

УДК 539.4

О.В. ТИМОШЕНКО, А.М. БАБАК, ФАМ ДИК КУАН
Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ОТВОРАМИ ПРИ МАЛОЦИКЛОВІЙ ВТОМІ

У даній статті представлені результати експериментального дослідження зразків з функціональним центральним отвором з авіаційного алюмінієвого сплаву Д16чТ при малоцикловому навантаженні. Отримані залежності кількості циклів до руйнування від рівня максимального напруження для дорнурованого функціонального отвору при рівні залишкової пластичної деформації 1%, 2% і 3%. Запропоновано математичну модель, що описує залежності кількості циклів до руйнування для алюмінієвого сплаву Д16чТ від рівня максимального напруження і величини залишкової пластичної деформації при дорнурованні функціональних отворів на основі аналізу отриманих експериментальних даних. Запропоновано безліч видів рівнянь і відповідні їм параметри для опису залежності кількості циклів до руйнування від величини максимальної величини напруження і рівня пластичної деформації. Представлені порівняння результатів запропонованих рівнянь і їх похибки щодо експериментальних даних. В результаті аналізу було запропоновано рівняння, що мають найменшу похибку в порівнянні з експериментальними. Визначили вид рівняння і його параметри і провели аналіз з отриманням розрахунку похибки. Проведено порівняння результатів математичної моделі з експериментальними значеннями, що підтвердили можливість використовувати запропоновану математичну залежність для подальших розрахунків. Представлена гранична поверхня залежності кількості циклів до руйнування від рівня пластичної деформації при дорнурованні функціонального отвору.

Ключові слова: залишкові напруження, функціональний отвір, дорнування, зміцнення, пластична деформація, малоциклова втома.

А.В. ТИМОШЕНКО, А.М. БАБАК, ФАМ ДЫК КУАН
Национальный технический университет Украины Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

В данной статье представлены результаты экспериментального исследования образцов с функциональным центральным отверстием из авиационного алюминиевого сплава Д16чТ при малоцикловом нагружении. Получены зависимости количества циклов до разрушения от уровня максимального напряжения для дорнированного функционального отверстия при уровне остаточной пластической деформации 1%, 2 % и 3 %. Предложена математическая модель, описывающая зависимости количества циклов до разрушения для алюминиевого сплава Д16чТ от уровня максимального напряжения и величины остаточной пластической деформации при дорнировании функциональных отверстий на основе анализа полученных экспериментальных данных. Предложены множество видов уравнений и соответствующие им параметры для описания зависимости количества циклов до разрушения от величины максимальной величины напряжения и уровня пластической деформации. Представлены сравнения результатов предложенных уравнений и их погрешности относительно экспериментальных данных. В результате анализа было предложены уравнения имеющие наименьшую погрешность по сравнению с экспериментальными. Определили вид уравнения и его параметры и провели анализ с получением расчета погрешности. Проведено сравнение результатов математической модели с экспериментальными значениями, что подтвердили возможность использовать предложенную математическую зависимость для дальнейших расчетов. Представлена предельная поверхность зависимости количества циклов до разрушения от уровня пластической деформации при дорнировании функционального отверстия.

Ключевые слова: остаточные напряжения, функциональное отверстие, дорнирование, упрочнение, пластическая деформация, малоцикловая усталость.

O.V. TYMOSHENKO, A.N. BABAK, PHAM DUC QUAN
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DURABILITY PREDICTION OF STRUCTURE ELEMENTS WITH FUNCTIONAL HOLES AT LOW-CYCLE FATIGUE

In this paper we present the results of an experimental study of samples with a technological hole made of an aviation aluminum alloy D16chT under low-cycle loading. The obtained dependences of the number of cycles before failure on the magnitude of the maximum stress for the processing technological hole at a level of residual plastic deformation of 1%, 2%, and 3%. A mathematical model describing the relationship between the number of cycles before failure for an aluminum alloy D16chT from the level of maximum stress and the magnitude of residual plastic deformation in the process of making technological hole is proposed on the basis of an analysis of the experimental data. A variety of types of equations and their corresponding parameters are proposed to describe the dependence of the number of cycles before failure on the magnitude of the maximum stress and the level of plastic deformations. Comparisons of the results of the proposed equations and their errors with respect to the experimental data are presented. As a result of the analysis, equations with the least error compared with the experimental ones were proposed. The form of the equation and its parameters were determined and an analysis was performed to obtain an error calculation. The results of the mathematical model are compared with the experimental values, which confirmed the possibility of using the proposed mathematical dependence for further calculations. The limiting surface of the dependence of the number of cycles before failure on the magnitude of level of plastic deformation after processing of making technological hole is presented in the case.

Keywords: residual stress, technological hole, mandrelling, strengthening, plastic deformation, low cycle fatigue.

