

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**БАБАК АНТОН МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 539.4

**МАЛОЦИКЛОВА ВТОМА ПОВЕРХНЕВО ЗМІЩЕНИХ  
КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
З ВРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖУВАНOSTI**

05.02.09 – динаміка та міцність машин

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі динаміки та міцності машин і опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: член-кореспондент  
Національної академії наук України,  
доктор технічних наук, професор  
**Бобир Микола Іванович**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського»,  
директор механіко-машинобудівного інституту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Ігнатович Сергій Ромуальдович**  
Національний авіаційний університет, завідувач  
кафедри конструкції літальних апаратів  
кандидат технічних наук  
**Булах Павло Олександрович**  
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН  
України,  
старший науковий співробітник відділу механіки  
конструкційних матеріалів

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р., о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.01 при Національному технічному університеті України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. №1, ауд. №166.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.О. Боронко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Робота присвячена вирішенню проблеми оцінки довговічності (ресурсу) конструктивних елементів з врахуванням пошкоджуваності, зокрема впливу поверхневого пластичного деформування (ППД) на міцність та довговічність силових конструктивних елементів з функціональними отворами.

В елементах конструкцій різного призначення наявні концентратори напружень у вигляді отворів, проточок, канавок та ін., що призводять до зниження циклічної міцності та впливають на ресурс. Для підвищення довговічності відповідальних елементів конструкцій використовують додаткові технологічні операції, наприклад поверхневе зміцнення деталей. Зародженню втомних макротріщин передують первинна стадія накопичення пошкоджень в матеріалі у вигляді виникнення мікропор та мікротріщин, але закономірності накопичення та подальшого розвитку таких пошкоджень на мікро та мезорівнях на сьогодні не вивчені повністю.

На сьогоднішній день відомо, що явище пружно-пластичного деформування конструкційних металевих матеріалів супроводжується зміною їх фізико-механічних властивостей. Для описання цього процесу широко використовується параметр пошкоджуваності, запропонований в роботах Качанова Л.М. та Работнова Ю.М., який у загальному може бути визначений через відповідну оцінку рівня деградації основних фізико механічних характеристик конструкційних матеріалів або на основі основних положень термодинаміки незворотних процесів. Проте у переважній більшості методів розрахунку елементів конструкцій використовуються параметри матеріалів, які отримують, як правило, з умовної діаграми статичного деформування, що не враховує процеси пов'язані з накопиченням мікропошкоджень у об'ємі матеріалу протягом всього часу його навантажування (деформування).

Врахування технології виготовлення та обробки зон концентраторів, їх розмірів, а також впливу залишкових пластичних деформацій та технологічних напружень на мікомеханізми зародження втомних тріщин, є актуальною науково – прикладною задачею. Таким чином, створення нового методу розрахунку довговічності поверхнево зміцнених конструктивних елементів з врахуванням впливу пошкоджуваності за умов малоциклового навантаження є актуальною науковою та практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі динаміки та міцності машин і опору матеріалів механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут за держбюджетними темами: «Розроблення нових феноменологічних моделей та узагальненого методу прогнозування ресурсу експлуатації елементів конструкцій із композиційних матеріалів з врахуванням пошкоджуваності» (державний реєстраційний №0109U001607), «Розроблення методу діагностики технічного стану та прогнозування ресурсу конструкцій з урахуванням технологічної і експлуатаційної спадковості» (державний реєстраційний №0106U002266), та підтемою «Розробка методу прогнозування ресурсу конструктивних елементів крила літака на стадії зародження макротріщини з урахуванням кінетики накопичення розсіяних пошкоджень» (державний

реєстраційний №0113U001855) комплексної НДР «Вплив конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів на довговічність силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами» (державний реєстраційний №0113U000249).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка методу оцінки довговічності силових конструктивних елементів з функціональними отворами за параметром малоциклової втоми, який враховує вплив параметру пошкоджуваності та рівня ППД. Задачами досліджень є:

- Аналіз конструктивно-технологічних методів поверхневого зміцнення функціональних отворів конструктивних елементів;
- Дослідження кінетики накопичення пошкоджень під час пружно-пластичного деформування алюмінієвого сплаву Д16чТ за умов статичного та малоциклового ( $R\sigma=0$ ) навантаження;
- Чисельне моделювання процесу пружно-пластичного деформування при дорнуванні отворів у пластинці виготовленої з матеріалу Д16чТ. Аналіз впливу величини ППД на розподіл максимальних напружень та початкової технологічної пошкоджуваності у околі отвору;
- Оцінка впливу параметру пошкоджуваності та залишкових напружень після ППД на ресурс конструктивних елементів з функціональними отворами при малоциклової втоми;
- Розроблення феноменологічної моделі, яка враховує рівень пластичних деформацій у функціональних отворах конструктивних елементах з урахуванням кінетики накопичення пошкоджень;
- Порівняння експериментально отриманих величин довговічності конструктивного елемента з результатами аналітичних розрахунків. Встановлення границі використання запропонованого методу оцінки довговічності.

*Об'єкт дослідження:* малоциклове деформування силових елементів конструкцій з функціональними отворами, які виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16чТ  
*Предмет дослідження:* довговічність силових елементів конструкцій з функціональними отворами за умов малоциклової втоми з урахуванням пошкоджуваності.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених задач використовувались експериментальні і теоретичні методи визначення закономірностей накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах та конструктивних елементах за умов статичного та малоциклового навантаження (деформування), що базуються на основі положень континуальної механіки пошкоджуваності та механіки твердого деформованого тіла. Розрахункові методи базуються на основі методу скінченних елементів, методу найменших квадратів, методів статистичної обробки експериментальних даних та регресійного аналізу.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

– розроблено метод оцінки довговічності, що враховує рівень ППД та вплив зовнішнього експлуатаційного навантаження для конструктивних елементів з урахуванням кінетики накопичення пошкоджень, для алюмінієвого сплаву Д16чТ;

– отримано нові залежності для параметра пошкоджуваності від рівня ППД в зоні технологічного отвору при дії експлуатаційного навантаження ;

– на основі досліджень встановлено, що збільшення рівня залишкових напружень після ППД позитивно впливає на збільшення кількості циклів до руйнування, показано, що при рівні незворотньої деформації 3% концентратор напружень( у вигляді отвору) не впливає на довговічність;

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у використанні розробленої моделі оцінювання довговічності конструктивних елементів з функціональними отворами з урахуванням впливу рівня поверхневого пластичного деформування, за умов малоциклового навантаження в авіабудівній та космічній галузі.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на ДП «Антонов».

**Особистий внесок здобувача.** Роботу виконано під науковим керівництвом член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Бобиря М.І. Основні результати, що становлять суть дисертаційної роботи, автор отримав самостійно. У публікаціях написаних у співавторстві здобувачеві належать проведення експериментальних досліджень, чисельні розрахунки конструктивних елементів, визначення кінетики накопичення пошкоджень на залишковий ресурс конструктивних елементів з функціональними отворами для випадків малоциклового навантаження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідалися на міжнародних конференціях «Прогресивна техніка і технологія» (м. Севастополь, м. Київ, м. Одеса, 2006 – 2018), «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти (м. Київ, м. 2016), «Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні технології промислового комплексу"» (м. Херсон, 2016), Повністю робота доповідалась на XX міжнародній науково -технічній конференції «Прогресивна техніка і технологія» (м. Херсон , 2019) та засіданні кафедри ДММ та ОМ КПП ім. Ігоря Сікорського

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено в 8 наукових працях, з них 6 статей у фахових виданнях (з яких 5 в українських виданнях, що входять до наукометричних баз даних та одна стаття у державі, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку) та 2 тез доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 171 сторінок, у тому числі основного тексту дисертації 136 сторінки, 113 рисунків, 13-ть таблиць, список використаних джерел зі 118 найменувань на 11-ти сторінках, додатків на 4 сторінках, що містять 1 рисунок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначена актуальність теми дослідження, сформульовані мета та задачі дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження. Визначена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами, апробації результатів, та публікацій за темою дисертаційної роботи з визначенням власного внеску автора.

У першому розділі проведено критичний аналіз сучасних підходів щодо прогнозування ресурсу (в тому числі залишкового) для конструкцій, що містять технологічні концентратори напружень. Розглянуті сучасні методи оцінки міцності та довговічності для умов малоциклового термосилового експлуатаційного навантаження, що базуються на різних підходах.

Відмічено, що пружно -пластичне деформування конструкційних матеріалів супроводжується зміною його фізико – механічних властивостей. Кількісною оцінкою цього процесу може виступати скалярний параметр пошкоджуваності, який було обґрунтовано в роботах Качанова Л.М. та Работнова Ю.М. Так, для широкого кола пластичних металічних конструкційних матеріалів він може бути представлений у вигляді :

$$D = 1 - \frac{\tilde{F}}{F_0} \quad (1)$$

де  $D$  – параметр пошкоджуваності  $F_0$  – загальна площа перерізу,  $\tilde{F}$  – ефективна площа перерізу (площа без врахування мікродефектів). Відзначено, що, у деяких випадках, оцінка параметра пошкоджуваності може здійснюватися на основі дослідження зміни макрохарактеристик досліджуваного матеріалу.

