовлення металоконструкцій	4б

Побудову розрахункових кривих втоми зварних з'єднань експлуатованих металоконструкцій на основі нормативного документа РД 50-694-90 пропонується виконувати за такою методикою.

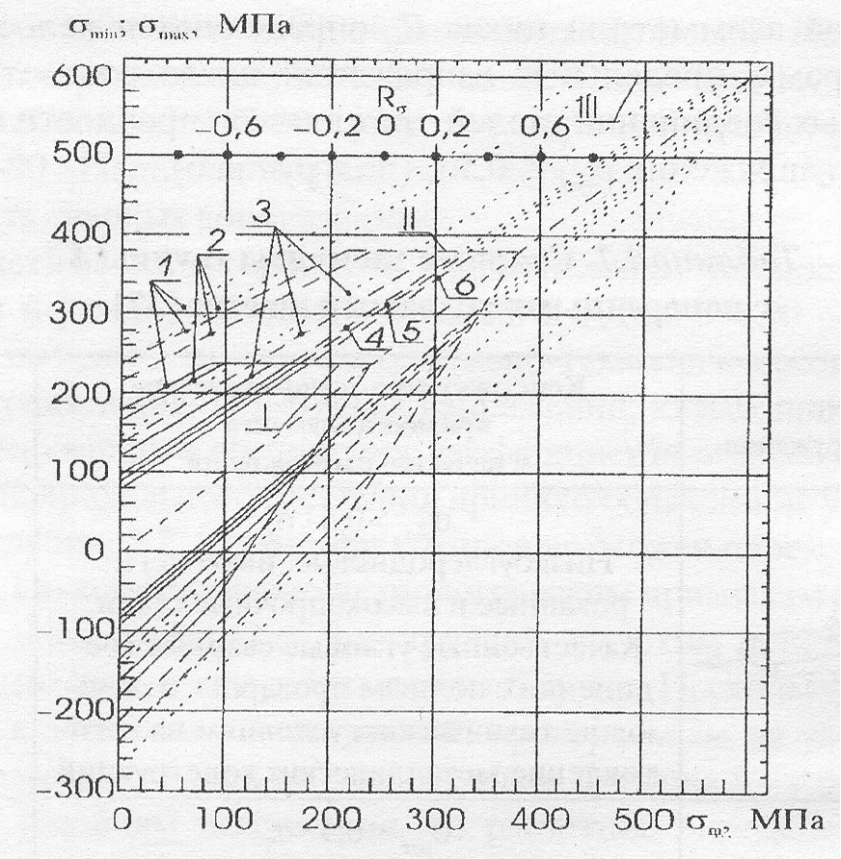


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 4б:

I - малоуглеродистые; II - низколегированные; III - высокопрочные стали;

1 - $N = 5 \cdot 10^4$; 2 - $N = 10^5$; 3 - $N = 5 \cdot 10^5$; 4 - $N = 2 \cdot 10^6$; 5 - $N \to \infty$ циклов

У першому етапі будуються базові криві втоми для зварного елемента обраної групи. Необхідні для побудови базової кривої втоми два значення меж обмеженої витривалості σ_{R0} (наприклад, при N=$5 \cdot 10^4$ и N=$2 \cdot 10^6$ циклів) при заданій асиметрії циклу R, визначаються безпосередньо з діаграм граничних напрузі циклу відповідних груп зварних з'єднанні сталей трьох класів міцності з рівнем залишкових напрузі $\sigma_{ост} \leq 0{,}5\sigma_т$ (підгрупа б).

Для автоматизації побудови базових кривих втоми при різних значеннях асиметрії циклу напруги R рекомендується використовувати наступне співвідношення:

$$\sigma_{R_\sigma} = \frac{2 \cdot \sigma_{-1}}{2 - B(1 + R_\sigma)} \qquad (1.5)$$

де B = 2($\sigma_0 - \sigma_{-1}$)/ σ_0; σ_{-1} и σ_0 - межі обмеженої витривалості з'єднання, відповідно, при симетричному та нульовому циклах навантаження, що визначаються з діаграм граничних напружень для заданої довговічності; R - коефіцієнт асиметрії циклу.

Числові значення параметрів, необхідні розрахункового визначення базових значень σ_{R0} по соотношению (1.5), приведены в табл. 1.2.

Базові криві втоми зварюваних елементів пропонується будувати в координатній площині ($N - \sigma_{max}$) у вигляді прямої ($\sigma_{max} = a \cdot \lg N - b$), що проходить через точки з координатами ($5 \cdot 10^4$, $\sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4}$) и ($2 \cdot 10^6$, $\sigma_{R_\sigma}^{2 \cdot 10^6}$). В цьому випадку рівняння базової кривої втоми приймає вигляд:

$$\sigma_{max} = 0{,}625 \cdot \sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4} \cdot \left(\frac{\sigma_{R_\sigma}^{2 \cdot 10^6}}{\sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4}} - 1 \right) \cdot lgN +$$

$$+3{,}94 \cdot \sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4} \cdot \left(1 - 0{,}75 \frac{\sigma_{R_\sigma}^{2 \cdot 10^6}}{\sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4}} \right)$$

Базова крива втоми зварного з'єднання з кутовими швами (група елементів 4б), виготовленого з маловуглецевої сталі, для симетричного циклу навантаження представлена на рис. 1.2.

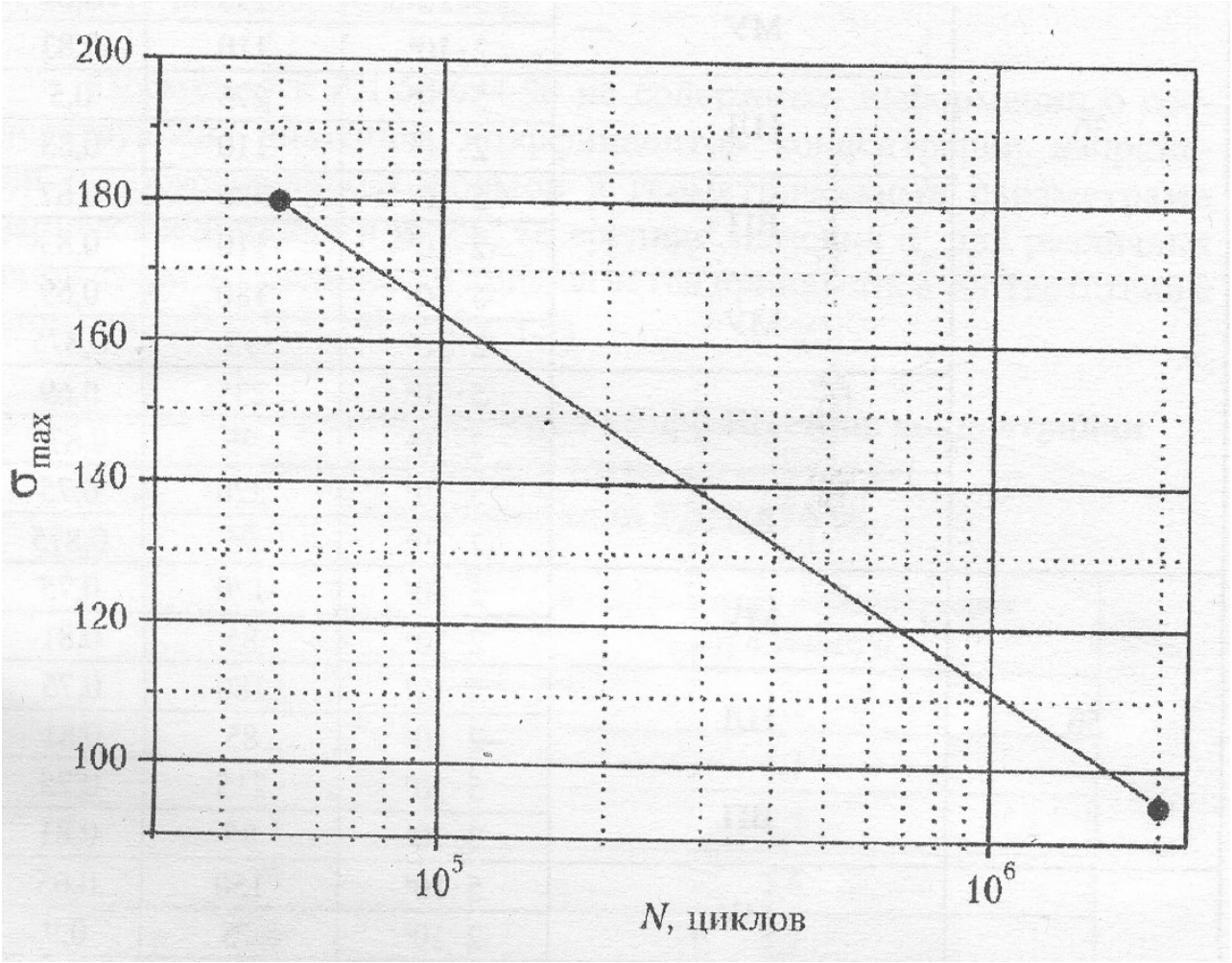


Рис. 2. Базова крива втоми зварного з'єднання класу 4б маловуглецевої сталі, *R*.

Після побудови базової кривої втоми безпосередньо по діаграмі граничних напруг циклу або на основі використання співвідношення (1.5) на другому етапі визначається розрахункова крива втоми для зварного елемента експлуатованої метало-конструкції, що враховує значення коефіцієнта концентрації напружень, що встановилися рівні залишкової напруги та характеристики навантаження.

Таблиця 1.3

Значення параметрів рівняння (1.5) для різних груп зварних з'єднань

Група з'єднань	Клас міцності	N, циклів	σ_{-1}, МПа	B
2	МУ	$5 \cdot 10^4$	210	0,625
		$2 \cdot 10^6$	130	0,75

	НЛ	$5 \cdot 10^4$	275	0,5
		$2 \cdot 10^6$	145	0,75
	ВП	$5 \cdot 10^4$	340	0,625
		$2 \cdot 10^6$	170	0,75
3б	МУ	$5 \cdot 10^4$	195	0,67
		$2 \cdot 10^6$	110	0,83
	НЛ	$5 \cdot 10^4$	275	0,5
		$2 \cdot 10^6$	110	0,83
	ВП	$5 \cdot 10^4$	320	0,67
		$2 \cdot 10^6$	110	0,83
4б	МУ	$5 \cdot 10^4$	180	0,69
		$2 \cdot 10^6$	95	0,875
	НЛ	$5 \cdot 10^4$	235	0,69
		$2 \cdot 10^6$	95	0,875
	ВП	$5 \cdot 10^4$	270	0,75
		$2 \cdot 10^6$	95	0,875
5б	МУ	$5 \cdot 10^4$	170	0,75
		$2 \cdot 10^6$	85	0,81
	НЛ	$5 \cdot 10^4$	180	0,75
		$2 \cdot 10^6$	85	0,81
	ВП	$5 \cdot 10^4$	215	0,75
		$2 \cdot 10^6$	85	0,81

Продовження таблиці 1.3

6б	МУ	$5 \cdot 10^4$	150	0,65
		$2 \cdot 10^6$	75	0,9
	НЛ	$5 \cdot 10^4$	155	0,75

		$2 \cdot 10^6$	75	0,9
	ВП	$5 \cdot 10^4$	175	0,8
		$2 \cdot 10^6$	75	0,9
7б	МУ	$5 \cdot 10^4$	140	0,7
		$2 \cdot 10^6$	60	0,9
	НЛ	$5 \cdot 10^4$	145	0,8
		$2 \cdot 10^6$	60	0,9
	ВП	$5 \cdot 10^4$	170	0,85
		$2 \cdot 10^6$	60	0,9

Примечание. МУ - малоуглеродистая сталь; НЛ – низколегированная сталь; ВІ - высокопрочная сталь.

Оскільки в РД 50-694-90 не міститься інформації про відповідні значення коефіцієнтів концентрації напруг α_σ, обумовлених формою і геометричними параметрами зварних з'єднань і вузлів, то середні значення ασ, для різних типів зварних з'єднань пропонується приймати відповідно до даних робіт [13; 14] (табл. 1.3).

Побудову розрахункової кривої втоми необхідно проводити в такий спосіб. За встановленою базовою кривою втоми обраної групи зварного елемента визначається циклічна довговічність N. що відповідає максимальній напрузі циклу $\sigma_{max} = \sigma_т / \alpha_\sigma$. При цьому значення коефіцієнта концентрації напруги ασ для цього елемента визначається експериментально на експлуатованому зварному елементі або вибирається з таблиці 1.3.

Таблиця 1.4

Середні значення коефіцієнтів концентрації напружень для груп елементів 2-7 за класифікацією РД50-694-90

Група елементів	Коефіцієнт концентрації напружень α_σ
2	1,1
3	1,3
4	1,5
5	1,6
6	1,7
7	2,3

Отримана таким чином точка з координатами (N_T, σ_T/α_σ) в координатній площині (N - σ_{max}) приймається за верхню точку розрахункової кривої втоми зварного елемента експлуатованої металоконструкції, що враховує основні фактори, які визначають циклічну довговічність елемента (рис. 1.3). Відомо, що такими факторами є механічні властивості основного металу, коефіцієнт концентрації напружень α_σ, коефіцієнт асиметрії циклу R^e_σ, максимальна напруження σ_{max} циклу зовнішнього змінного навантаження і рівень залишкових зварювальних напружень, що встановився $\sigma^{вт}_{зал}$. Вплив всіх вищевказаних факторів на опір втоми експлуатованих зварних конструкцій, за винятком залишкових зварювальних напружень, враховує рівняння базової кривої.