Постановка проблеми

Зміцнення матеріалів шляхом дорнування знайшло широке застосування серед елементів авіабудівних конструкцій. Проте питання впливу залишкових напружень і деформацій на міцність, надійність і довговічність конструкції, у зв'язку зі складністю поставленої задачі, залишається до кінця не вивченим. Існуючі рівняння для визначення кількості циклів до руйнування, не враховують рівень пластичного деформування, який істотно впливає на його ресурс.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теорія розрахунків на малоциклово втому отримала за останні десятиріччя значний розвиток у роботах вітчизняних та зарубіжних дослідників. Великі заслуги в розв'язанні цієї проблеми належать школі Шаші, представленій численними роботами: С.В. Серенсена, Р.М. Шнейдеровича, Г.А. Махутова, А.П. Гусенкова, А.Н. Романова, М.М. Гаденина та інших, а також школі Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України, представленій роботами В.Т.Троценко, В.А.Стрижало та інших. На даний час було розроблено багато методів розрахунку малоциклової втоми при лінійному напруженому стані, але не дивлячись на це, вплив концентратора напружень при побудові кривих втоми та прогнозування ресурсу конструкцій на різних етапах залишається малодослідженим.

Одна з найважливіших проблем розвитку сучасної техніки полягає у підвищенні довговічності та надійності машин і конструкцій, у поліпшенні міцностних характеристик їх деталей при одночасному зниженні їх загальної металоемності.

Формулювання мети дослідження

Проведення експериментальних досліджень зразків з функціональним центральним отвором з авіаційного алюмінієвого сплаву Д16чТ при малоциклово навантаженні. Вдосконалення існуючого рівняння для визначення кількості циклів до руйнування, яке буде враховувати параметр рівня залишкової пластичної деформації (1%, 2% та 3%) в отворі після дорнування, а також побудова поверхонь залежності від рівня напружень, кількості циклів та параметра пластичного деформування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Одним з найбільш відомих підходів щодо апроксимації кривої малоциклової втоми є запропонований С.С. Менсоном [1] метод універсальних нахилів, який пізніше було підтверджено Коффінім [2] та записано у наступному вигляді :

$$\Delta \varepsilon_p N_f^k = C, \quad (1)$$

де k , C – параметри матеріалу, $\Delta \varepsilon_p$ – амплітудне значення величини пластичної деформації у циклі або інтенсивність пластичної деформації для випадку складного напружено - деформованого стану, N_f – кількість циклів. Беручи до уваги результати численних експериментальних досліджень Коффінімом було запропоновано прийняти константу k рівній 0,5, а параметр C може бути визначений як половина дійсної пластичності при одноразовому розтязі [3].

$$C = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi} \quad (2)$$

Залежність (1) отримала широке застосування під назвою рівняння Коффіна – Менсона, та задовільно описує взаємозв'язок довговічності та циклічної пластичної деформації тільки в умовах знакозмінного деформування, коли впливом як пружних так і односторонньо накопичених деформацій при визначенні числа циклів до руйнування можна знехтувати [3]. Рівняння типу Коффіна – Менсона для випадку різних видів та умов навантаження було отримано і іншими вченими: Писаренко [4] Можаровський, Антипов, Бобир [5], Гохфельд, Садаков [6].

Розрахункові залежності, які базуються на рівнянні (1), задовільно описують криві малоциклової втоми в області малих довговічностей. Для підвищення точності визначення кількості циклів до руйнування в інтервалі довговічностей $1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$ циклів використовують рівняння, які дозволяють враховувати окремо вплив пружної та пластичної складової. Цей вплив можна незалежно враховувати, представляючи криву граничного стану при малоциклової втоми у вигляді двох прямих, що вперше запропоновано Менсоном [7]. Рівняння цих прямих можуть бути записані наступним чином:

$$\Delta \varepsilon_p N_f^{1/m_p} = \varepsilon_k^{0.6}, \quad \Delta \varepsilon_p N_f^{1/m_e} = \frac{3.5 \sigma_u}{E}, \quad (3)$$

де коефіцієнти m_p та m_e характеризують кути нахилу прямих; $\varepsilon = \ln \frac{1}{1-\psi}$ - вихідна пластичність матеріалу; σ_u - тимчасовий опір.

За результатами проведених випробувань Менсоном було встановлено, що кут введеної у розгляд пружної та пластичної лінії у подвійних логарифмічних координатах [3]

$$\lg \frac{\Delta \varepsilon_e}{\frac{\sigma_u}{E}} - \lg N_f \quad \text{та} \quad \lg \frac{\Delta \varepsilon_e}{\left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6}} - \lg N_f$$

є однаковим для всіх матеріалів і відповідно для пружної лінії становить $1/m_e = -0.12$, а для пластичної - $1/m_p = -0.6$. Виходячи з цього твердження ним було розроблено метод універсальних нахилів, відповідно до якого розмах повної деформації може бути записаний у вигляді [3]:

$$\Delta \varepsilon = 3.5 \frac{\sigma_u}{E} N_f^{-0.12} + \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (4)$$

Аналогічне рівняння було отримано Ленджером [8], яким також було враховано вплив пружної та пластичної складової:

$$\Delta \varepsilon = \frac{2\sigma_{-1}}{E} + \frac{1}{2\sqrt{N_f}} \ln \frac{1}{1-\psi} \quad (5)$$

Перший член рівняння (5) відображає вплив пружної деформації, яка дорівнює деформації на межі витривалості, а другий – пластичної. Таким чином, за умови експериментального визначення параметрів матеріалів, що входять до залежностей Менсона та Ленджера за допомогою рівнянь (4) та (5) можливо побудувати криві мало циклової втоми.