Розглянуто основні підходи щодо визначення кінетики накопичення пошкоджень для умов циклічного навантаження. Вони, як правило, враховують вид зміцнення та характеристики петлі гістерезису, як найбільш характерні параметри, що використовуються при описі процесу циклічного пружнопластичного деформування.

Проте, проведений аналіз наукових праць показує, що на даний момент відсутні методи оцінки довговічності, які дозволяють ефективно врахувати вплив кінетики накопичення пошкоджень в матеріалі. Крім того, великі складнощі при розрахунках виникають за наявності градієнтів напружень (деформацій), викликаних присутністю технологічних концентраторів напружень.

За результатом проведеного аналізу розглянутих наукових праць були зроблені висновки, сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений детальному опису експериментальної методики визначення основних фізико-механічних характеристик сплаву Д16чТ та експериментальній оцінці впливу рівня пружно-пластичного деформування на величину параметра пошкоджуваності матеріалу. Наведено загальний опис модернізованих випробувальних стендів, створених на базі випробувальних установок TIRAtest 2300 та Vi-02-112. Похибка експериментально отриманих даних, на модернізованому обладнанні, за каналами зусилля та деформації не перевищує 1%, при цьому частота зчитування може регулюватися у досить широкому діапазоні

безпосередньо оператором обладнання. Розроблене, при модернізації стендів, програмне забезпечення, дозволяє у реальному часі виводити графіки зміни експериментальних даних за часом. Представлена методика статистичної обробки даних експерименту.

Відповідно до поставлених у роботі задач була розроблена комплексна програма досліджень, що включає в себе вивчення основних закономірностей зміни механічних характеристик матеріалу (на прикладі модуля Юнга першого роду та коефіцієнта Пуассона) при його статичному пружно-пластичному деформуванні та проведення випробувань при циклічному пульсуючому навантаженні. Реалізація цієї програми дозволила отримати експериментальні криві для кінетики накопичення пошкоджуваності за умов статичного та циклічного пульсуючого навантаження та експериментально оцінити величину довговічності конструктивного елементу за різних рівнів поверхневого зміцнення отвору.

Для створення різних рівнів пластичного деформування у околі отвору було застосовано технологічний процес дорнування. Методика проектування дорна з обґрунтуванням всіх його геометричних параметрів детально наведена у розділі 2. В рамках відтворення процесу дорнування було реалізовано три рівні пластичного деформування, що дозволяє оцінити вплив величини початкової пластичної деформації на довговічність конструктивного елемента. Різний рівень поверхневого пластичного деформування отворів забезпечувався зміною початкового діаметру отворів в зразках. Процес та схема дорнування отворів представлено на рис.1.

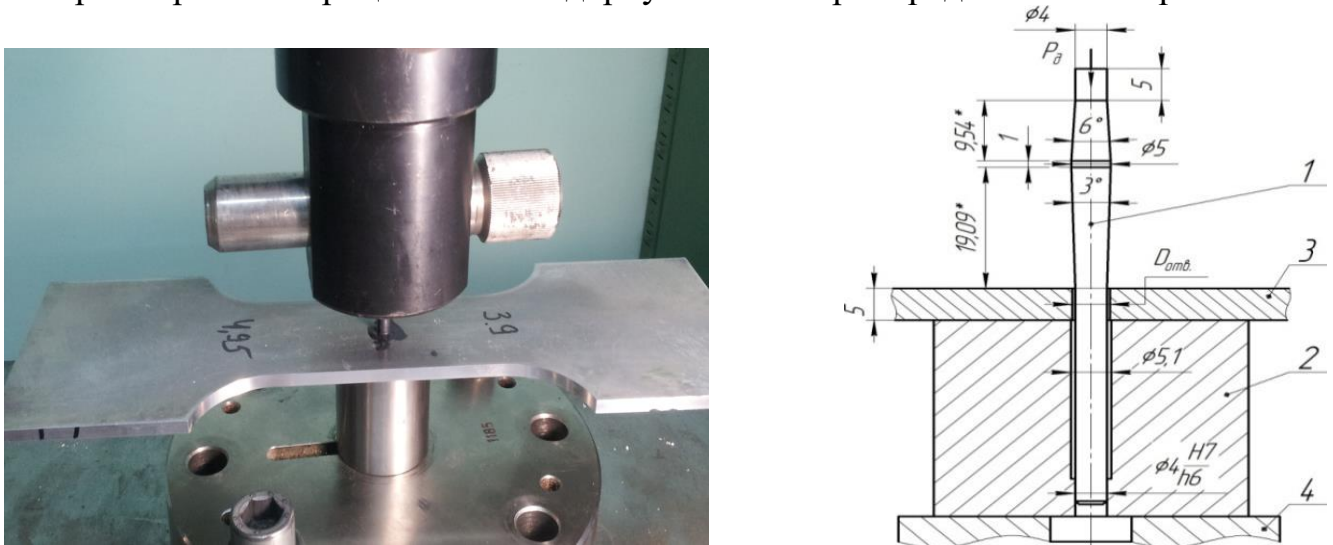


Рис. 1. Процес дорнування отворів на випробувальному стенді TIRAtest 2300

При цьому весь процес навантаження зразка, як для умов статичного так і для випадку циклічного навантаження, фіксувався за допомогою відеоапаратури. Модернізація випробувального обладнання за вихідними каналами дала можливість синхронізувати за часом відеосигнал з даними, що були отримані за каналами навантаження та деформації. Це дозволило з високою точністю зафіксувати момент появи тріщини та її подальший ріст, при цьому похибка реєстрації не перевищувала  $\pm 3$  цикли. Процес проведення експерименту та фіксування відповідних даних, представлено на рис. 2.

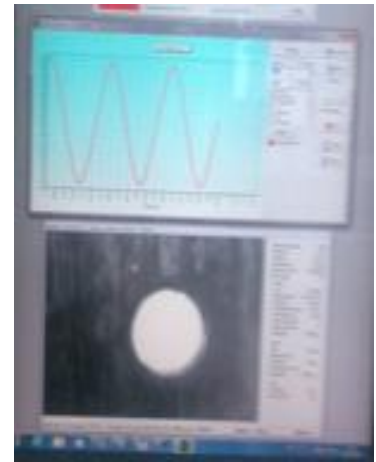
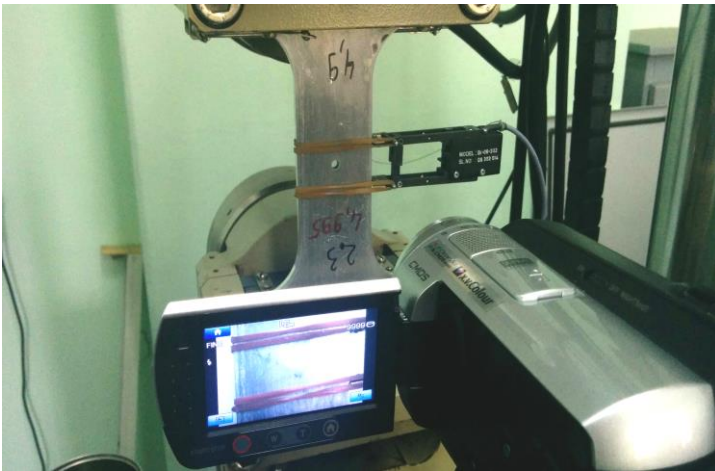


Рис. 2. Процес проведення експерименту та фіксації відповідних експериментальних даних при циклічному навантаженні зразка з концентратором у вигляді отвору

Використання методу відеофіксації дозволило отримати залежності росту тріщини для плоского зразка з концентратором від кількості циклів за м'якого режиму навантаження. Згадані залежності наведено на рис. 3. Отримані результати показують, що з зменшенням розтягуючого напруження зростає кількість циклів до початку утворення тріщини.