Друга (нижня) точка розрахункової кривої втоми встановлюється шляхом коригування відповідної базової кривої втоми. Зазначене коригування полягає у зниженні межі обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів до значення, що дорівнює величині межі витривалості σ'_{R_σ} в враховує вплив встановленого рівня залишкових зварювальних напружень (рис. 1.3).

При цьому забезпечується умова збігу розрахункової та базової кривих втоми при рівнях зовнішнього навантаження, що викликають у зонах концентратора повну релаксацію залишкової зварювальної напруги, тобто при $\sigma_{max} \geq \sigma_T/\alpha_\sigma$ (відомі експериментальні дослідження [38] показують збіг меж обмеженої витривалості зварних з'єднань без залишкових напружень і з

залишковими напругами різного рівня, якщо в зонах концентратора напруги сполук реалізується цикл змінних напружень однакового розмаху з максимальними напругами, рівними межі плинності матеріалу).

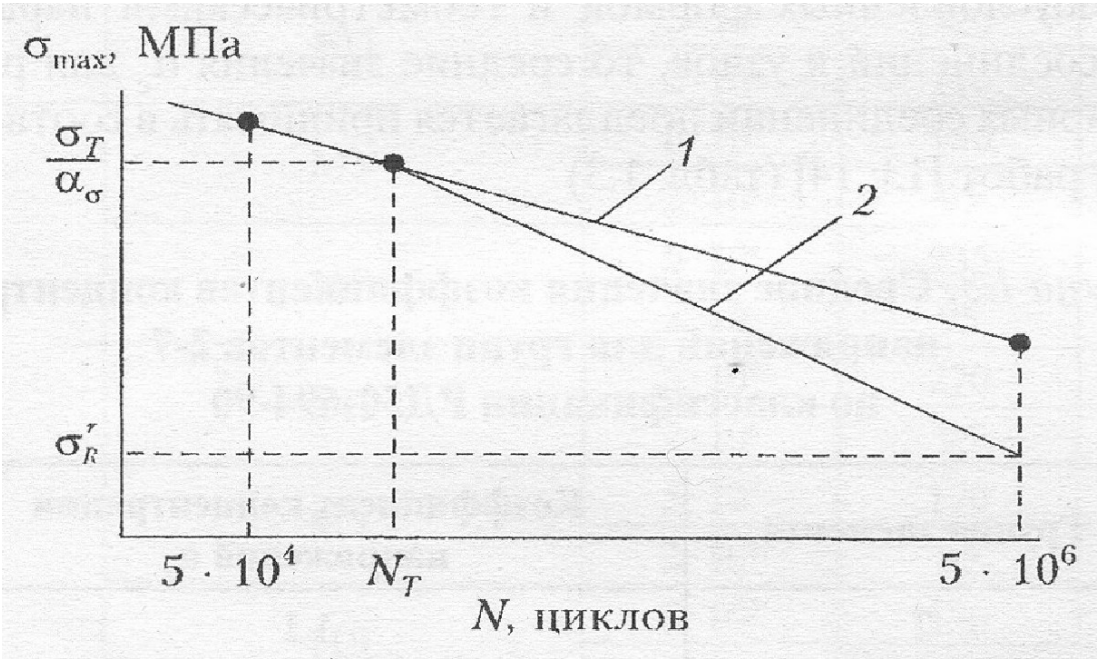


Рис. 3. Схема побудови розрахунковоъ кривої втоми зварного з'єднання елемента металоконструкції, що експлуається:1 -базова крива втоми ($\sigma_{зал}^{вт}$= 0); 2 - розрахункова

Значення межі витривалості визначається співвідношеннями [39]:

$$\{\sigma'_{R_\sigma} = \frac{2\cdot\left(\sigma_в - \frac{\sigma_{зал}^{вт}}{\alpha_\sigma}\right)}{\left(1-R_\sigma^e\right)\cdot\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{-1}}-1\right)},\ якщо\ \sigma_{зал}^{вт} < \sigma_{зал}^{гр};\ \sigma'_{R_\sigma} = \frac{2\cdot\left(\sigma_в - \frac{\sigma_т}{\alpha_\sigma}\right)}{\left(1-R_\sigma^e\right)\cdot\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{-1}}-1\right)},\ якщо\ \sigma_{зал}^{вт} \geq \sigma_{зал}^{гр},\quad (1.7)$$

де: R_σ^e – експлуатаційний коефіцієнт асиметрії циклу; $\sigma_{зал}^{гр}$ – граничні значення залишкових напружень, що визначаються за формулою:

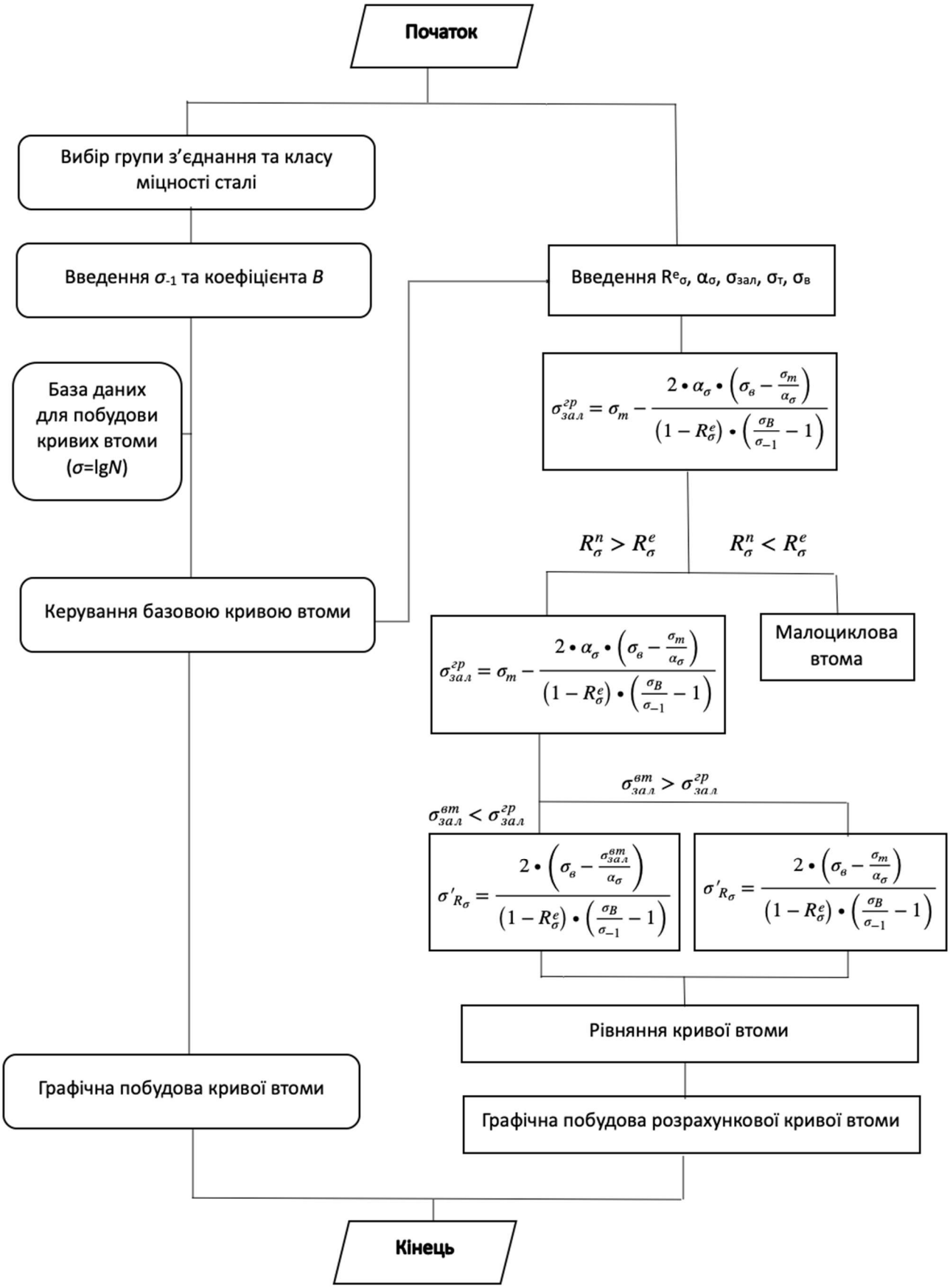


Рис. 4. Блок-схема програми побудови базових та розрахункових кривих втоми

$$\sigma_{\text{зал}}^{\text{гр}} = \sigma_{\text{т}} - \frac{2\cdot\alpha_{\sigma}\cdot\left(\sigma_{\text{в}}-\frac{\sigma_{\text{т}}}{\alpha_{\sigma}}\right)}{(1-R_{\sigma}^{\text{e}})\cdot\left(\frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{-1}}-1\right)}.$$

За двома отриманими точками з координатами ($N_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{т}}/\alpha_{\sigma}$) та ($2\cdot10^6$, σ_r^R) на координатній площині N - отах проводиться розрахункова крива втоми (рис. 1.4). Фактично розрахункова крива втоми виходить поворотом базової кривої втоми навколо точки з координатами ($N_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{т}}/\alpha_{\sigma}$). Для основних типів зварних з'єднань несучих елементів експлуатованих металоконструкцій з окремими поєднаннями факторів, які визначають їх опір втоми, розрахункова крива втоми може бути записана у вигляді:

$$\sigma = \frac{\sigma_R^r-\frac{\sigma_{\text{т}}}{\alpha_{\sigma}}}{6+lg2+lgN_{\text{т}}}lgN + \frac{(6+lg2)\cdot\frac{\sigma_{\text{т}}}{\alpha_{\sigma}}-\sigma_R^r lgN_{\text{т}}}{6+lg2+lgN_{\text{т}}}. \qquad (1.8)$$

З метою автоматизації розрахункових процедур на ПК при побудові базових та розрахункових кривих втоми може використовуватись наступний алгоритм (рис. 1.4).

1.4 Висновки та постановка задачі

Виконаний вище огляд літературних джерел показав, що конструкційні сталі, широко використовуються для будівельних робіт, проектування мостів, трубопроводів, важкого наземного транспорту, морських та наземних стаціонарних платформ. Отримання якісного зварних з'єднань сталей та сплавів потребує встановлення раціональних режимів зварювання, які забезпечують високі показники міцності і довговічності з'єднань. Для отримання якісних зварних з'єднань, окрім широко застосовних технологій зварювання плавленням використовуються перспективні технології зварювання в твердій фазі та електронно-променеве зварювання. Проектування та оцінка довговічності сучасних відповідальних конструкцій з якісними зварними з'єднаннями потребує досліджень впливу циклічних навантажень із змінними в часі

амплітудами напружень. Тому дослідження впливу технологій зварювання та режимів навантаження на характеристики опору втомі конструкційних сталей та низьколегованих сплавів різних систем легування, виконаних технологіями зварювання є важливою науково-технічною задачею, що і буде вирішено в рамках написання дисертаційної роботи.

2 ЕКСПРЕРИМЕНТАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ, МЕТОДИКИ І МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Лабораторне обладнання для визначення механічних характеристик

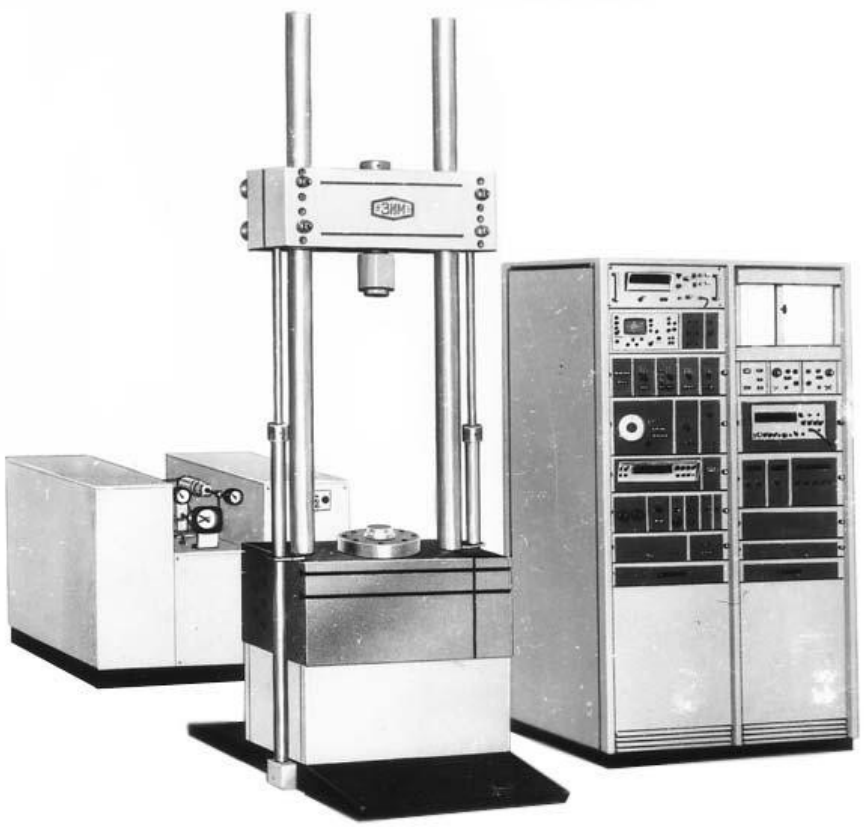


Рис. 5. Загальний вигляд дослідного комплексу для циклічного навантаження УРС-20/6000

Універсальні випробувальні машини УРС призначені для випробування на втому зразків металів розтягуванням-стисненням, вигином по ГОСТ 23026-78 при нормальній температурі, при знакозмінному і знакопостійному додатку осьового або згинального навантаження з будь-якою асиметрією, а також для випробовування на багатоциклову втому, за ГОСТ 1497-73 окремих зразків [47].

На машині можна випробовувати елементи конструкцій.

Модифікації: УРС-50/50, УРС-20/6000.

Технічні особливості. Є можливість відтворення режимів навантаження та деформування з розгорненням за частотою та програмою.

У програмному режимі втомні випробування зі зміною частоти, амплітуди циклічної складової та величини статичної складової навантаження, кількості циклів або часу на 8 ступенях програми, при цьому число блоків програми - від 1 до 99 [48]. Індикація навантаження, деформації та переміщення здійснюється цифровим вольтметром и перемещения осуществляется цифровым вольтметром.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики [48]

Найменування параметрів	УРС 20/6000	УРС 50/50
Найбільше граничне навантаження , тс	±20	±50
Граничне сатичне навантаження, тс	±20	±50
Граничне динамічне навантаження, тс	±20	±50
Похибка вимірювання статичного навантаження, % - при частоті 4х10-5 Гц до 0,5 Гц - от 0,5 Гц до 50 Гц	±2 ±3	
Робочий хід активного захвату, мм	100	
Діапазон частот циклічного навантаження, Гц	0,1...6000	4х10-5...50
Найбільша амплітуда переміщення активного захвату, мм	50	
Габаритні розміри, мм (довжина х ширина х висота)	4000 х 3000 х 3015	5800 х 4380 х 3375
Маса, кг	4800	9800

2.2 Методики експериментального дослідження при втомних випробуваннях

Експериментальні дослідження впливу виду навантаження і порядків застосування навантажень на критерій руйнування а при лінійному підсумовуванні втомних ушкоджень проводили на аналізованих таврових зварних з'єднаннях при багатоступінчастому і блоковому навантаженні з зростаючою, спадною і квазівипадковою послідовностями застосування навантажень в блоках. Відповідно, було виготовлено шість серій зразків, по три серії для багатоступінчастого та блокового навантажень.

При багатоступінчастому і блочному навантаженні зварних з'єднань порядок застосування навантажень задавали одними і тими ж п'ятьма рівнями (ступенями) максимальних напружень циклу, що прикладаються, але з різним напрацюванням кількості циклів змін напружень на кожному рівні. Так, при багатоступінчастому навантаженні напрацювання на кожному ступені навантаження становила 20% від довговічності до руйнування (n/N, = 0,20). При призначенні 20 % втомної пошкодженості на кожному рівні навантаження виходили з того, що при справедливості співвідношення (1.1) руйнування за будь-яких послідовностей навантаження в умовах багатоступінчастого навантаження повинно відбуватися на п'ятому ступені навантаження.

Довжина блоку (кількість циклів в одному блоці) при блочному навантаженні становила 115×10^3 циклів змін напруги (рис. 1.8). Встановлені лінійним підсумовуванням за співвідношенням (1.2) граничні значення суми накопичених утомних ушкоджень а при випробуваннях на втому зварних з'єднань в умовах багатоступінчастого навантаження змінюються в межах від 0,32 до 1,97 (табл. 1.4). При цьому порядок застосування навантажень істотно впливає на циклічну довговічність зварних з'єднань. Так, значення сумарної пошкодженості, отримані при випробуванні трьох зразків до руйнування, при зростаючій послідовності застосування навантажень знаходяться в межах від

0,32 до 0,56, при спадній послідовності - від 1,48 до 1,97 і при квазівипадковому вигляді навантаження - від 0,84 до 1,25.

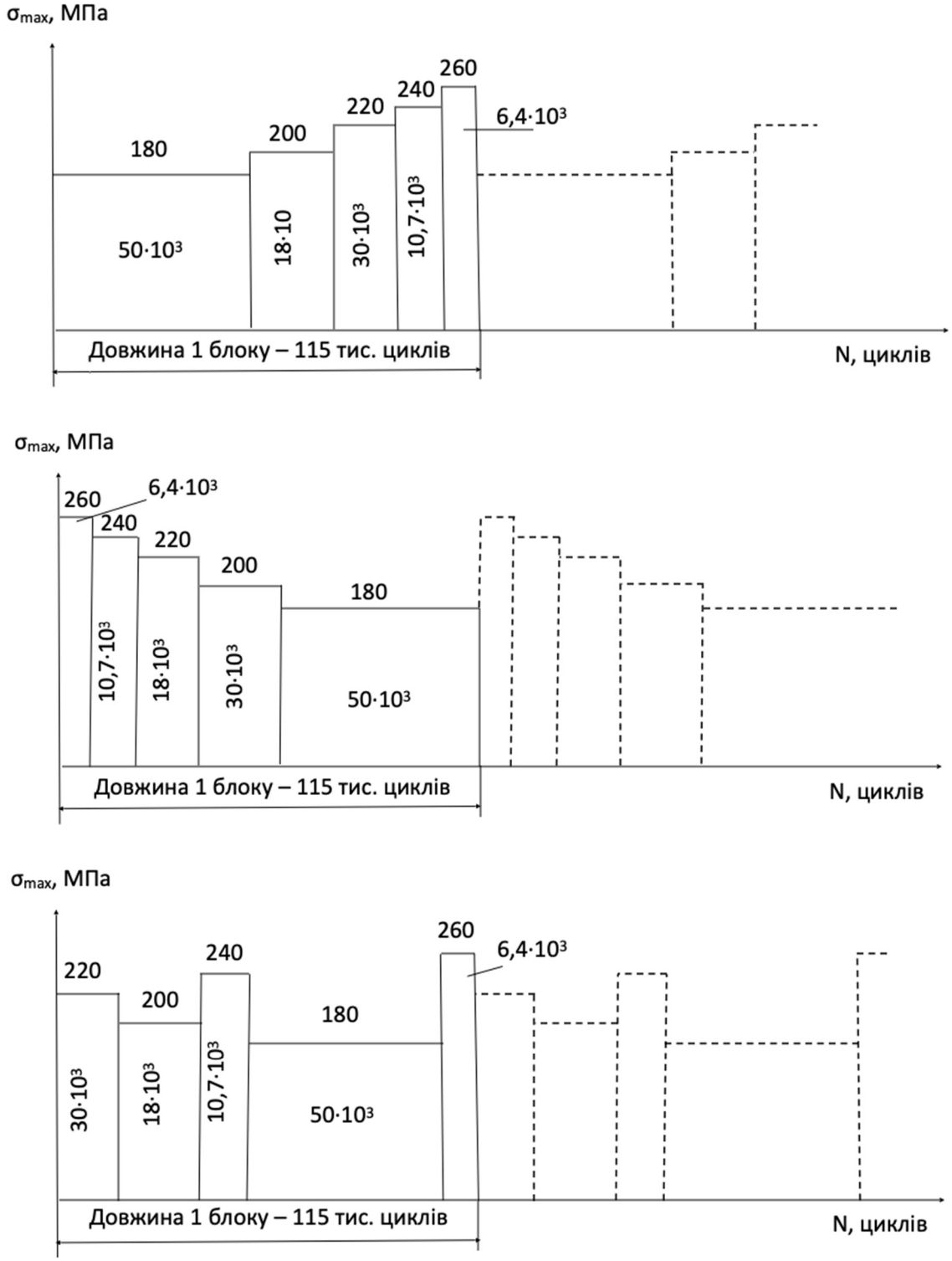


Рис. 6. Схема блочного навантаження зразків таврового зварного з’єднання сталі 09Г2С при зростаючі (а), спадаючій (б) и квазівипадковій (в) послідовностях прикладеного навантаження в кожному блоці

Ці значення величини підтверджують, що порядок застосування навантаження в зварних з'єднаннях викликає зворотний ефект в закономірностях накопичення втомних ушкоджень при використанні лінійного підсумовування втомних ушкоджень в порівнянні з основним металом [6; 14; 25].

2.3 Матеріали і підготовка зразків до випробувань

Як об'єкт дослідження було обрано зразки зварних з'єднань у вигляді пластин з приварених кутовими швами поперечними ребрами (рис. 7).

Вибір даного типу зразка пов'язаний з тим, що в таких металоконструкціях, як мости, шляхопроводи, крани, антенно-щоглові споруди тощо, до 70 % всіх зварних з'єднань виконані кутовими швами.

У літературі зварні з'єднання у вигляді пластин із приваренними ребрами жорсткості отримали назву таврових зварних з'єднань [45].

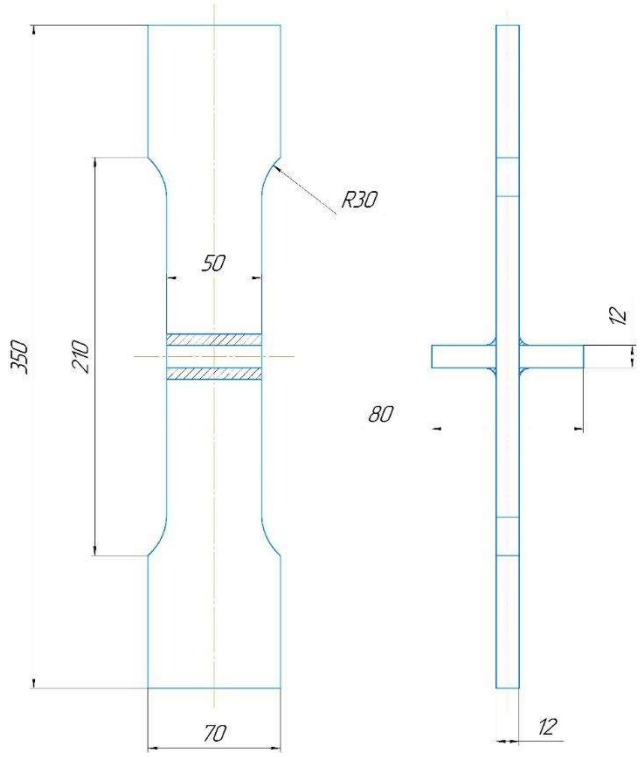


Рис. 7. Схема зразка таврового зварного з’єднання з двома поперечними ребрами

Призматичні заготовки під зразки розмірами 350×70×12 мм вирізали з широко поширеного листового прокату сталі 09Г2С-12 категорії так, щоб довга сторона була орієнтована вздовж прокату. Поперечні ребра приварювали кутовими швами з двох сторін ручним електродуговим зварюванням електродами марки УОНІ 13/55.

2.4 Висновки по розділу

В рамках розділу представлено розроблені схеми навантаження дослідних зразків для таврового поперечного з’єднання сталі 09Г2С від монотонно зростаючого і монотонно спадаючого до квазівипадкового, що більше відповідає дійсному навантаженню елементів конструкцій мостів в режимі реального часу.