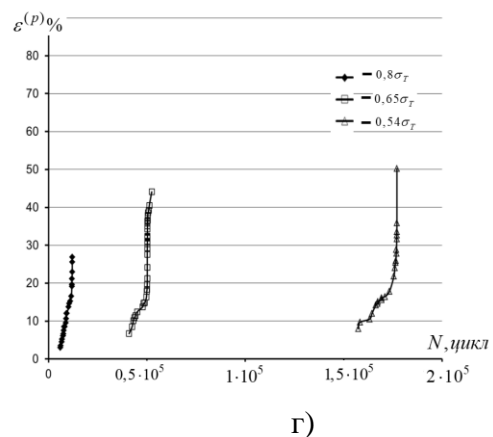
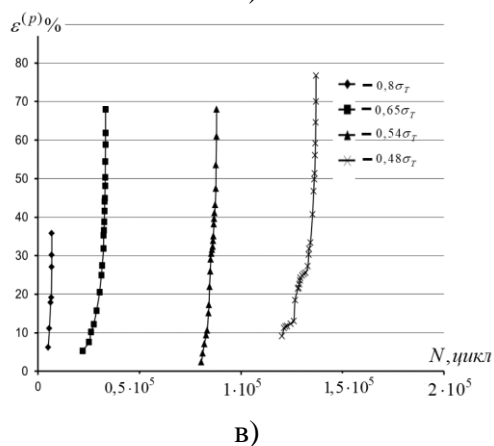
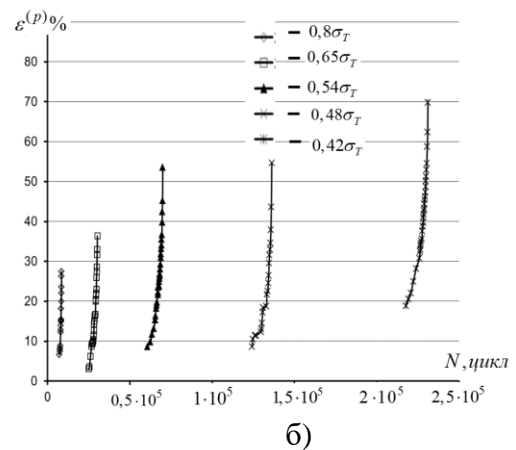
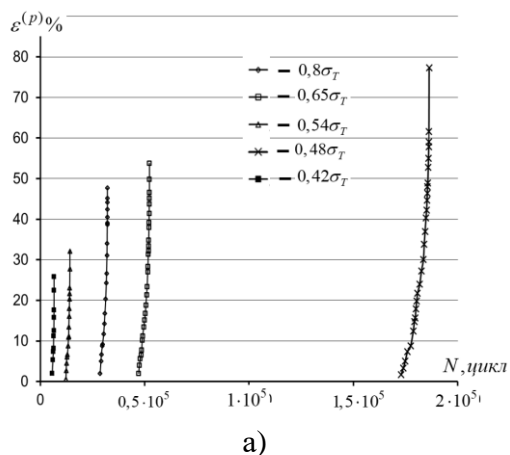


Рис. 3. Крива циклічної живучості алюмінієвого сплаву Д16чТ з концентратором в залежності від початкової пластичної деформації при пульсуючому розтязі (алюмінієвий сплав Д16чТ при  $T=293\text{K}$ ): а) при 0%; б) при 1%; в) при 2%; г) при 3%. при 0%; б) при 1%; в) при 2%; г) при 3%.



За результатами експериментальних досліджень були отримані закономірності кінетики накопичення пошкоджень у матеріалі. При цьому, експериментально, параметр пошкоджуваності визначався у вигляді скалярної величини та оцінювався за величиною зменшення механічних характеристик матеріалу модуля пружності  $E$ , коефіцієнту Пуассона  $\mu$  та об'ємного модуля  $K$  відповідно до наступних залежностей: 1) через зміну модуля пружності  $D_E = 1 - \sqrt{\frac{E_i}{E_0}}$ ; 2) через зміну коефіцієнта Пуассона  $D_\mu = 1 - \sqrt{\frac{\mu_i}{\mu_0}}$  3) через зміну об'ємного модуля  $D_K = 1 - \sqrt{\frac{K_i}{K_0}}$  (де  $E_0, \mu_0, K_0$  - значення початкового модуля пружності, коефіцієнта Пуассона та об'ємного модуля відповідно.  $E_i, \mu_i, K_i$  - модуль пружності на ділянках розвантаження, коефіцієнт поперечної деформації та об'ємний модуль для  $i$  навантаження, відповідно)

Таблиця 1

**Фізико - механічні характеристики та величини пошкоджуваності при статичному навантаженні алюмінієвого сплаву Д16чТ (Т=293К)**

$\sigma_B$ , МПа	$E, 10^5$ МПа	$\varepsilon, \%$	$\sigma_B / \sigma_{0,2}$	$\mu$	$K$ , МПа	$D_\mu^R$	$D_E^R$	$D_K^R$
460	0,83	13,58	1,31	0,212	23032,16	0,16	0,15	0,18

За результатами досліджень отримано закономірності кінетики накопичення пошкоджень для алюмінієвого сплаву Д16чТ від рівня пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ , яка показана на рис 4.

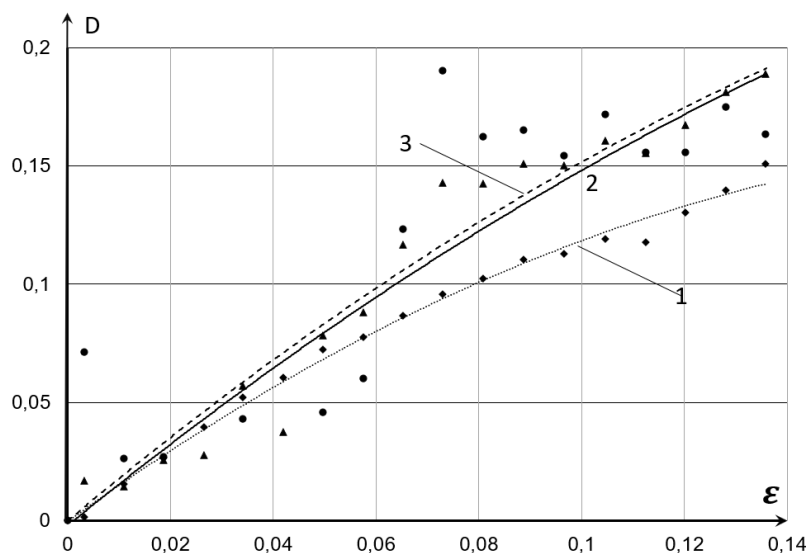


Рис. 4. Залежність накопичення пошкоджень від рівня деформації для алюмінієвого сплаву Д16чТ: 1-  $D_E$  , 2-  $D_\mu$

У третьому розділі розглянуті результати чисельного моделювання процесу дорнування пластинки з отвором за допомогою скінченно - елементного пакету

Abaqus Student Edition. При цьому були відтворені різні рівні пластичного деформування поверхні технологічного отвору, що досягалося зміною його вихідного діаметру в моделі: рівень пластичного зміцнення, що відповідає 1 % моделювався за допомогою діаметру отвору  $d=4.95\text{мм}$  рівень зміцнення 2 % відповідає діаметру отвору  $d=4.9\text{мм}$ , рівень зміцнення 3 % відповідає діаметру отвору  $d=4.85\text{мм}$ . При проведенні скінчено елементного аналізу була використана експериментально отримана ефективна діаграма деформування, яка враховує кінетику накопичення мікропошкоджень в матеріалі в процесі його пружно - пластичного деформування.

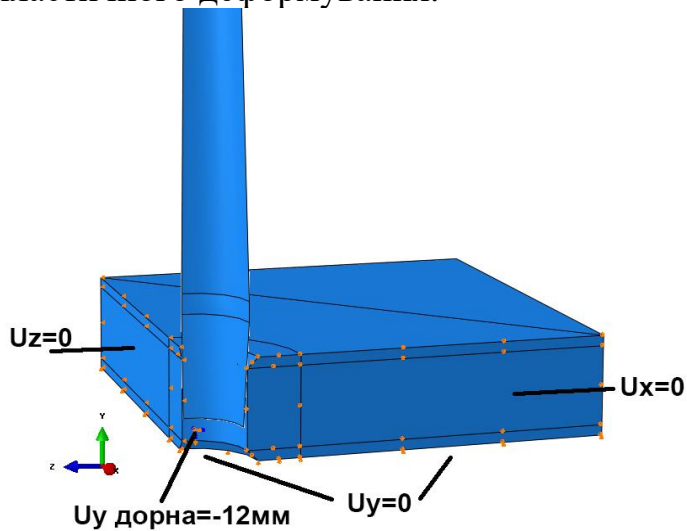


Рис. 5. Граничні умови при дорнуванні

Чисельне моделювання технологічного процесу дорнування реалізовано шляхом розв'язання контактної задачі за явною схемою інтегрування. Розрахункова модель та граничні умови, що враховують її подвійну симетрію, показано на рис 5. Для підвищення якості розрахунку було застосовано поділ об'єму моделі на зони, що характеризуються різними параметрами геометрії скінченних елементів. При цьому під час побудови сітки використовувались гексагональні тривимірні скінченні елементи.

Отриманий в результаті скінченно-елементного аналізу розподіл залишкових напружень за Мізесом продемонстровано на рисб.