Підготовка зразків проводилась згідно українських та міжнародних стандартів, для структурного аналізу та дослідження твердості. В розділі детально розглянуто форму шва. За допомогою методу отримання зображення в поляризованому світлі у темному полі було отримано знімок шва та обраховано геометричні розміри зон: зварного шва, термічного впливу та основного металу.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ СПЛАВУ 09Г2С ПРИ БАГАТОСТУПЕНЕВОМУ ТА БЛОЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

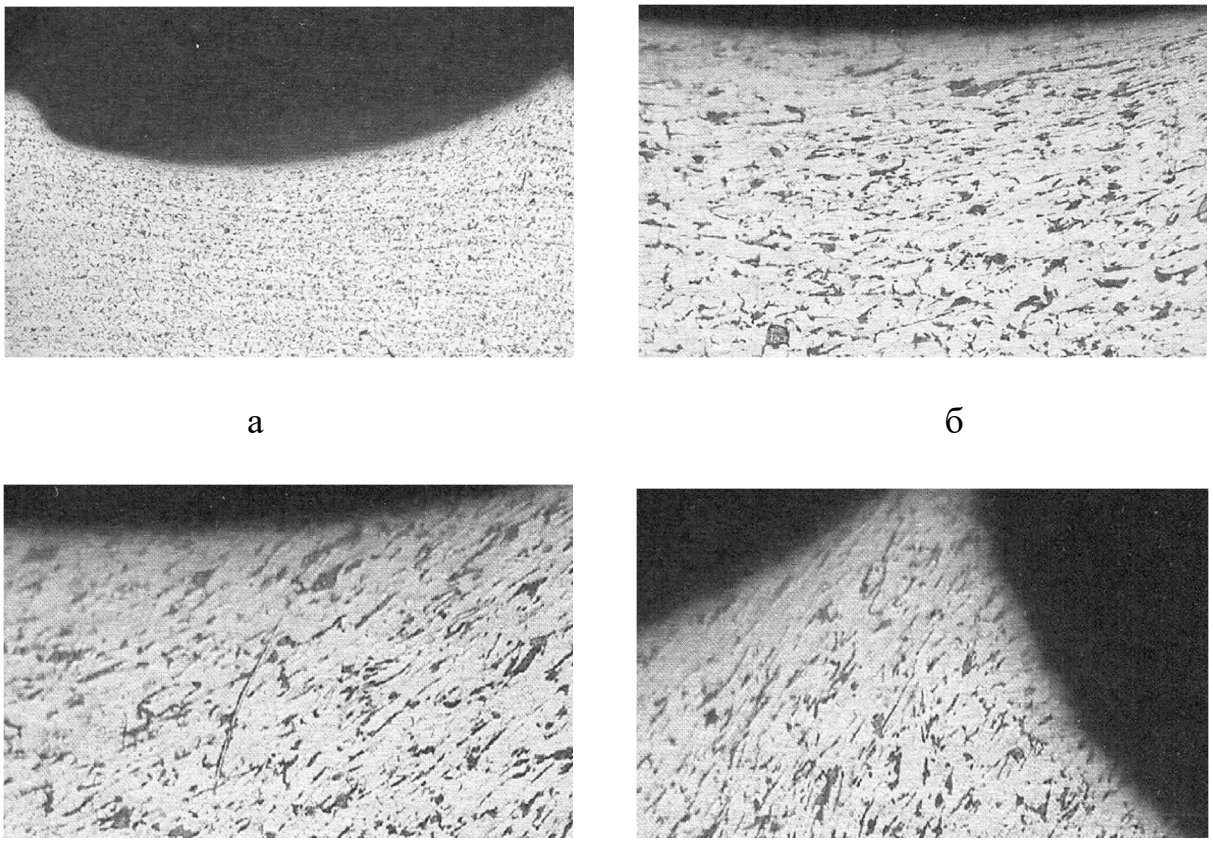
3.1 Структурний аналіз основного металу та зони зварювального з'єднання сплаву 09Г2С

Вплив розміру зерна на властивості втоми матеріалів з різними типами кристалічної решітки докладно розглянуто в монографії [104]. У роботах [105-107] показано, що поряд зі зростанням різних фізико-механічних властивостей із зменшенням розмірів зерен значно зростає опір втоми металів і сплавів. Встановлено, що внаслідок зміцнення ВМП у зоні проковки відбувається подрібнення елементів структури [25-27; 39; 48,49].

У роботах [35; 40] металографічні дослідження зеренної структури металу у зоні проковки проводили на мікрошліфах поперечного зрізу канавки. Мікрошліфи виготовляли за такою методикою. З прокатного листа завтовшки 30 мм вирізали заготовку 110×80 мм. Виробляли чистову обробку по контуру заготівлі з подальшим шліфуванням робочої поверхні заготівлі з двох сторін та відпалом. Високочастотне проковування робочої поверхні виготовленого зразка розміром 100 × 70 мм проводили однорядною чотирибойковою головкою з діаметром бойків 3 мм за трьома лініями, що віддаляються один від одного на 25 мм. Швидкість виконання ВМІ при зміцненні першої лінії становила 1 мм/с, другою – 5 мм/с, а третьою – 10 мм/с. Метою даних досліджень було встановлення характеру трансформації зерен внаслідок зміцнення технології ВМІІ залежно від швидкості обробки. Зміну структури низьколегованої сталі 09Г2С внаслідок ВМП досліджували на мікроскопі NEOFOT-32 зі збільшенням у ×50 та ×200 разів (рис. 8).

На рис. 8 а представлений загальний вигляд зони канавки. Приповерхневу зону зі структурними змінами можна умовно поділити на три області. У першій області деформовані зерна фериту розташовані практично паралельно до дна

канавки, а відповідно і поверхні зразка (рис. 8, б). Перлітна складова структури також подовжується. У міру віддалення від дна канавки до краю відбувається деяка зміна форми і напрямки зерен (область 2). У цій галузі зерна розташовані під кутом до поверхні зразка, але залишаються паралельні дотичній до поверхні канавки (рис. 8, в). На кордоні з основним металом спостерігаються поодинокі деформовані зерна, розташовані практично перпендикулярно до поверхні зразка (рис. 8, г).



а б

в г

Рис. 8. Структура стали 09Г2С в зоні канавки при різних збільшеннях: а - ×50; б, в, г - ×200

Таким чином, інтенсивна пластична деформація, що призводить до зміни форми зерна, відбувається шляхом витягування зерен у напрямку, паралельному до канавки, яка сформована поверхнею сфери торця циліндричного бойка.

Про подібну поведінку зерен у поверхневих шарах армкожелезу повідомлялося в роботі [111]: при стисканні в ультразвуковому полі спостерігалося суттєве витягування зерен у напрямку, паралельному оброблюваної поверхні. Результати аналізу формозміни зерен при інтенсивній деформації, що створюється у приповерхневому шарі стали 09Г2С технологією ВМІ, представлені у табл. 3.1.

Встановлено, що величини Кд та про залежать від швидкості виконання ВМІ (табл. 3.1). При малих швидкостях проковування значення величини $K_Ф^{ср}$ і максимальні. У роботі [51] для визначення істинної деформації поверхневого шару е при стиранні використовувався параметр Y, подібний до коефіцієнта форми зерна $K_Ф^{ср}$: $\sqrt{3e}=\gamma=a/b$, де a - довжина витягнутого зерна; b – ширина витягнутого зерна. Показано, що зміна форми зерен викликається інтенсивними деформаціями порядку $e \geq 1$. Менші ступеня деформації не призводять до формозміни зерен, а викликають накопичення та перерозподіл дислокацій усередині зерен.

Таблиця 3.1

Ступінь деформації зерен в приповерхневому шарі металу

Ділянка дослідження	Досліджувані величини	
	$K_Ф^{с}$	δ, мкм
1	11,8	200
2	6,1	500
3	3,61	600
1	8,5	125
2	6,5	150
3	2,94	245

Примітка. $K_Ф^{с}$ - коефіцієнт форми зерна (характеризує ступінь деформації зерен фериту);

δ - глибина розповсюдження зерен, що змінили форму, мкм.

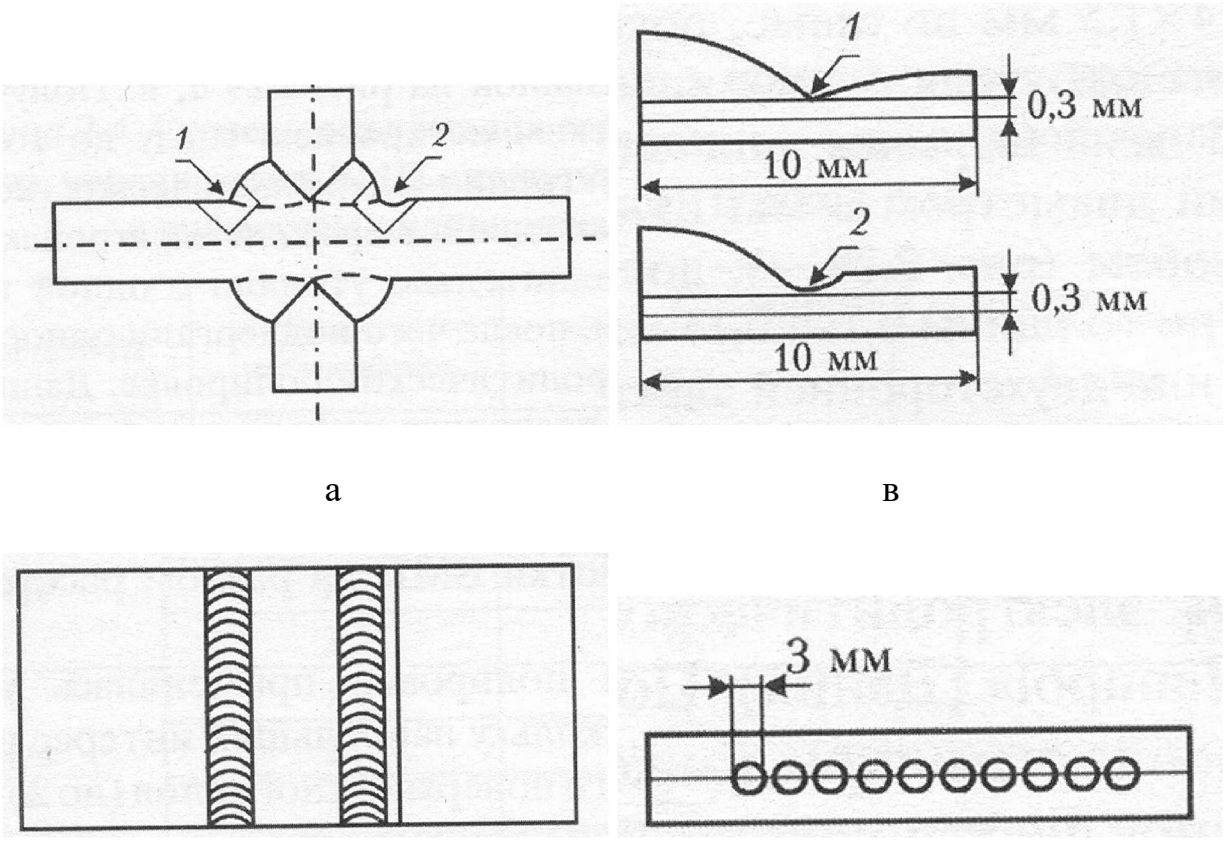
Металографічні дослідження показують, що розмір зони із значними змінами форми зерен під канавкою (зона з великим ступенем деформації e > 1) обмежений 200 мкм. При цьому глибина пластично деформованого шару металу (відповідно до вимірювань мікротвердості) досягає ~ 0,9...1,0 мм (п. 2.2). Отже, на величину мікротвердості зони проковки впливає як зміна зеренної структури металу, а й високий рівень залишкових напруг стиснення [42, 52].

У роботі [24] за допомогою електронної мікроскопії досліджували структурні зміни у тонкому поверхневому шарі металу таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С (рис. 6). Зразки для досліджень структури були підготовлені в такий спосіб. Одну сторону зварного таврового з'єднання зміцнювали по лінії переходу металу шва на основний метал (рис. 9, а, лінія 2). Потім з вихідної та зміцненої зон переходу металу шва на основний метал вирізали дві заготовки розміром 60×4×1,5 мм за схемою, показаною на рис. 9 а, ст. Отримані заготовки вгамовували механічним стиранням знизу до товщини – 0,3 мм. Зразки для електронно-мікроскопічних досліджень діаметром 3 мм із заготовок вирізали електроіскровим способом (рис. 9, г), додатково робили тоншими з однієї зі сторін до товщини 0,12..0,15 мм, після чого піддавали односторонньому або двосторонньому електролітичному поліруванню. Дана методика підготовки зразків дозволяла вивчати структуру зварних з'єднань до та після зварювання на різній відстані від поверхні.

Для електролітичного полірування застосовувалася установка фірми "Тепіро" (Данія). Оскільки найбільший інтерес представляло вивчення структури тонкого поверхневого шару (до 25 мкм), то при струминному електролітичному поліруванні зразків поверхневий шар захищався тефлоновою плівкою, яка перешкоджала попаданню на нього електроліту. Це давало змогу вивчати структуру шару на глибині 5...10 мкм від поверхні. При двосторонньому поліруванні вивчалася структура шарів на глибині 60...75 мкм. Як електроліт застосовувався розчин наступного складу: метиловий спирт - 400 мл, бутіловий

спирт - 240 мл, хлорна кислота - 40 мл. Для запобігання окисленню поверхні фольги в процесі полірування температура електроліту підтримувалась на рівні близько – 30°С. Електронно-мікроскопічні дослідження проводили на мікроскопі JM-100 CX, що просвічує, фірми JEOL (Японія).

Загальну морфологію та особливості зміни дислокаційної та комірчастої структури після високочастотного проковування вивчали в режимі світлопольного та темнопольного зображень у діапазоні збільшення від 10 до 100 крат.