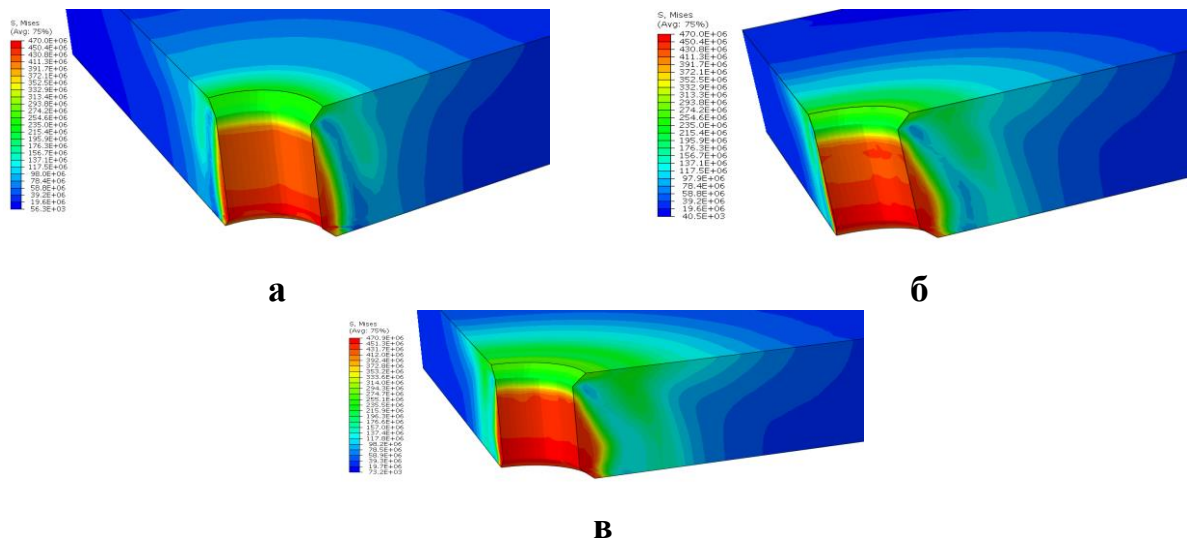


Рис. 6. Поля розподілу залишкових напружень в зоні функціонального отвору від рівня пластичного деформування:  
а) 1%; б) 2%; в) 3%.

З рис. 6 видно, що більшому рівню пластичного деформування відповідає зона більших максимальних напружень, і їх рівень на поверхні отвору близький до границі міцності сплаву Д16ЧТ.

Оцінка впливу експлуатаційних навантажень на міцність конструктивного елементу після його дорнування відбувалася шляхом моделювання комбінованого навантаження пластинки з отвором. Для цього процес навантаження при чисельному аналізі розбивався на два кроки: перший з яких відтворював напружено-деформований стан пластинки одразу після дорнування, а в рамках другого — прикладалося експлуатаційне навантаження, що було визначене як  $\bar{\sigma} = H\sigma_T$ ,  $H$  — коефіцієнт експлуатаційного навантаження, що вибирається виходячи з умов експлуатації конструктивного елементу,  $\sigma_T$  — границя текучості матеріалу.

За результатами чисельного аналізу комбінованого навантаження були отримані залежності для розподілу еквівалентних напружень за Мізесом від рівнів експлуатаційного навантаження та величини вихідної пластичної деформації обумовленої технологічним процесом дорнування. Графічно згадані залежності для зони виходу дорна з отвору (нижня частина пластинки), зони, що відповідає середній площині пластинки та зони верхньої поверхні пластинки наведено на рис.7.

При значеннях прикладеного розтягуючого напруження до  $\bar{\sigma} = 0,4\sigma_T$  спостерігається стрімке падіння сумарних напружень в зоні значного пластичного деформування. Ця тенденція справедлива для всіх трьох ступенів пластичного зміцнення (1%, 2%, 3%). При напруженнях вище  $\bar{\sigma} = 0,4\sigma_T$  навантаження в зоні розтягу функціонального отвору зростає і досягає границі текучості при рівні зовнішнього навантаження, що складає  $(0,51-0,57)\sigma_T$  та вище.

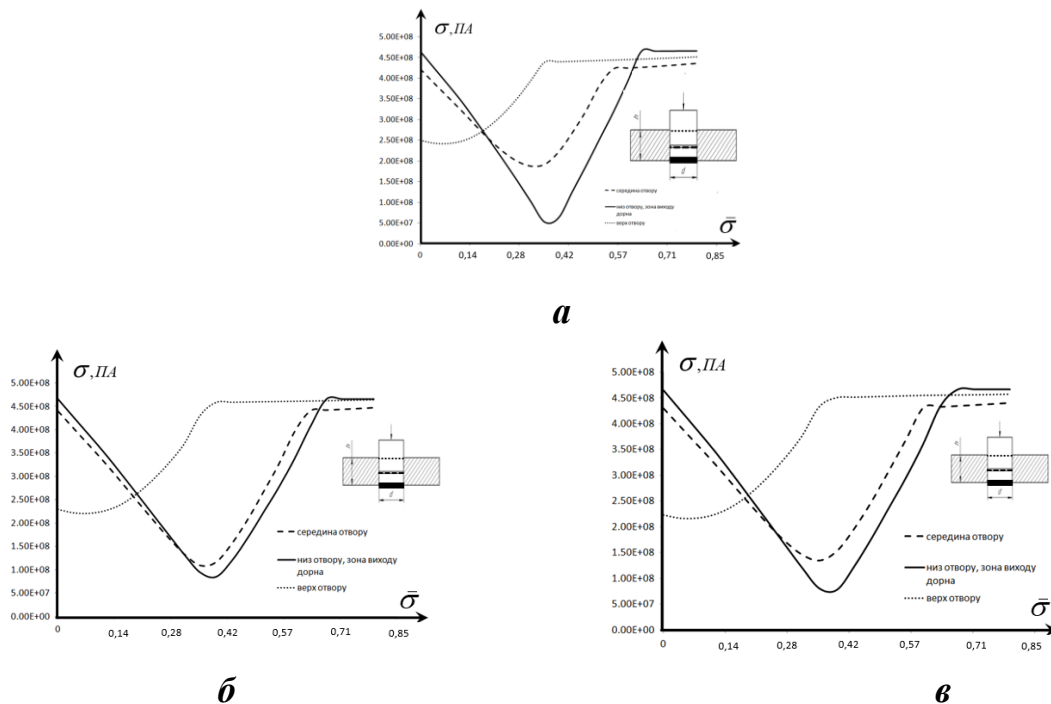


Рис. 7. Еквівалентні напруження в зоні розтягу функціонального отвору в залежності від рівня розтягуючого навантаження із зміцненням відповідно:  
а)-3%;б)-2%;в)-1%.

На рис. 8. показано зміну рівня пошкоджуваності матеріалу в зоні розтягу технологічного отвору при різних ступенях пластичного зміцнення в залежності від рівня зовнішнього максимального навантаження. Залежності зміни пошкоджуваності від величини максимальних напружень мають дві ділянки – ділянка сталої величини параметра пошкоджуваності та ділянка стрімкого його збільшення .

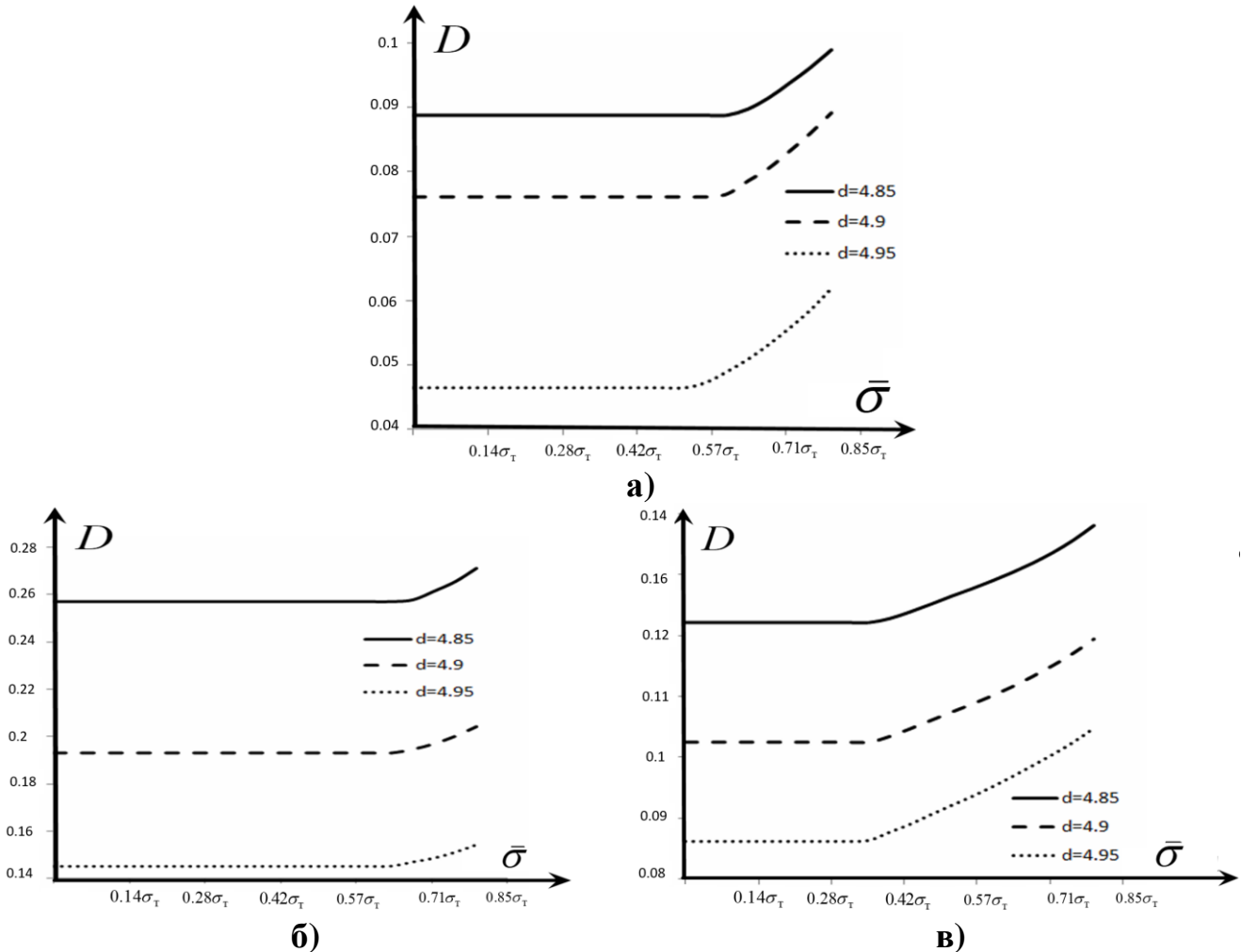


Рис. 8. Величина параметра пошкоджуваності в залежності від рівня розтягуючого навантаження, із зміцненням в зоні функціонального отвору: а) середина отвору; б) зона виходу дорна; в) зона входу дорна

Зростання пошкоджуваності в зоні виходу дорна із функціонального отвору починається із при зовнішньому розтягуючому напруженні  $0,65\sigma_T$  для отворів діаметром 4,85 і 4,9; а для отвору діаметром 4,95 ця величина складає  $0,63\sigma_T$ . Відповідно до проведеного чисельного аналізу було відмічено, що величина параметра пошкоджуваності зростає починаючи з верхньої поверхні отвору, при цьому початок зростання починається вже при величині зовнішнього розтягуючого навантаження, що дорівнює  $0,36\sigma_T$  для всіх отворів та рівнів пластичного зміцнення. Це обумовлюється випучуванням матеріалу та мінімальним значенням, в цій зоні, залишкових стискаючих напружень.

Крім цього, залежності наведені на рис. 8 дають можливість зробити висновок, що при збільшенні початкового рівня пластичного деформування з 1% до 3%

спостерігається несуттєве збільшення параметру пошкоджуваності в діапазоні величин  $0,14-0,54\sigma_T$ . При цьому її максимальне значення для всіх трьох випадків не перевищує  $0,28\sigma_T$  і спостерігається в зоні виходу дорна, що обумовлено в цьому місці наявністю концентрації деформації через особливості технологічного процесу дорнування.

**Четвертий розділ** присвячений дослідженням процесу кінетики накопичення пошкоджень в матеріалі та розробці методу оцінки довговічності для умов малоциклового навантаження. На рис 9 представлені криві малоциклової втоми для алюмінієвого сплаву Д16чТ при різному виді пластичного деформування

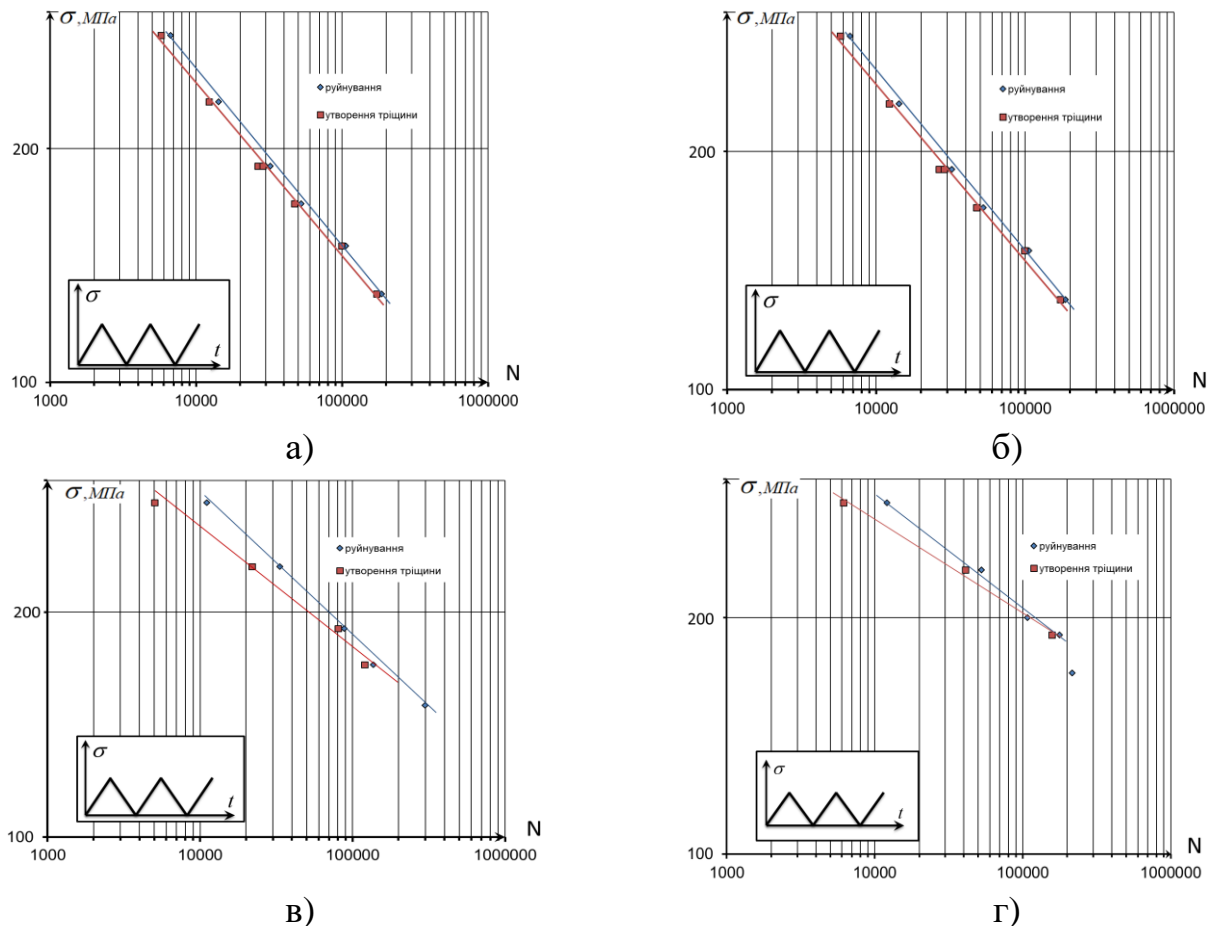


Рис 9. Крива малоциклової втоми алюмінієвого сплаву Д16чТ з концентратором в залежності від початкової пластичної деформації при пульсуючому розтязі (алюмінієвий сплав Д16чТ при  $T=293K$ ): а) при 0%; б) при 1%; в) при 2%; г) при 3%.

Порівняння кривих малоциклової втоми для алюмінієвого сплаву Д16чТ, отриманих на зразках з технологічним отвором при пульсуючому розтязі з початковою пластичною деформацією  $\varepsilon^{(p)} = 1\%; 2\%; 3\%$  після дорнування, наведено на рис. 10. Як видно, що збільшення рівня початкової пластичної деформації в концентраторі має вплив на збільшення довговічності. Характерним є те, що наявність початкової пластичної деформації призводить до підвищення довговічності металу за рахунок отриманих залишкових напружень в концентраторі (отвір). Максимальна розбіжність між отриманими експериментальними значеннями

кількості циклів до руйнування при малоцикловій втомі складала до 6 разів при напруженні  $0,54\sigma_T$  між значеннями для отворів без дорнування та з дорнуванням при 3% залишкової пластичної деформації.

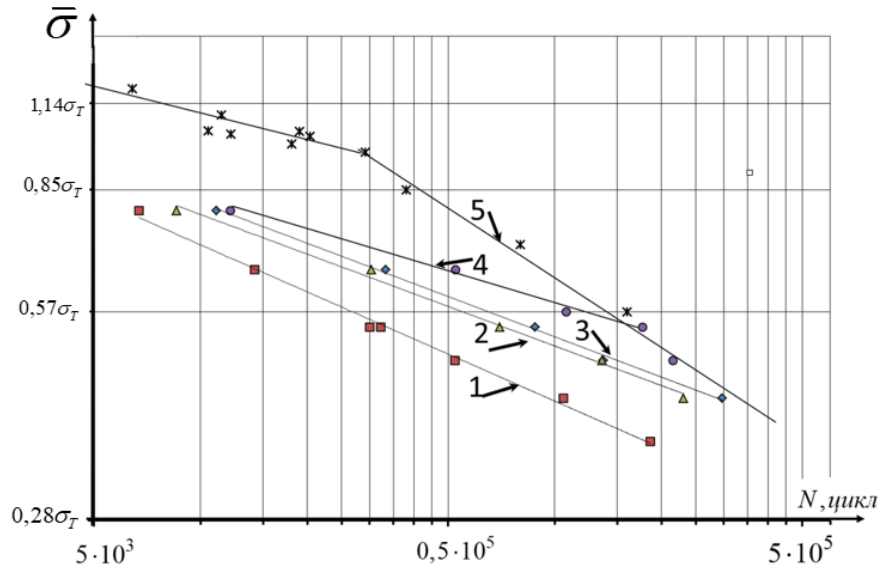


Рис. 10. Криві малоциклової втоми для алюмінієвого сплаву Д16ЧТ (зразки з технологічним отвором при: (1- 0%; 2- 1%; 3- 2%; 4- 3%: ) початкової пластичної деформації, 5 - для суцільного зразка при пульсуючому розтязі ( $T=293K$ ), відповідно.