а в

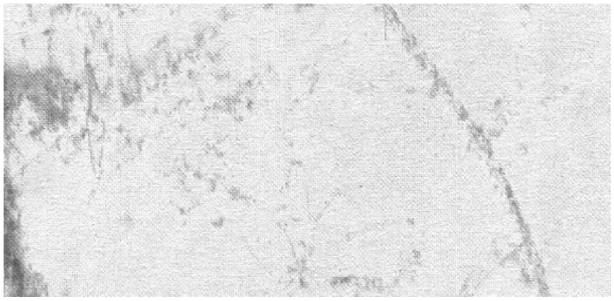
б г

Рис. 9. Схема вирізки зразків для електронно-мікроскопічних досліджень із зони переходу шва на основний метал зварного з'єднання: а - зразок таврового зварного з'єднання (1 - зона сплавлення у вихідному після зварювання стані; 2 - зона сплавлення після обробки ВМІІ); б – вид зварного з'єднання зверху; в -

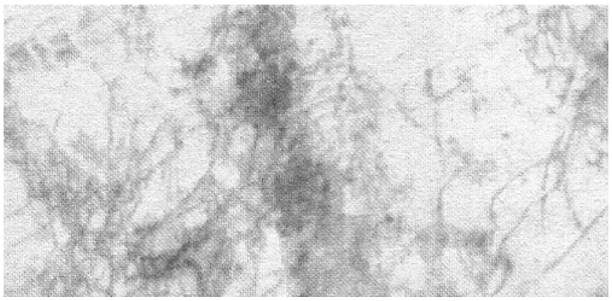
вирізка пластин уздовж шва у вихідному (1) та обробленому (2) станах; г - схема виготовлення шайб для ПЕМ

Структура сталі 09Г2С в даний час добре вивчена за допомогою металографії та електронної мікроскопії. Численні дослідження структури основного металу показали, що вона складається з двох фаз - фериту, що займає близько 70% об'єму та пластинчастого перліту. Розмір феритних зерен лежить в інтервалі значень 35..45 мкм (рис. 10 а), що перевищує в 1,5 рази даний параметр перліту (рис. 10, г).

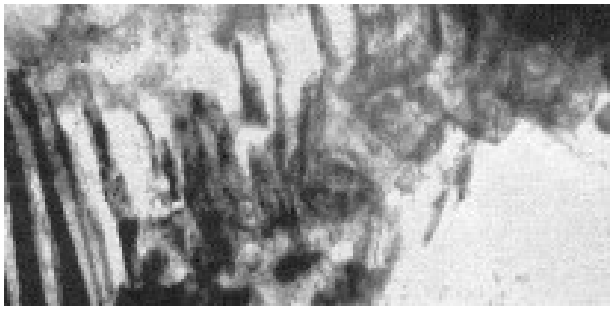
Щільність дислокацій «лісу» в обох фазах знаходиться в інтервалі 5-10 ° ... 101 ° $см^2$ (Рис. 10, в, г). У ряді випадків за межами зерен фериту спостерігаються глобулярні виділення цементиту з розмірами 0,15...0,25 мкм (рис. 10 а). Більш дрібні виділення до 0,01 мкм зосереджені на дислокаціях усередині феритних зерен (рис. 10 б). Це підтверджується присутністю на електронограмі (рис. 10 в) слабких відбитків від цементиту (вказано стрілкою). Досліджено структуру зварного з'єднання в зоні переходу шва на основний метал (рис. 11).



а



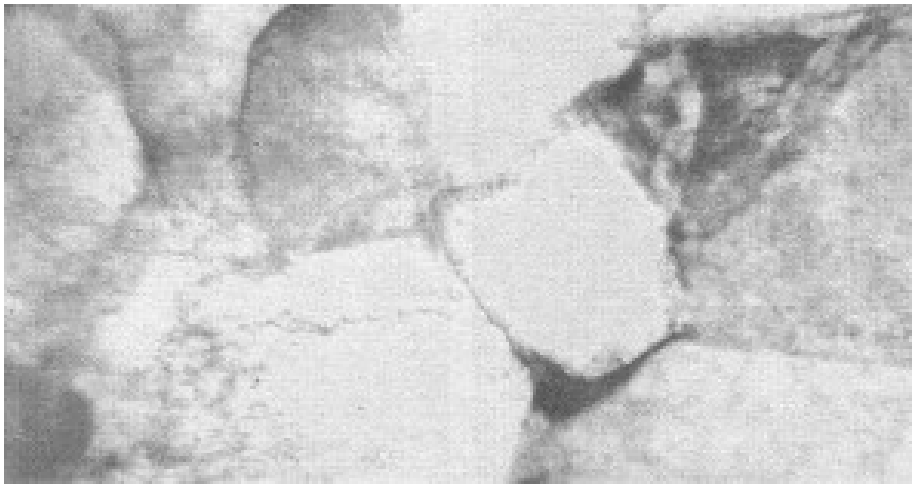
б



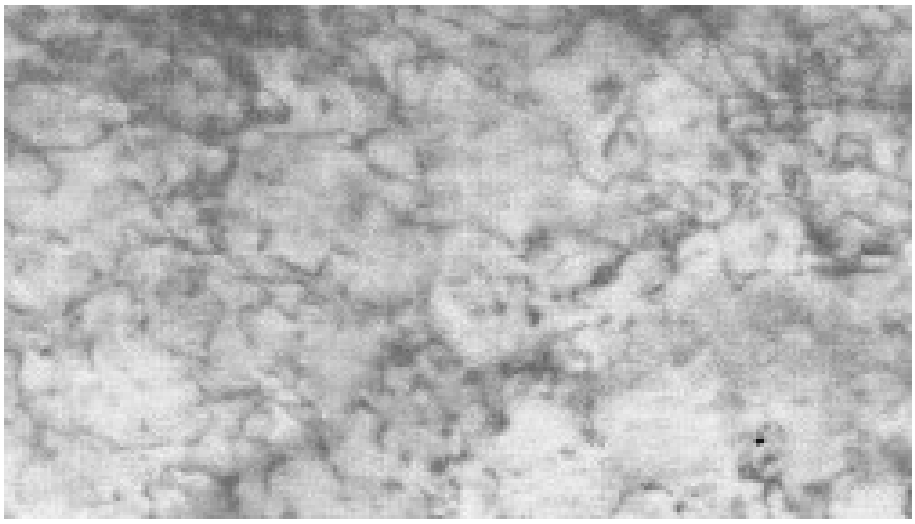
в

Рис. 10. Типові мікроструктури стали 09Г2С в областях феритних (а, б) та перлітних складових (в)

Статистичний аналіз великої кількості мікрофотографій показує, що зерна фериту в досліджуваній зоні більші. Вони в 4...5 разів перевищують середній розмір зерен у вихідному матеріалі. Перлітні колонії, як правило, також мають дещо більші розміри. Це можна пояснити суттєвим підвищенням температури у цій зоні при зварюванні. Водночас електронно-мікроскопічні дослідження виявляють у фериті комірчасті структури з розмірами осередків від 0,5 до 1,5 мкм (рис. 11 а). Спостерігається також нерівномірний розподіл густини дислокацій (від 10% до 10^{10} $см^2$) як усередині, і за межами осередків.



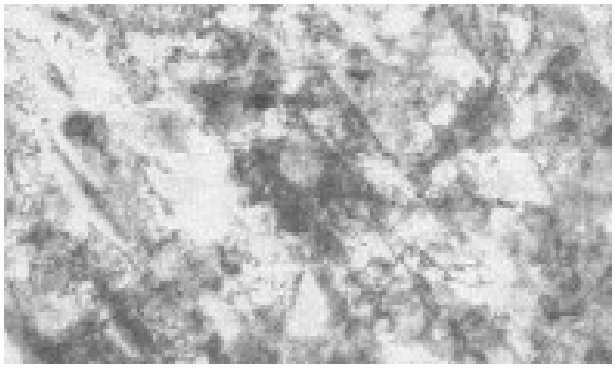
а



б

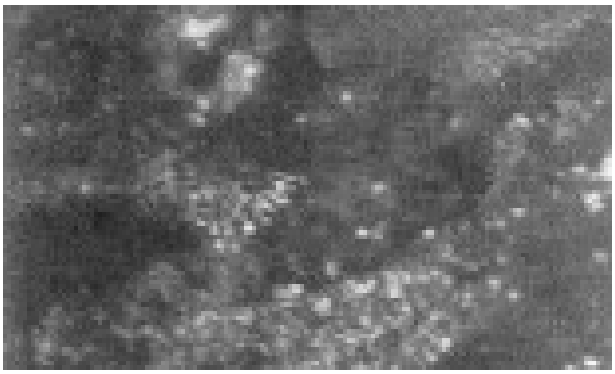
Рис. 11. Характерні мікроструктури стали у зоні переходу зварного шва (а) на основний метал (б)

Дислокації блоковані дисперсними (до 0,01 мкм) виділеннями цементиту, що підтверджується присутністю на електронограмі (рис. 2.31) відображень від цементиту (вказано стрілкою). При цьому азимутальне розорієнтування осередків вбирається у 3...4°. Подібні структури можуть утворитися внаслідок значного градієнта напруги при швидкому охолодженні зварного шва. У цьому випадку в самому шві і у вузькій навколошовній зоні виникають і зберігаються після остигання металу пікові напруги, що розтягують, що досягають межі плинності [24].



а

б



в

Рис. 12. Мікроструктури приповерхневого шару стали у зоні сплавлення зварного шва з основним металом: а, б - фотографії мікроструктури за різних збільшеннях; в - темнопольне зображення цієї ділянки

Структура у зоні переходу шва на основний метал після зварювання з'єднання наведено на рис. 12. Аналіз результатів свідчить про появу в обробленій ділянці витягнутих дисперсних елементів структури з розмірами 0,15...0,7 мкм у поперечному напрямку (рис. 12 а). Спостерігається значний розкид розмірів субзерен поряд із високою щільністю дефектів кристалічної будови, у тому числі дислокацій та подрібнених пластин цементиту. Електронограми, отримані під час зйомки з великих площ фериту після зварювання, сформовані великою кількістю точкових відбитків заліза. Це свідчить про високу щільність висококутових кордонів та значне азимутальне розорієнтування елементів структури, яка досягає 16°.

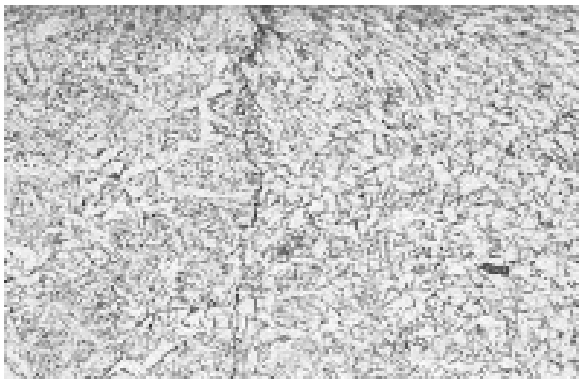
З іншого боку, можна припустити, що в тих місцях, де до обробки були присутні перлітні колонії, цементит пластинчастий в результаті термічного впливу подрібнюється (рис. 12, г). Кільцеподібні відображення на електронограмі (рис. 12, в) відповідають цементиту, пов'язані з його дисперсністю та великою кількістю частинок. Так, щодо темнопольних зображень деформованої структури у деяких зернах спостерігалися частки розміром = 10 нм (рис. 12, г). Проте слід зазначити, що однорідна нано-кристалічна структура в даному випадку не формується, а структура, що спостерігається, ближче до субмікрокристалічної з великим розкидом розмірів структурних складових. Товщина такого сильно деформованого шару становить ~25...30 мкм. Дисперсність структури та величина розорієнтування між її елементами зі збільшенням відстані від обробленої поверхні зменшуються, а щільність дислокацій знижується до вихідного рівня.

Таким чином, високочастотне проковування сприяє формуванню тонкого зміцненого шару, що складається з витягнутих дисперсних субзерен. Частка

висококутових кордонів значно перевищує їхню кількість у вихідному металі. У той же час межі, а також дислокації всередині зерен декоровані дисперсними виділеннями цементиту, щільність яких може бути високою у місцях розташування перлітних колоній, що спостерігалися до обробки. Порівняння з наявними літературними даними показує, що такі структури не вдається сформувати навіть після пластичної деформації прокаткою з граничними ступенями обтиснення. Аналіз отриманих електронограм показує, що у приповерхневих шарах при термічному впливі від зварювання формуються структури з високою щільністю дефектів кристалічної будови та розорієнтуванням між елементами структури, характерною для висококутових границь.

Встановлені суттєві структурні зміни в тонкому поверхневому шарі в зонах термічного впливу зварних з'єднань сприяють, спільно з іншими факторами, суттєвому підвищенню характеристик опору втоми з'єднань.

Оскільки зародження втомних тріщин, як правило, відбувається у поверхневих шарах, то стає зрозумілим значне підвищення опору втоми зварних з'єднань після зварювання. Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що підвищення опору втоми після зварювання пов'язане не тільки зі зменшенням концентрації напруги та формуванням залишкових стискаючих напружень, але і зі створенням у поверхневому шарі дрібнозернистої структури, що чинить опір до певної межі процесу та локалізації втомних ушкоджень.



а б

Рис. 13. Структура металу зони канавки з тріщиною втоми при різних збільшеннях: а - ×50; б - ×200

Проведено металографічні дослідження місць зародження втомних тріщин у зварних з'єднаннях після термічного впливу, як об'єкти досліджень були обрані зразки таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С. Обробку ВМПІ проводили у вихідному стані лінії переходу металу шва на основний метал. Випробування зразків на втому до зародження поверхневих тріщин проводили на сервогідравлічній машині УРС-20 при регулярному змінному нульовому розтягуванні з максимальною напругою циклу про, 200 МПа. Частота навантаження складала 5 Гц. Вивчення місць утворення тріщин проводили на мікрошліфах, що містять тріщину втоми, за допомогою мікроскопа NEOFOT-32 при збільшенні в ×50 і ×200 разів (рис. 13).