Комплекс отриманих результатів дозволив побудувати залежність залишкової пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$  після дорнування отвору від кількості циклів до руйнування  $N_R$  та діючих номінальних напружень зразків з отвором із алюмінієвого сплаву Д16ЧТ для умов пульсуючого розтягу (рис. 11).

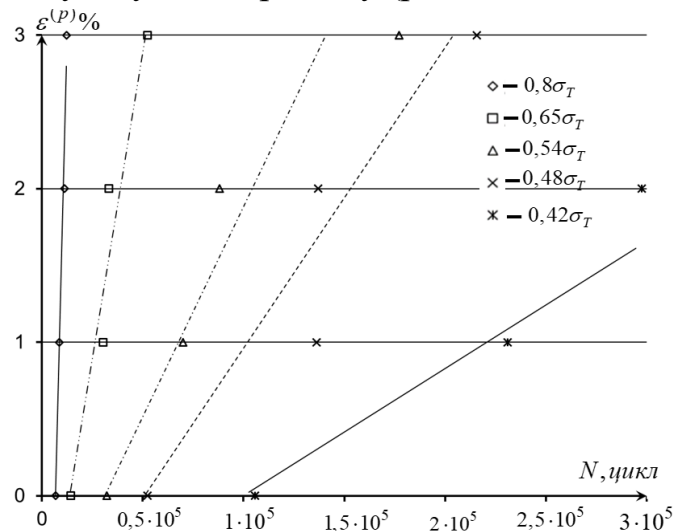


Рис. 11. Залежність величини залишкової пластичної деформації після дорнування від кількості циклів до руйнування та діючих напружень для алюмінієвого сплаву Д16ЧТ (зразки з отвором) при пульсуючому розтязі (при  $T=293K$ )

За результатами досліджень впливу процесу дорнування технологічних отворів було встановлено, що цей процес позитивно впливає на експлуатаційний ресурс. Пластичне зміцнення поверхні технологічних отворів створює локальну

зону стискаючих залишкових напружень. В результаті зменшується вплив концентрації напружень навколо функціонального отвору при пульсуючому циклі навантаження та підвищується рівень граничних навантажень, які може витримати елемент конструкції.

Виходячи з експериментальних даних, отриманих для сплаві ДчТ16, залежність кількості циклів до руйнування  $N_R$  від величини максимального напруження  $\sigma_{\max}$  можна описати степеневою залежністю у наступному вигляді :

$$N_R = A_{li} \cdot \sigma_{\max}^{B_{li}} \quad (2)$$

Де параметри  $A_{li}, B_{li}$ , залежать від властивостей матеріалу та величини пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ . Для спрощення розрахунків введено параметр  $M_{li} = B_{li} \cdot 10$ . Значення цих параметрів для матеріалу Д16чТ в залежності від рівня пластичного деформування  $\varepsilon^{(p)}$  представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Величини параметрів рівняння (2) при різних рівнях пластичної деформації

$\varepsilon^{(p)}$	Параметри	
	$A_{li}$	$M_{li} = B_{li} \cdot 10$
0	$4 \cdot 10^{14}$	-44,12
1	$6 \cdot 10^{16}$	-52,42
2	$5 \cdot 10^{16}$	-51,63
3	$6 \cdot 10^{18}$	-59,74

Виходячи з даних, що представлені в табл. 2, встановлені співвідношення для опису залежностей параметрів  $A_{li}, M_{li}$  (де  $i$  приймає значення 1 та 2) від рівня пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ . Вони графічно представлені на рис. 12-13.

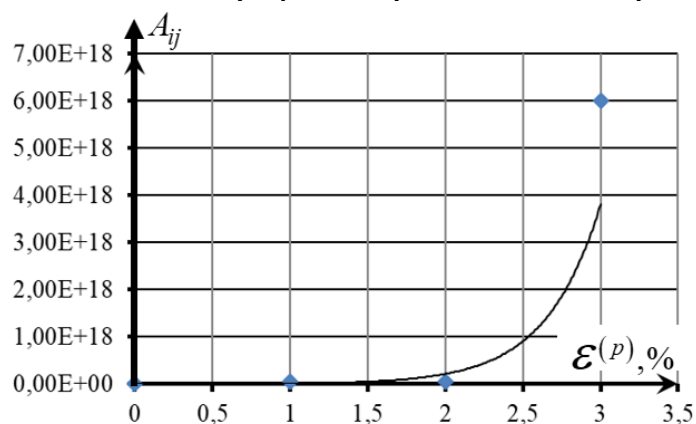


Рис. 12. Крива залежності параметра  $A_{li}$  від величини пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$

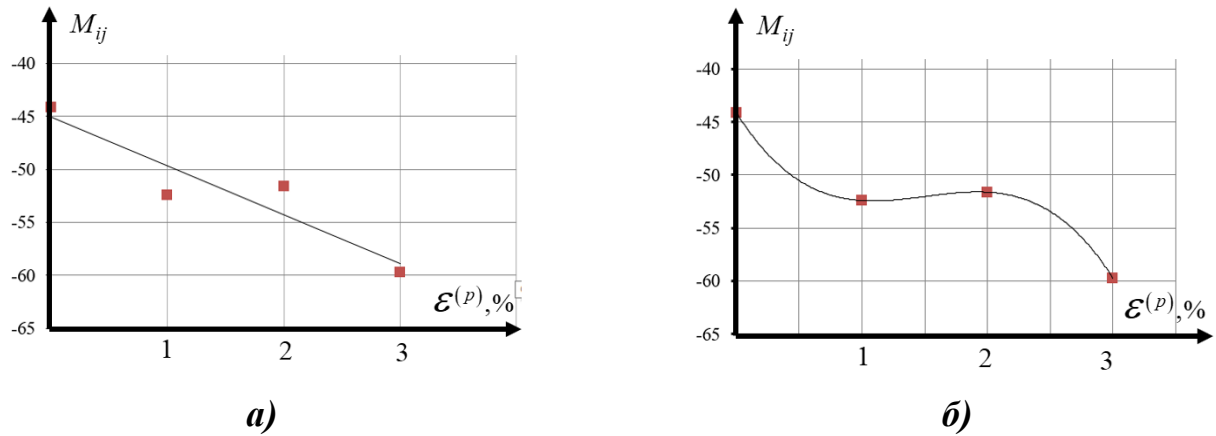


Рис. 13. Крива залежності параметра  $M_{li}$  від величини пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$  а) лінійна; б) поліноміальна

Для обраних залежностей параметрів  $A_{li}, M_{li}$ , від величини пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ , проведено аналіз для визначення доцільності використання того чи іншого рівняння та його вплив. Записано параметри  $A_{li}, M_{li}$ , з новими позначеннями залежно від типу кривої за допомогою індексу  $i$ , які наведені у табл.3.

Таблиця 3

Рівняння залежності параметрів  $A_{li}, M_{li}$ , від величини пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ .

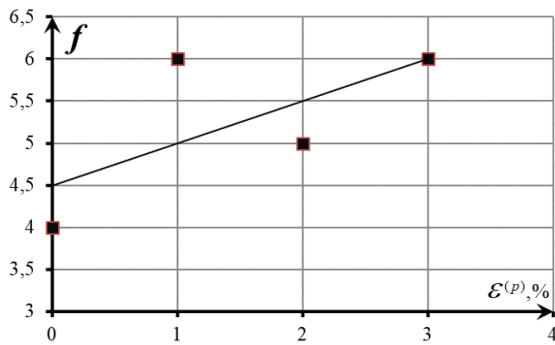
	Параметр	коефіцієнт детермінації, $R^2$	Залежність від пластичної деформації
Експоненційна	$A_{11}$	0,89	$7 \cdot 10^{14} \cdot e^{2,8665 \cdot \varepsilon^{(p)}}$
Лінійна	$M_{11}$	0,87	$-4,607 \cdot \varepsilon^{(p)} - 45,067$
Поліноміальна	$M_{12}$	1	$-2,9983 \cdot \varepsilon^{(p)3} + 13,54 \cdot \varepsilon^{(p)2} - 18,842 \cdot \varepsilon^{(p)} - 44,12$

З рис. 13 та даних табл. 2, видно, що параметр  $A_{li}$  в залежності від рівня пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$  може змінюватись на кілька порядків, що ускладнює визначення адекватного рівняння залежності параметра  $A_{li}$  від рівня пластичного деформування при дорнуванні. Тому було запропоновано наступну залежність у вигляді:

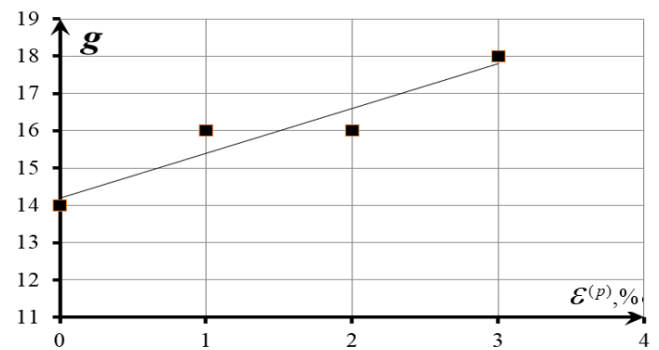
$$A_{li} = A_{12}(\varepsilon^{(p)}) = f(\varepsilon^{(p)}) \cdot 10^{g(\varepsilon^{(p)})} \quad (3)$$

Використовуючи дані табл. 3 знайдено залежність функцій  $f(\varepsilon^{(p)})$  і  $g(\varepsilon^{(p)})$ , які входять в рівняння (3), як представлено на рис. 14.





а)



б)

Рис. 14. Залежність функцій  $f(\varepsilon^{(p)})$  (а) та  $g(\varepsilon^{(p)})$  (б) від величини пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$

З рис.14 видно, що функції  $f(\varepsilon^{(p)})$  та  $g(\varepsilon^{(p)})$  приймуть вигляд, відповідно:

$$f(\varepsilon^{(p)}) = 0,5 \cdot \varepsilon^{(p)} + 4,5 \quad (4)$$

$$g(\varepsilon^{(p)}) = 1,2 \cdot \varepsilon^{(p)} + 14,2 \quad (5)$$

Підставивши рівняння (4) і (5) в рівняння (3), отримаємо додатково залежність  $A_{1i}$  від величини пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ , як:

$$A_{1i} = A_{12} = [0,5 \cdot \varepsilon^{(p)} + 4,5] \cdot 10^{[1,2 \cdot \varepsilon^{(p)} + 14,2]} \quad (6)$$

Згідно з табл. 3 і рівняння (6), отримано залежності параметрів для рівняння (2). Це дозволяє зв'язати кількість циклів до руйнування  $N_R$  з максимальними напруженнями  $\sigma_{\max}$  та рівнем пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ . Використовуючи отримані залежності отримуємо варіант залежності, яка описує малоциклову втому, за найменшою похибкою. Для більш детального аналізу представлених залежностей рівнянь були визначені коефіцієнти детермінацій, які оцінюють якість підібраних рівнянь при фіксованих значеннях  $\varepsilon^{(p)}$ . З отриманих математичних розрахунків було вибрано найоптимальніше рівняння (7), яке описує залежність кількості циклів до руйнування  $N_R$  при заданих значеннях максимального напруження  $\sigma_{\max}$  та рівня пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$ . В результаті математичних перетворень з коефіцієнтами цих рівнянь, отримуємо наступну форму виразу залежності:

$$N_R(\sigma_{\max}, \varepsilon^{(p)}) = [K_1 \cdot e^{K_2 \cdot \varepsilon^{(p)}}] \cdot \sigma_{\max}^{(K_3 \cdot \varepsilon^{(p)} + K_4)} \quad (7)$$

Для Д16чТ  $K_1 = 7 \cdot 10^{14}$ ;  $K_2 = 2,9$ ;  $K_3 = -0,46$ ;  $K_4 = -4,51$ .

Так як кількість циклів до руйнування  $N_R$  є функцією залежності від змінних  $\sigma_{\max}$  та  $\varepsilon^{(p)}$ , то вона буде описана поверхнею граничних значень за допомогою залежності (7).

На рис. 15 побудована поверхня граничних значень згідно (7), які показують залежність між трьома факторами, які мають однакову взаємодію між собою, та дає змогу графічним шляхом визначити необхідне значення шуканого параметру.

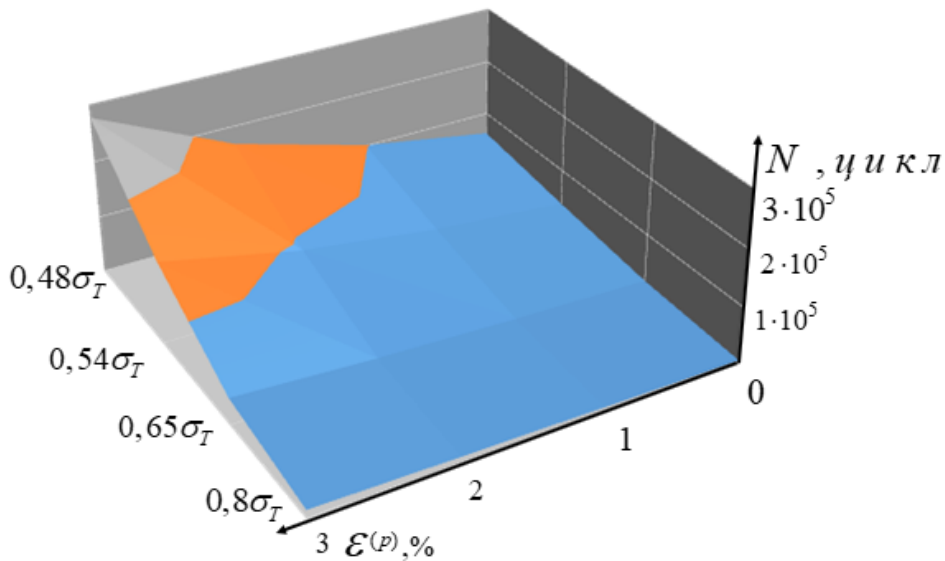


Рис. 15. Гранична поверхня малоциклової втоми для Д16чТ в залежності від рівня пластичної деформації  $\varepsilon^{(p)}$  та величини максимальних напруження  $\sigma_{\max}$  ( $T=293K$ )

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

- 1) Розроблено метод оцінки довговічності, що враховує рівень ППД та вплив зовнішнього експлуатаційного навантаження для конструктивних елементів з урахуванням кінетики накопичення пошкоджень, для алюмінієвого сплаву Д16чТ
- 2) Проведено аналіз сучасних конструктивно-технологічних методів поверхневого зміцнення функціональних отворів конструктивних елементів та вибрано метод дорнування для якого було виготовлено відповідний дорн та матриця для забезпечення заданого рівня ППД;
- 3) Отримані нові експериментальні дані з кінетики накопичення пошкоджень під час пружно-пластичного деформування алюмінієвого сплаву Д16чТ за умов статичного та малоциклового ( $R\sigma=0$ ) навантаження;
- 4) Проведено чисельне моделювання (у програмному комплексі Abaqus Explicit) процесу дорнування отворів пластин з матеріалу Д16чТ на рівні 1%, 2% і 3% пластичної деформації. Отримано залежності впливу величини ППД на розподіл максимальних напружень та початкової технологічної пошкоджуваності у околі отвору;
- 5) Розроблена модель залежності кількості циклів до руйнування, від рівня ППД та величину експлуатаційних напружень для конструктивних елементів з алюмінієвого сплаву Д16чТ, що враховує параметр пошкоджуваності при малоцикловому навантаженні;
- 6) За розробленою моделлю побудовано граничну поверхню малоциклової втоми конструктивних елементів (у вигляді пластин з отвором) із алюмінієвого сплаву

Д16чТ при пульсуючому розтязі ( $T=293K$ ), та перевірено достовірність результатів отриманих за розробленою моделлю з експериментальними даними.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. А.П. Грабовський. и др, Пошкоджуваність та граничний стан конструкційних матеріалів при пружно – пластичному деформуванні / Грабовський А.П., **Бабак А.М.**, Тимошенко О.В. // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія “Машинобудування” . – 2005. – №47. – С. 11–13. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження та обробка результатів експерименту, визначено параметри моделі пошкоджуваності.*

2. Піманов В. В., та ін. Исследование процесса дорнования технологических отверстий в авиационном сплаве Д16чТ / В.В. Піманов ; О. В. Тимошенко, **А.М. Бабак** // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія “Машинобудування” . – 2015. – №75. – С. 144–150. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження процесу дорнування та обробка результатів експерименту.*

3. Фам, Д. К. Кинетика накопления повреждений и критерий предельного состояния конструкционных материалов / Д. К. Фам, **А. Н. Бабак**, В. В. Коваль // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – №1 (82). – Р. 131-138. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus) *Здобувачем виконані експериментальні дослідження та обробка результатів експерименту по визначенню механічних характеристик матеріалів та критичного значення пошкоджуваності.*

4. О. V. Timoshenko,. The influence of plastic deformation on the low-cycle fatigue during the burnishing of holes in flat specimens of D16chT steel / О. V. Timoshenko, **А. М. Babak**, Quan Fam Dyk, Yu. M. Sydorenko // Strength of materials. – 2018. – Vol 50 (№3). – р. 448–452. (Входить до НМБ Scopus) *Здобувачем проведені експериментальні дослідження. .*

5. Фам Дик Куан, Пошкоджуваність металевих матеріалів з урахуванням виду напруженого стану/ Фам Дик Куан, О. В. Тимошенко, В.В. Коваль, **А.М. Бабак** // Технічні науки та технології , 2018 , №2 (12) С. 49–58. *Здобувачем виконані обробка експериментальних даних та побудова залежностей пошкоджуваності від впливу виду напруженого стану.*

6. Фам Дик Куан, Прогнозування довговічності силових елементів з функціональними отворами при малоцикловій втомі / Фам Дик Куан, О. В. Тимошенко, **А.М. Бабак** // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2018 , №2 (65) С. 56–67. (Входить до РІНЦ (eLibrary), Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky)) *Здобувачем виконані обробка експериментальних даних та побудова залежностей пошкоджуваності від впливу виду напруженого стану.*

7. **Бабак А.М.** Деформаційні криві малоциклової втоми для силових елементів літака з дорнованими отворами / Бабак А.М., Демидюк Т.П. // XVII міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Матеріали конференції. – Одеса, 2015.– С. 32.