Профіль зони сплавлення після якісно виконаної обробки має плавні лінії переходу від металу шва до основного металу (відсутні гострі концентратори та напливи розклепаного металу), а тріщини втоми зароджуються безпосередньо в зоні канавки, практично по її центру.

3.2 Механічні властивості зварних з'єднань сплаву 09Г2С

Попередньо було проведено дослідження хімічного складу сталі 09Г2С, що пов’язано із можливістю суттєвої розбіжності різних партій, що виготовляються методом лиття та стандартного листового прокату. Результати наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Хімічний склад сталі 09Г2С

Марка сталі	C, %	N, %	Si, %	Mn, %	Cu, %	As, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %
09Г2С	0,12	0,08	0,5	1,7	0,3	0,08	0,04	0,04	0,3	0,3

Дослідження показали, що хімічний склад дуже близький до наведених в стандарті пспортних.

Для визначення різних властивостей матеріалів їх піддають різноманітним видам тестування. Одним із них є випробування на розрив. Під час проведення випробувань на розрив визначають дуже важливі механічні властивості матеріалів: яке максимальне навантаження витримує матеріал або виріб, яка відповідно його міцність.

Випробування на розрив (або на розтяг) здійснюють як для пластичних, так і для крихких матеріалів. Для цього використовують зразки різної форми - плоскі або циліндричні. По довжині вони також можуть бути різними - короткими або довгими. Але при цьому вони всі виготовляються за певним стандартом.

На спеціальних машинах зразки розтягують досі їх руйнування (розриву). Слід зазначити, що під час випробування швидкість не змінюється. При цьому фіксують величину навантаження та зміну довжини зразка. Таким чином визначають:

- границя плинності;
- границя пружності;
- границя пропорційності;
- границя відносного подовження;
- границя тимчасового опору розриву (або межа міцності).

Механічні властивості сталі 09Г2С наведено у відповідних табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Механічні характеристики сталі 09Г2С

Марка сталі	Товщина, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ,%
09Г2С	12	370	540	27	68

3.3 Опір втомі сплаву 09Г2С та його зварних з’єднань

Як було показано в п. 1.2, граничне значення суми накопичених втомних ушкоджень (критерій руйнування а), при якому відбувається руйнування, істотно залежить від порядку застосування навантажень. У роботах [40-46] експериментально досліджено вплив виду та порядку докладання навантажень на критерій руйнування а.

Втомні випробування зразків проводили в лабораторних умовах на електрогідравлічній випробувальній машині УРС 20 (максимальне зусилля 20 тс) при кімнатних температурах. Всі зразки зварної сполуки випробовувалися на втому при нульовому одновісному змінному розтягуванні. Форма циклів навантаження була синусоїдальною. Параметри навантаження встановлювалися та контролювалися силовимірювальними приладами, якими обладнана машина. Частота навантаження складала 5 Гц. Випробування зварних з'єднань проводилися до повного руйнування зразків, основу випробувань обмежували 2:10 циклами змін напруг.

Спочатку експериментально встановлено криві втоми таврових зварних з'єднань стали 09Г2С. Під час експерименту фіксували кількість циклів навантаження, відповідних моменту утворення тріщини довжиною 2...3 мм (МОП), досягненню тріщиною критичного розміру 15...20 мм (КРТ) та повного руйнування зразка (ПР). Отримані експериментальні дані наведено у табл. 3.4, які графічне уявлення - на рис. 1.7. 09Г2С, отримані за різними критеріями завершення випробувань.

Встановлено, що криві втоми таврових зварних з'єднань, побудовані за різними критеріями завершення випробувань, розташовуються практично

паралельно між собою. Відношення довговічностей, встановлених за різними критеріями завершення випробувань, для заданої максимальної напруги циклу залежить від рівня прикладених напружень.

Таблиця 3.4

Довговічності таврових зварних з’єднань сталі

№ зр.	σ_{max}, МПа	Циклічна довговічність, цикли			Примітка
		МОТ	КТР	ПР	
1	200	657500	772200	798300	
2	260	147900	189900	233400	
3	230	254800	340300	391300	
4	160	-	-	2107700	Не зруйн.
5	280	97300	118100	127800	
6	180	480000	556700	617400	
7	230	141300	179800	191800	
8	215	144900	164400	229400	
9	245	92400	101800	136800	
10	150	-	-	2000100	Не зруйн.

Як видно із рис. 14, утворення тріщин у досліджуваних зварних з'єднаннях відбувається, як правило, після наробки зразком = 70% довговічності до руйнування. Криві втоми зварних з'єднань, отримані за прийнятими критеріями завершення випробувань, можна вважати еквідистантними в області обмежених довговічностей і такими, що прагнуть однієї загальної асимптоти - середнього значення межі витривалості, єдиного всім критеріїв. Залежно від прийнятого критерію завершення випробувань місце перелому кривих втоми помітно зміщується. Відомо, що при напруженнях, близьких до рівня напруг у місці перелому кривої втоми, зразки можуть витримувати 100 млн. циклів змін напруги без видимих ознак руйнування [31].

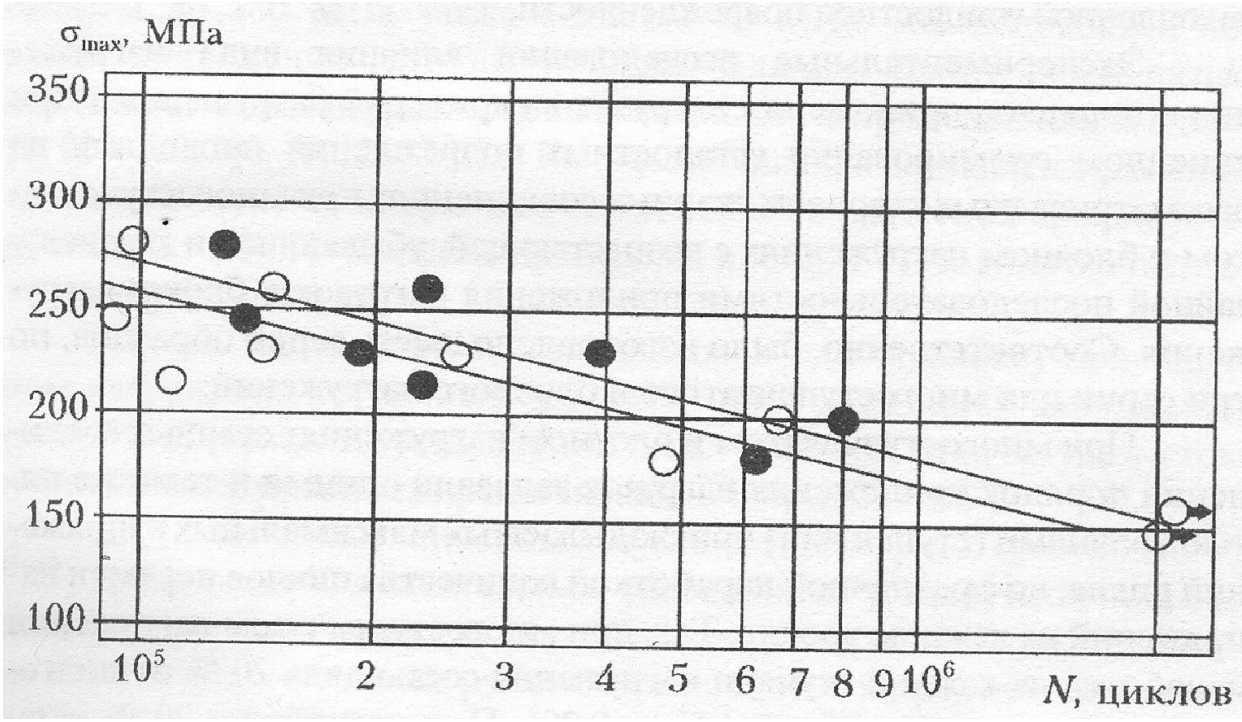


Рис. 14. Криві втоми таврових зварних з'єднань сталі 09Г2С, отримані за різними критеріями завершення випробувань: ○ та ● - відповідно по повному руйнуванню і моменту утворення тріщини довжиною 2...3 мм

Враховуючи, що, по-перше, при випробуванні серії з 10 зразків відшукати точне положення межі витривалості важко, а, по-друге, напруги нижче за межу витривалості при лінійному підсумовуванні втомних ушкоджень, як правило, не враховуються, то в подальших дослідженнях мінімальні рівні прикладених напруг при випробуваннях зразків будуть на 20 МПа вище передбачуваної межі витривалості, = 160 МПа.

Встановлені рівняння кривих втоми таврових зварних з'єднань стали 09Г2С за різними критеріями завершення иститувань мають такий вигляд: за МОП – σ_{max} 686,98 - 85,82·IgN; по КРТ – σ_{max} 652,51 - 78,62·IgN; по ПР – σ_{max}716,56 - 89,40·IgN.

Таблиця 3.5

Результати втомних випробувань таврових зварних з’єднань сталі 09Г2С при багатоступеневому навантаженні

Номер зразка №	Порядок прикладання навантаження	1-е навантаження			2-е навантаження			3-е навантаження			4-е навантаження			5-е навантаження			$\sum \frac{n_i}{N_i}$ %
		σ_{max}, МПа	n_1 тис. циклів	n_1/N_1 (%)	σ_{max}, МПа	n_2 тис. циклів	n_2/N_2 (%)	σ_{max}, МПа	n_3 тис. циклів	n_3/N_3 (%)	σ_{max}, МПа	n_4 тис. циклів	n_4/N_4 (%)	σ_{max}, МПа	n_5 тис. циклів	n_5/N_5 (%)	
1	Зростаючі	180	201	20,0	200	120	20,0	220	56	15,6	-	-	-	-	-	-	55,6
2		180	201	20,0	200	74	12,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,2
3		180	201	20,0	200	120	20,0	220	14	3,7	-	-	-	-	-	-	43,7
4	Спадаючі	260	26	20,0	240	43	20,0	220	73	20,0	200	120	20,0	180	1222	117,0	197,0
5		260	26	20,0	240	44	20,0	220	72	20,0	200	121	20,0	180	712	68,1	148,1
6		260	26	20,0	240	43	20,0	220	74	20,0	200	120	20,0	180	998	99,4	179,4
7	Квазівипадкові	220	72	20,0	200	120	20,0	240	43	20,0	180	201	20,0	260	6	4,1	84,1
8		220	73	20,0	200	121	20,0	240	42	20,0	180	201	20,0	260	58	44,7	124,7
9		220	72	20,0	200	120	20,0	240	44	20,0	180	201	20,0	260	24	18,4	98,4

Грунтуючись на тому, що стадія розвитку втомної тріщини становить лише 30% від загальної довговічності досліджуваного зварного з'єднання, для зручності як критерій завершення випробувань у подальших дослідженнях накопичення втомних ушкоджень при різних видах навантаження і послідовності застосування навантажень приймається повне руйнування зразка. Тому отриману криву втоми зварних сполук по повному руйнуванню приймали за розрахункову щодо накопиченої втомної пошкодженості.

У тих випадках, коли після п'яти послідовно прикладених рівнів навантаження руйнування зразка не відбувалося, дослідження продовжували на останньому рівні навантаження до повного руйнування. Блокове навантаження задавали чотирма блоками навантаження з напрацюванням на кожному ступені навантаження в блоці 5% від довговічності до руйнування, тобто пошкодження кожного блоку становила 25%. Відповідно до співвідношення (1.1) руйнування при будь-яких послідовностях застосування навантажень у блоці має відбуватися на п'ятому ступені четвертого блоку навантаження. У тих випадках, коли після чотирьох прикладених блоків навантаження зразок не руйнувався, блок навантаження повторювали.

Розглядали діапазон напружень 180...260 МПа, який відповідає області багатоциклової втоми 10...10° циклів змін напружень. Зростаючий порядок застосування навантажень у блоці задавали початковими максимальними напругами циклу, рівними 180 МПа на першому ступені навантаження, з подальшим збільшенням до 260 МПа (п'ятий ступінь навантаження) з кроком 20 МПа. Зменшуючий порядок застосування навантажень у блоці задавали початковим рівнем максимальної напруги циклу 260 МПа з подальшим зменшенням до 180 МПа також з кроком 20 МПа. Квазивипадковий порядок застосування навантажень у блоці задавали наступними п'ятьма послідовними рівнями максимальних напружень циклу в блоці: 220, 200, 240, 180, 260 МПа. Кількість циклів змін напружень на кожному ступені навантаження визначали за розрахунковою кривою втоми (рис. 14). Їхні значення наведені в табл. 3.5 для багатоступінчастого навантаження та на рис. 14 для блокового навантаження.

Результати втомних випробувань при багатоступінчастому і блочному навантаженні представлені в табл. 3.5-3.8.

Таблиця 3.6

Результати втомних випробувань зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при блочному навантаженні зі зростаючою послідовністю застосування навантажень у блоці

σ_{max}	*N*, тис. циклів											
	Блок навантаження 1				Блок навантаження 2				Блок навантаження 3			
	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й
180	50,2	50,2	50,2	-	50,2	50,2	50,2	5,3	50,2	50,2	50,2	-
200	30,0	30,0	30,0	-	30,0	30,0	30,0	-	30,0	30,0	30,0	-
220	18,0	18,0	-	-	18,0	18,0	18,0	-	18,0	18,0	17	-
240	12	12	-	-	12	12	12	-	12	12	-	-
260	7,2	7,2	-	-	7,2	7,2	7,2	-	7,2	7,2	-	-

Таблиця 3.7

Результати втомних випробувань зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при блочному навантаженні з спадною послідовністю застосування навантажень у блоці

σ_{max}	*N*, тис. циклів											
	Блок навантаження 1				Блок навантаження 2				Блок навантаження 3			
	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й
260	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	-	7,2	7,2	7,2	7,2
240	12	12	12	12	12	12	12	-	12	12	12	12
220	18,0	18,0	18,0	7,4	18,0	18,0	18,0	-	18,0	18,0	18,0	18,0
200	30,0	30,0	30,0	-	30,0	30,0	30,0	-	30,0	30,0	30,0	30,0
180	50,2	50,2	50,2	-	50,2	50,2	49,2	-	50,2	50,2	50,2	20,6

Таблиця 3.8

Результати втомних випробувань зразків таврового зварного з'єднання сталі 09Г2С при блочному навантаженні з квазівипадковою послідовністю докладання навантажень у блоці

σ_{max}	N, тис. циклів											
	Блок навантаження 1				Блок навантаження 2				Блок навантаження 3			
	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й
220	18,0	18,0	18,0	5,4	18,0	18,0	18,0	-	18,0	18,0	18,0	18,0
200	30,0	30,0	30,0	-	30,0	30,0	30,0	-	30,0	30,0	30,0	30,0
240	12	12	12	-	12	12	12	-	12	12	12	12
180	50,2	50,2	50,2	-	50,2	50,2	50,2	-	50,2	50,2	50,2	8,6
260	7,2	7,2	7,2	-	7,2	7,2	1,7	-	7,2	7,2	7,2	-

За отриманими результатами (табл. 3.6-3.8), використовуючи формулу (1.2), визначали критерій руйнування, а при лінійному підсумовуванні втомних ушкоджень в умовах блочного навантаження. Встановлені значення величини a змінюються в межах від 0,60 до 0,97 (табл. 3.9), при цьому порядок застосування навантажень у блоці не істотно впливає на циклічну довговічність зварних сполук при блочному навантаженні. Так, значення величини a, отримані при випробуванні трьох зразків до руйнування, при зростаючій послідовності докладання навантажень знаходяться в межах від 0,60 до 0,77, при спадній послідовності - від 0,75 до 0,97 і при квазівипадковому вигляді навантаження - від 0,71 до 0,91.

Отримані граничні значення суми накопичених втомних ушкоджень a при блочному навантаженні істотно відрізняються від експериментально встановлених при багатоступінчастому навантаженні для тих же порядків і рівнів максимальних напружень циклу, що прикладаються (табл. 3.5 і табл. 3.9). Така відмінність пояснюється такою. У разі зменшення порядку застосування максимальних напружень циклу при багатоступінчастому навантаженні після напрацювання 20% довговічності на кожній з п'яти ступенів навантаження

випробування продовжували на останньому ступені навантаження до повного руйнування зразка. Високі прикладені напруги на першому ступені навантаження приводять до релаксації залишкових зварювальних напруг в зоні концентратора, що значно знижує ушкоджуючу здатність прикладених напруг на наступних щаблях навантаження. Беручи до уваги, що рівень накопичених втомних ушкоджень на кожному ступені навантаження визначали як відношення кількості циклів напрацювання до кількості циклів до руйнування по кривій втомі, частка пошкодженості на останньому ступені навантаження становила 120% із встановленої граничної сумарної пошкодженості, що дорівнює 200% . Таким чином, рівень накопичених втомних ушкоджень на останньому ступені навантаження фактично визначив значення критерію руйнування а, характерні даному порядку застосування навантажень. При блочному навантаженні з спадним порядком застосування навантажень у кожному блоці відмінність у частках пошкоджень, що вносяться кожним ступенем навантаження в граничну сумарну пошкодженість, незначно, і зменшується зі збільшенням кількості блоків. У разі зростаючого порядку докладання максимальних напруг циклу при багатоступінчастому навантаженні з напрацюванням 20% довговічності на кожному ступені навантаження руйнування відбувалося вже на 2-му або 3-му ступенях навантаження, в той час як при блоковому навантаженні зразок кілька разів послідовно навантажувався всіма п'ятьма . Таким чином, при блочному навантаженні з зростаючим порядком докладання навантажень у кожному блоці пошкоджує здатність вищевказаного виду додатку навантажень знижується за рахунок зменшення кількості циклів напрацювання на щаблях навантаження з високими залишковими зварювальними напругами розтягування.

Зіставлення критеріїв руйнування а при квазівипадковій послідовності докладання навантажень в умовах багатоступінчастого та блочного навантажень вказує на те, що блочне навантаження для зварних з'єднань є більш шкідливим у порівнянні з багатоступінчастим. Враховуючи вищесказане та ґрунтуючись на результатах втомних випробувань (табл. 3.9), можна зробити висновок, що у разі блочного навантаження ушкодженість першого блоку навантаження залежить

від порядку застосування навантажень у блоці, а ушкодженість другого та наступних блоків навантаження однакова незалежно від порядку застосування навантаження.

Тому діапазон граничних значень суми накопичених утомних ушкоджень а при блоковому навантаженні ($E_п/N$ = 0,6 ... 0,97) значно вже діапазону значень а при багатоступінчастому навантаженні ($E_п/N$ = 0,32 ... 1 ,97). Таким чином, виходячи з встановлених експериментальних даних, при розрахунку рівня накопичених втомних ушкоджень в таврових зварних з'єднаннях стали 09Г2С з гіпотези лінійного підсумовування втомних ушкоджень для блочного навантаження незалежно від послідовності застосування навантажень в блоці слід виходити з єдиного діапазону значень критерію руйнування а [0 ...0,97].

Таблиця 3.9

Критерії руйнування зразків таврового зварного з'єднання стали 09Г2С при блочному навантаженні залежно від порядку застосування навантажень у блоці

Порядок прикладання навантаження	Гранична сумарна пошкоджуваність, $\Sigma \frac{n_i}{N_i}$			
	зразок 1	зразок 2	зразок 3	Усереднене значення
зростаюче	0,6	0,77	0,65	0,67
спадаюче	0,87	0,75	0,97	0,86
квазівипадкове	0,77	0,71	0,91	0,80

3.4 Висновки по розділу

В рамках розділу проведено серію досліджень структури для основного металу, зони термічного впливу та металу шва. Аналіз показав суттєву різнорідність при переході від однієї зони до іншої. Якщо в якості оціночного брати середній розмір зерна то він склав: 15, 25 та 30 мкмк відповідно.

Аналіз зварного з’єднання методом мікроіндентування також продемнстрував суттєву розбіжність в занченнях, проте вона була очікувана, оскількі відповідає загальній схемі розподілу тверості наведені в літературних джерелах. Відмінністю стало наявність більш твердих ділянок на границі переходу зона термічного впливу – матеріал шва. Також було виявлено слабке місце шва із тріщиною довжною 3,5 мм, що було підтверджено оптичним методом.

За результатами попередніх досліджень механічних властивостей при статичному навантажені, за побудованою кривою навантаження було обраховано границю міцності зварного з’єднання отриманого методом зварювання, що склала 540 МПа.

Визначено границю витривалості на базі 10^5 та $2 \cdot 10^6$ циклів для зварних з’єднань отриманих аргоно-дуговим зварюванням, що для сплаву 09Г2С становить 180 та 260 МПа відповідно.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті структурного аналізу встановлено закономірності розподілу зеренної будови за розміром, а також зміну ширини межзереної границі таким чином середній розмір зерна для основного металу, зони термічного

впливу та металу шва склав: 10, 15 та 18 мкмк відповідно, а ширина міжзереної границі варіюється в межах 0,2…0,3 мкм.

2. На основі експериментальних досліджень міцності, відпрацьовано режими зварювання сталі 09Г2С, які дозволили отримати якісні зварні з'єднання із показниками границі міцності 540 МПа та ударної в'язкісті металу шва на рівні 24,7 Дж/см^2, що становить, 76 % від показників основного металу.
3. Проведено дослідження границі міцності зразка із зварним тавровим з'єднання. Експериментально було встановлено границю текучості в межах 370 МПа та ударної в'язкісті металу шва на рівні 10,8 Дж/см^2, що становить, 47 % від показників основного металу..
4. Експериментально встановлені криві втоми для основного металу та зварних з'єднань сплаву 09Г2С при асиметрії циклу напружень 0,3. Показано, що обмежена границя витривалості на базі 10^5 та $2 \cdot 10^6$ циклів для зварних з'єднань становить 180 та 260 МПа відповідно, що складає близько 55% від відповідних значень основного металу. Отримані значення параметра m рівняння кривої втоми $N = B/(\Delta\sigma)^m$, які становлять: m = 19,7 для основного металу; m = 11,5 для зварного з'єднання.

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

В розділі проведено маркетинговий аналіз стартап проекту, визначені можливості та доцільність його впровадження на ринок.

Таблиця 4.1 Опис стартап-проекту

Зміст проекту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Накопичення втомних пошкоджень з'єднань сплаву 09Г2С, отриманих зварюванням.	Будівельна галузь	1) Врахування варіацій режимів навантаження
		2) Можливість максимального вичерпання ресурсу
		3) Точна оцінка границі витривалості

Запропонований автором метод оцінки зварних з'єднань дозволяє визначити необхідний рівень міцності для будь-яких режимів навантаження та довговічності, що розповсюджується по всій області зварного шва. Також розроблена методика оцінки границі витривалості зварної деталі при різних змінах характеристик навантаження відносно діючого режиму та незмінної сумарної довговічності.

4.2 Технологічний аудит

Реалізувати ідею проекту можна за допомогою проектних розрахунків.

В табл. 4.2 проведений аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	W	N	S
1.	Грошові витрати	—	—	Мій проект та конкурент
2	Складність розрахунку	—	Конкурент та мій проект	—
3	Точна оцінка границі витривалості	Конкурент	—	Мій проект
	Можливість максимального вичерпання ресурсу	—	Конкурент	Мій проект

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено в табл. 4.3

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технологія її реалізації	Наявність технології	Доступ-ність технології

1.	Визначення закономірності опору руйнуванню при багатоступеневому та блочному навантаженнях.	Теоретичний розрахунок Практичне використання	є	є
Дана технологія може бути реалізована				

Проаналізувавши стан ринку можна зробити висновок, що даний проект є рентабельним.

Визначення потенційних груп клієнтів.

Майбутніх інвесторів клієнтів та потенційних клієнтів можно умовно поділити на дві групи: первинних та потенційних споживачів продукту. Первинною групою є будівельна галузь. Надалі визначимо потенційні групи клієнтів (табл. 4.5)

Таблиця 4.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Зварних конструкцій	Будівельна галузь	фінанси	Точність та розширення можливостей абсолютного використання ресурсу

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища, складаємо таблицю факторів, що допоможуть виходу проекту на ринок , та врахування факторів, що цьому можуть перешкодити (табл. 4.6)

Таблиця 4.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Збільшення собівартості	Зменшення попиту використання	Вдосконалення вже існуючих методик
2.	Розробка покращеної методики		

Таблиця 4.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Підвищений попит у будівництві мостів	Проведення ремонтних робіт	Збільшення попиту
2.	Не потребує великих затрат на використання	Економність	Достойна оплата праці

Надалі проведемо аналіз пропозиції, визначивши загальні риси конкуренції на ринку (табл.4.8).

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конку-рентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємтва

Внутрішньогалузева ознака	Боротьба ведеться між методиками розрахунків	Заощадження коштів в наслідок введення методики
Національний рівень конкурентної боротьби	Даний ринок достатньо відкритий	Помітний вплив на модернізації галузі
Товаро-родова конкуренція за видом методики	Здатність задовольнити потреби галузі	Не велика кількість конкурентів
Тип конкуренції олгігополія	Невелика кількість під-приємств, які ведуть між собою здебільшого нецінову конкуренцію.	Не відрізняється помітним впливом
Марочна інтенсивність	Розглядаємо в якості конкурентів схожі методики	Незалежність від ринку

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл.4.9).