8. **Бабак А.М.** Исследование влияния величины натяга на поврежденность материала в процессе дорнования отверстий в листовых заготовках из алюминиевого сплава Д16чТ / Піманов В. В., Тимошенко О.В. // XVIII міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Матеріали конференції. – Одеса, 2016.– С. 48.

## АНОТАЦІЯ

**Бабак А.М.** Малоциклова втома поверхнево зміцнених конструктивних елементів з врахуванням пошкоджуваності – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, МОН України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена оцінюванню довговічності при малоцикловій втомі поверхнево зміцнених конструктивних елементів.

Проаналізовано існуючі роботи різних авторів що присвячені даній тематиці по оцінці довговічності при малоцикловій втомі елементів конструкцій з концентраторами напруження у вигляді функціональних отворів елементів конструкції відбувається пружно-пластичні деформації при яких виникає явище деградації механічних характеристик за рахунок виникнення та накопичення пошкоджуваності.

В результаті проведено комплекс експериментальних досліджень для алюмінієвого сплаву Д16чТ, були отримані механічні характеристики при статичному навантаженні для суцільних зразків та кінетику накопичення пошкоджень через зміну характеристик пружності від рівня пластичної деформації.

Було проведено чисельне моделювання процесу дорнування та отримано розподіл полів пошкоджуваності у зоні функціонального отвору для різних рівнів пластичного деформування.

Розроблена методика визначення (оцінки) кількості циклів до руйнування в залежності від ступеня пластичної деформації та рівня максимального напруження алюмінієвого сплаву Д16чТ. Було встановлено, що наявність концентратора при відповідному рівні величини дорнування, не впливає на експлуатаційний ресурс.

**Ключові слова:** пошкоджуваність, статичне навантаження, малоциклова втома, прогнозування ресурсу, модель пошкоджуваності, критерій руйнування, реверсне навантаження.

## АННОТАЦИЯ

**Бабак А.М. Малоцикловая усталость поверхностно упрочненных конструктивных элементов с учетом повреждаемости.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2020

Диссертационная работа посвящена оценке долговечности при малоцикловой усталости поверхностно упрочненных конструктивных элементов.

При исследовании работ, было показано, что не все расчеты при малоцикловой усталости для элементов с концентратором напряжений учитывают величину упрочнения за счет поверхностно - пластического деформирования, которые возникают во время технологических процессов.

В результате численных расчетов было получено поля остаточных напряжений, они представлены в эквивалентных напряжениях согласно 4 теории прочности (напряжение по Мизесу). Также оценили НДС дорнированных функциональных отверстий под действием эксплуатационных нагрузок в зависимости от уровня пластического деформирования и величины эксплуатационной нагрузки.

Установлены закономерности влияния остаточных напряжений на прочность силовых конструктивных элементов с отверстием после дорнования.

Используя разработанную модель построено граничную поверхность малоцикловой усталости, которая учитывает величину ППД и величину напряжений с учетом кинетики накопления повреждений.

**Ключевые слова:** повреждаемость, статическая нагрузка, малоцикловая усталость, прогнозирования ресурса, модель повреждаемости, критерий разрушения, реверсном нагрузки.

## SUMMARY

**Babak A.M. Low-cycle fatigue of surface-hardened structural elements with regard to damageability.** – Manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in the specialty 05.02.09 – dynamics and strength of machines.– National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation work is devoted to the estimation of durability at low - cycle fatigue of superficially strengthened constructive elements.

After analysing existing works of various authors devoted to the topic on the assessment of durability in low-cycle fatigue for structural elements with stress concentrators in the form of structural holes. It was found that in existing approaches to

assess durability, the damage is not taken into account. Which leads to less accurate results. It is known that during the operation of structural elements there are elastic-plastic deformations. In which there is a phenomenon of degradation of mechanical characteristics due to the occurrence and accumulation of damage.

The concept and essence of damage were laid down, even L.M. Kachanov and Y.M. Rabotnov as microstructure changes in structural materials caused by inverted processes from the action of loads of different nature. The use of this parameter, the damage, in the calculations can be used as a vector, scalar or tensor. It allows the introduction of this parameter in a large number of existing models.

Moreover, in the study of the analyzed works, it was shown that not all calculations for low-cycle fatigue for structural elements with stress concentrator take into account hardening due to surface plastic deformation. That occurs due to technological processes such as stamping holes of segmental configuration, rolling and mandrel. After analyzing the presented technological processes, it is determined that the dormant process is widespread due to its simplicity, economy and reliability.

Thus, taking into account the damage and the study of the presented factors in creating a new model for predicting the durability of surface-reinforced structural elements under low-cycle load gives more approximate results in relation to the actual values.

A set of experimental studies for aluminum alloy D16chT. Due to its prevalence among metallic materials in modern aircraft and machine-building complex. Mechanical characteristics of structural material under static load for solid samples were received.

Also, under static loading for solid samples for the presented material, the dependence of the modulus of elasticity of the first kind  $E$ , volume modulus  $K$ , Poisson's ratio  $\mu$  for aluminum alloy D16hT depending on the level of inverted plastic deformation was experimentally obtained using the unloading method.

According to the experimental results, the kinetics of damage accumulation due to the change of the modulus of elasticity of the first kind  $E$  and the Poisson's ratio  $\mu$  depending on the level of inverted plastic deformation was obtained.

The dependence of the change in microhardness along the radius on the center of the hole on the surface of the material of aluminum alloy D16chT for perforated samples at 1%, 2%, 3% level of inverted plastic deformation was obtained. From the obtained results, three different areas of the hardness level of the material are shown. The zone of a sharp change in the value of microhardness, the zone of moderate change of microhardness and the zone of stabilization of microhardness caused by the mandrel process.

Experimental studies were performed to determine the number of cycles before fracture and crack formation, in samples with concentrators in the form of holes. Which were previously surface plastically strengthened at 1%, 2%, and 3% of the level of inverted plastic deformation, by the mandrel, at different values maximum stresses and in a symmetrical load cycle.

Numerical simulation of the diving process was performed using the numerical package Abaqus Student Edition. It is determined that the level of maximum damage is in

the area of the mandrel out of the hole. Damage in the middle of the hole is 2-5 times less (depending on the level of pre-deformation) relative to the maximum value.

To assess the impact of operating loads on the strength of power structural elements with a hole after dunking. To the preliminary results of the calculation of the dredging process, we apply an additional stage of loading, corresponding to the operating load. As a result of the calculations, the residual stress fields were obtained, they are presented in equivalent stresses according to 4 strength theory (Mises stress). It is estimated that as a result of mandreling in the area of the functional hole there are significant compressive stresses at all levels of plastic hardening.

A method for determining (estimating) the number of cycles until failure depending on the degree of plastic deformation and the level of maximum stress of the aluminium alloy D16chT was developed, it was found that the mandreling process has a positive effect on the service life. Plastic strengthening of the surface of technological openings creates a local zone of compressive residual stresses. As a result, the absorption of stress concentration around the process hole during the pulsating load cycle decreases and the level of maximum loads that the structure can withstand increases.

The regularities of the influence of residual stresses on the strength of power structural elements with a hole after mandrel are established. The regularities of the influence of the level of residual stresses after mandreling on the number of cycles before failure were experimentally established. It is shown that for samples with a hole after mandrel at 3% residual plastic deformation for stresses up to and at 2% residual plastic deformation for stresses up (for a given material), the stress concentrator does not affect durability.

According to the developed model, a generalizing surface of low-cycle fatigue of structural elements (in the form of samples with a hole) made of aluminium alloy D16chT with pulsating tension ( $T = 293\text{K}$ ) is constructed.

**Keywords:** damage, static load, low-cycle fatigue, resource forecasting, damage model, failure criterion, reverse load.