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Клієнти	Товари-замінники
	Немає	Бар’єрів впровадження нема	Укравтодор	Загрози з боку замінників є
Висновки:	Низька інтенсивність	Є можливість входження в галузь	Диктують умови роботи на ринку. Такі, як час на розрахунок і забезпечення потрібним програмним забезпеченням	Відсутність обмежень від замінників

З огляду на конкурентну ситуацію існує можливість виходу на ринок даної галузі. Щоб бути конкурентоспроможним на ринку даному проекту необхідно розробити програмне забезпечення для швидкісного розрахунку методики.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл.4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту табл.4.2, вимог споживачів до товару табл.4.5 та факторів маркетингового середовища табл.4.6-4.7 визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється в табл.4.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспро-можності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Менша потреба у витратих	Для методики розрахунку мала необхідність в затратах
2	Точність розрахунків	Удосконалення отримання результатів
3	Використання отриманих даних	Максимальне вичерпання ресурсу

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл.4.10) проведемо аналіз сильних та слабких сторін мого стартап-проекту (табл.4.11).

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл.4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл.4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Безпечне вичерпання ресурсу елементів	Слабкі сторони: відсутність програмної підтримки методики
Можливості: завоювання всієї галузі	Загрози: розробка кращої методики

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх

ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл.4.13).

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Публічне ознайомлення, перевірка з існуючими методиками (аналогами), державне затвердження	Висока	8 місяці
2	Публічне ознайомлення, перевірка на справжньому експерименті, державне затвердження	Висока	3.5 роки

Із зазначених альтернатив виберемо першу, бо отримання ресурсів є більш простим та ймовірним а строки реалізації – більш стислими.

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл.4.14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Укравтодор	Повністю готові	Високий	Середня	Просто

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл.4.15).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Альтернативна	Охоплення на 60-70 %	Конк.№1 та Конк№2	Спеціалізація

Далі виберемо стратегію конкурентної поведінки (табл.4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики то-вару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Так	Копіювати лише загально використані ідеї	Стратегія заняття галузі

Результатом даного підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку:

– використання в проекті сучасних технологій;

– напрям роботи лише у заданій ніші ринку.

Результати маркетингового дослідження:

- даний стартап-проект є актуальним, тому що може вивести машинобудівну галузь на наступну сходинку
- мала кількість конкурентів
- унікальність ідеї
- впровадження в ринок є абсолютно доцільним, прибутковим.

Список використаних джерел

1. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций. / В. И. Труфяков // Автоматическая сварка. – 1998. - №11. - С. 11-19

2. Седов А.А. Прогнозирование долговечности конструкционных материалов и технических объектов при регулярном и нерегулярном циклическом нагружении: дис. канд. техн. наук.: 01.02.04. / ВолгГТУ. Волгоград, 2015. 158 с.

3. Савоськин А.Н. и др. Прочность и безотказность состава железных дорог. под ред. А. Н. Савоськина. М.:Машиностроение, 1990. 288 с.

4. Акт технического расследования причин аварии, происшедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества РусГидро Саяно-Шушенская 156 ГЭС имени П.С. Непорожнего. URL:http://www.energystate.ru/news/files/Sayano-Shushens.

5. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. Пер. с англ. М.Мир. 1984. 624 с.

6. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. Int J Fatigue. 1998. Vol. 20(1) P. 9–34.

7. Hobbacher A.F., Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, 2nd edition, IIW document IIW-2259-15. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 143 c.

8. Palmgren A.L. Endurance of ball bearings. VDI Zeitschrift. Vol. 68. 1924. P. 339.

9. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue. Trans. ASME, J. Appl. Mech. Vol. 12. No. 3. September 1945. P. 159–164.

10. Schutz, W. Fatigue Life Prediction of Aircraft Structirs-past, present and Future. Engineering Fracture Mechanics. 1974. № 6. P. 745–773.

11. Schutz W., Zenner H., Werkst Z. Schadensakkumulations Hypothese zur Lebendauervorhersage beischwingender. Beanspruchung Techn. 1973. Vol.4. P. 23–33.

12. Schutz W. Fatigue Life prediction of aircraft Structures. Eng. Frac. Mech. 1974. Vol. 6. P. 745–773.

13. Методы расчета деталей машин на выносливость в вероятностном аспекте: методические указания. М.Изд. стандартов, 1980. 32 с.

14. Berger C., Eulitz K., Heuler P., Kotte K., Naundorf H., Schuetz W., Sonsino C M., Wimmer A., Zenner H., 2002: Betriebsfestigkeit in Germany an overview. Int. J. Fatigue. Vol. 24. no. 6. P. 603-625.

15. Gurney TR., Cumulative Damage of Welded Joints. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2006. 465 p.

16. Hobbacher A. IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. The Welding Research Council. New York, 2009. 144 p.

17. Buxbaum O. Structural Durability, Safe and Economic Design of Fatigue Critical Components. 2nd Edition. Verlag Stahleisen. Düsseldorf, 1992.

18. Sonsino C.M. : Fatigue testing under variable amplitude loading. Int. J. Fatigue 29 2007. P. 1080-1089.

19. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.:Наука, 1966. 452 с.

20. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.:Наука, 1974. 312 с.

21. Corten, H.T., Dolan T.J. Cumulative fatigue damage. Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals. Institution of Mechanical Engineers, ASME. 1956. P. 235–246.

22. Серенсен, С.В. Накопление усталостного повреждения при нестационарной напряженности. Вопросы механической усталости: сб. тр. М., 1964. С. 139–147.

23. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

24. Langer, B.F. Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. ASME. Journal of Applied Mechanics. 1937. N 59. P. 160–162.

25. Ellyin F. Cyclic strain energy density as a criterion for multiaxial failure fatigue (Edited by M. W. Brown and K. J. Miller). London, Mechanical Engineering Publications. 1989. P. 571-583.

26. Golos K.M. A total strain energy density model of metal fatigue. Probems of Strength. 1995. N 1. P. 53-64.

27. Morrow J.D. Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity. ASTM Specical Technical Publication. No. 37. Philadelphia, 1965. 72 p.

28. Schijve, J. Fatigue prediction and scatter. Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 1997. Vol. 17, No 4. P. 381–396.

29. Schijve J. Fatigue of structures and materials. 2-nd. Ed.. Springer. Berlin, 2009. 623 p.

30. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. 226 с.

31. Коротких, Ю.Г., Волков И.А., Маковкин Г.А.Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов. Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 1997. Ч. 2. 227 с.

32. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А., Цыбанев Г.В. Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев. Киев:Наукова думка, 1979. 105 с.

33. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев:Наукова думка, 1981. 344 с.

34. Трощенко В.Т., Драган В.И. Исследование закономерностей неупругого деформирования и усталостного разрушения металлов при кручении. Проблемы прочности. 1982. № 5. С. 3-10.

35. Трощенко В.Т., Фомичев П.А. Энергетический критерий усталостного разрушения. Проблемы прочности. 1993. № 1. С. 3-10.

36. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А., Мищенко Ю.Д.. Исследование выносливости сталей 45 и 1Х2М в условиях мягкого и жесткого режимов нагружения при больших долговечностях. Проблемы прочности. 1977. № 10. С. 11-17.

37. Haibach E. BetriebsfestigkeitVerfahren und Daten zur Berechnung (Structural durabilityMethods and data for calculation). 2nd ed. Duesseldorf: VDI-Verlag, 2003. 759 p.

38. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / [В. И. Труфяков, В. И. Дворецкий, П. П. Михеев и др.]. – Киев: Наукова думка, 1990. – 256 с. – (Под ред. В. И. Труфякова; АН УССР. Институт электросварки им. Е. О. Патона).

39. Навроцкий Д. И. Расчёт сварных конструкций с учётом концентрации напряжений / Д. И. Навроцкий. – Ленинград: Машиностроение, 1968. – 170 с.

40. Vorob'ev E. V. Strain-hardening of notched steel specimens during their deep cooling down to 4.2 K / E. V. Vorob'ev, V. A. Strizhalo, T. V. Anpilogova // Strength of Materials. – 2017. – № 5 (49). – P. 613–617.

41. Maddox S. J. Fatigue strength of welded structures / S. J. Maddox. – Abington Publishing: Abington Hall, Abington, Cambridge, 1991. – 198 p. – (Second edition).

42. Hobbacher A. F. Effective notch stress method in comparison with other methods in fatigue design of welded structures / A. F. Hobbacher // The Paton Welding Journal. – 2003. – №10-11. – P. 117–121.

43. Maddox S. J. Review of fatigue design rules for welded structures / S. J. Maddox // The Paton Welding Journal. – 2003. – №10-11. – P. 94–99.

44. Stress analysis and fatigue of welded structures / [A. Chattopadhyay, G. Glinka, M. El-Zein et al.] // Welding in the World. – 2011. – № 7-8 (55). – P. 2–21.

45. Клыков Н. А. Расчёт характеристик сопротивления усталости сварных соединений / Н. А. Клыков. – Москва: Машиностроение, 1984. – 160 с.

46. Коростылёв Л. И. Анализ и классификация методов оценки усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна / Л. И. Коростылёв, Д. Ю. Литвиненко // Вестник ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 3 (37). – С. 104–118.

47. Кудрявцев И. В. Усталость сварных конструкций / И. В. Кудрявцев, Н. Е. Наумченков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 270 с.

48. Бельчук Г. А. О некоторых закономерностях формирования сварного шва в месте сопряжения шва с основным металлом / Г. А. Бельчук, В. С. Налетов // Сварка в судостроении. – 1972. – № 79. – С. 32–35.

49. Бельчук Г. А. Сварные соединения в корпусных конструкциях / Г. А. Бельчук. – Ленинград: Судостроение, 1969. – 280 с.

50. Аснис А. Е. Влияние радиуса сопряжения шва с основным металлом на сопротивление усталости сварных соединений / А. Е. Аснис, Г. А. Иващенко, Я. Э. Андерсон // Автоматическая сварка. – 1982. – № 4. – С. 48–51.

51. Пацкевич И. Р. Поверхностные явления при сварке металлов / И. Р. Пацкевич, В. Р. Рябов, Г. Ф. Деев. – Киев: Наукова думка, 1991. – 240 с.

52. Панков В. В. Мера формы сварного шва как основа разработки цифровых технологий оценки качества сварных швов / В. В. Панков, С. В. Панков, И. Г. Богородский, В. М. Букин // Журнал нефтегазового строительства. – 2015. – № 2. – С. 20–26.

53. Наказ міністерства інфраструктири України. Стратегічний план розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: https://mtu.gov.ua/files/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F%20%D0%9D%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%B7%20547.pdf

54. Укрзалізниця [Електронний ресурс] // Матеріал з Вікіпедії — вільної енциклопедії. Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8F#cite_note-CFP-2016_EN-5

55. Пояснювальна записка до консолідованого проекту фінансового плану ПАТ “Українська залізниця” на 2016 рік. [Електронний ресурс] Режим доступу

до ресурсу: https://docs.google.com/viewer?embedded=true&url=http://mtu.gov.ua/files/%D0%9F%D0%97%20%D0%B4%D0%BE%20%D0%A4%D0%9F%20%D0%9F%D0%90%D0%A2%20%D0%A3%D0%97%20%D0%BD%D0%B0%202016%20%D1%80%D1%96%D0%BA.docx

56. Булинский, А. В. Теория случайных процессов [Текст] / А.В. Булинский, А.Н. Ширяев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 408 с.

57. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст]: учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

58. Мурадян Л. А. Опис відмов вагона при технологічному процесі виготовлення структурних елементів. [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: http://csw.kart.edu.ua/article/viewFile/92507/88286

59. S. Myamlin, D. Baranovskiy. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing [Електронний ресурс] / S. Myamlin, D. Baranovskiy // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Проблеми економіки транспорту. - 2014. - Вип. 7. - С. 61-66. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnuzt_pet_2014_7_10

60. Мурадян, Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності [Текст] / Л. А. Мурадян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 52 (1161). – С.127-130.

61. Мямлін, С. В. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та вивчення надійності вантажних вагонів [Текст] / С. В. Мямлін, Л. А.Мурадян, Д. М. Барановський // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 110–117. – doi: 10.15802/stp2015/57034.

62. Барановський Д. М. // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 110–117. – doi: 10.15802/stp2015/57034.

63. Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines / L.P. Lingaitis, S. Mjamlin, D. Baranovsky, V. Jastremskas // Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability. – 2012. – Vol. 14, № 2. – P. 154-159.

64. Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotyves Engines [Text] / L.P. Lingaitis, S. Mjamlin, D. Baranovsky, V. Jastremskas // Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability. – 2012. – № 1. – P. 5

65. Серенсен С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен. – М: Машгиз, 1963.

66. Иванова, В. С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов [Текст] / В. С. Иванова. – М.: Наука, 1992. – 160 с.

67. Балтер, М. А. Упрочнение деталей машин [Текст] / М. А. Балтер. – М.: Машиностроение, 1978. - 184 с.

68. Мурадян Л.А. Граничнний ресурс вагона в процесі експлуатації. [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: http://csw.kart.edu.ua/article/view/92809

69. Серенсен С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен. – М: Машгиз, 1963.

70. Кордонский Х. Б. Приложение теории вероятности в инженерном деле / Х. Б. Кордонский. – М: Физматгиз, 1962.

71. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности / Я. Б. Шор. – М, 1962.

72. Кочерга В. Г. Расчет показателей надежности / Кочерга В. Г. – Хабаровск, 2011.