Суттєвим недоліком рівняння Менсона є той факт, що у області великих довговічностей розрахункові напруження на межі витривалості наближаються до нуля, що не відповідає дійсності. Розглянуті вище підходи відносяться до деформаційних і враховують величину повної деформації.

Інший підхід, який був використаний Стоуелом, що базується на критерії повної енергії дисипації [3] дає можливість визначати криві втоми при симетричному та пульсуючому навантаженні використовуючи дані лише статичних випробувань [8,9].

$$N_f = 2 \frac{\frac{\sigma_u}{\sigma_0} \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_0} - \frac{\sigma_u}{E} - \cosh \frac{\sigma_u}{\sigma_0} + 1 - \frac{\bar{W}}{\sigma_0 \varepsilon_0}}{\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \sinh \frac{\sigma}{\sigma_0} - 2 \left(\cosh \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)}, \quad (6)$$

де σ_0 та ε_0 - постійні матеріалу, σ_u та ε_u - дійсні напруження та деформація, які визначаються за дійсною діаграмою деформування; σ_{\max} - найбільше напруження циклу; \bar{W} - енергія, яка потрібна для досягнення середнього напруження циклу за діаграмою розтягу. Наведене рівняння (6) дає можливість побудувати криву втоми за випадку пульсуючого циклу навантаження, проте воно може бути

використане і для симетричного циклу шляхом заміни максимального напруження σ_{\max} на амплітудне значення циклу та знехтуванням у чисельнику доданка $\frac{\bar{W}}{\sigma_0 \varepsilon_0}$.

В роботі [10] в рамках інженерного підходу щодо визначення довговічності була запропонована наступна залежність:

$$N_R = m_1 \sqrt{\left[AE^t (a_\sigma)_{np}^2 \frac{1-r}{2} \ln \frac{100}{100-\psi_B^t} \right] / \left[\sigma_a^* + \frac{\sigma_{-1}^t}{1 + \sigma_{-1}^t / \sigma_B^t \frac{1+r}{1-r}} \right]}, \quad (7)$$

де m_1 - показник степені; r - коефіцієнт асиметрії циклу; A - параметр діаграми циклічного деформування; E^t - Модуль пружності при температурі t , МПа; ψ_B^t - відносне звуження зразка при напруженні, яке дорівнює границі витривалості при температурі $T=293K$; $(a_\sigma)_{np}$ - теоретичний коефіцієнт концентрації напружень; σ_B^t - границя міцності при температурі t , МПа; σ_{-1}^t - Границя витривалості при температурі t , МПа; σ_a^* - амплітуда місцевих умовних приведених пружних напружень в елементі конструкції при експлуатації, МПа.

В рамках представленої роботи було проведено комплекс експериментальних досліджень по визначенню довговічності плоских зразків товщиною 5мм з центральним отвором, які виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16чТ. Більш детально оцінка впливу процесу дорнування технологічних отворів на величину кількості циклів до руйнування представлена у роботах [11-13]. Було встановлено, що він сприяє збільшенню експлуатаційного ресурсу. Це пояснюється тим, що зміцнення поверхні технологічних отворів створює локальну зону стискаючих залишкових напружень, що впливає на середнє та амплітудне напруження у циклі. В результаті чого зменшується вплив концентрації напружень у зоні технологічного отвору при пульсуючому циклі навантаження та підвищується рівень граничних навантажень, які може витримати конструкція

На основі проведеного експерименту були отримані значення кількості циклів до руйнування, для пластини з отвором в залежності від рівня пластичної деформації після дорнування та напруження у циклі, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальне значення кількості циклів до руйнування N_R для ДчТ16 в залежності від величини максимальних напружень σ_{\max} при циклічному навантаженні і рівня пластичної деформації $\varepsilon_{дорн}$, яка виникає в процесі дорнування

Напруження σ_{\max}	Рівень пластичної деформації, $\varepsilon_{дорн}$ в %			
	0	1	2	3
130	186294	-	-	-
150	105831	231080	297618	-
170	52333	136216	136989	215790
190	32235	69998	88020	177058
200	-	-	-	107741
230	14200	30353	33316	52480
280	6685	8557	11094	12116

Для опису залежності N_R від σ_{\max} при фіксованому значенні рівня пластичної деформації $\varepsilon_{дорн}$ після дернування найкраще підходять степеневі і експоненціальні криві, які представлені на рис. 1.

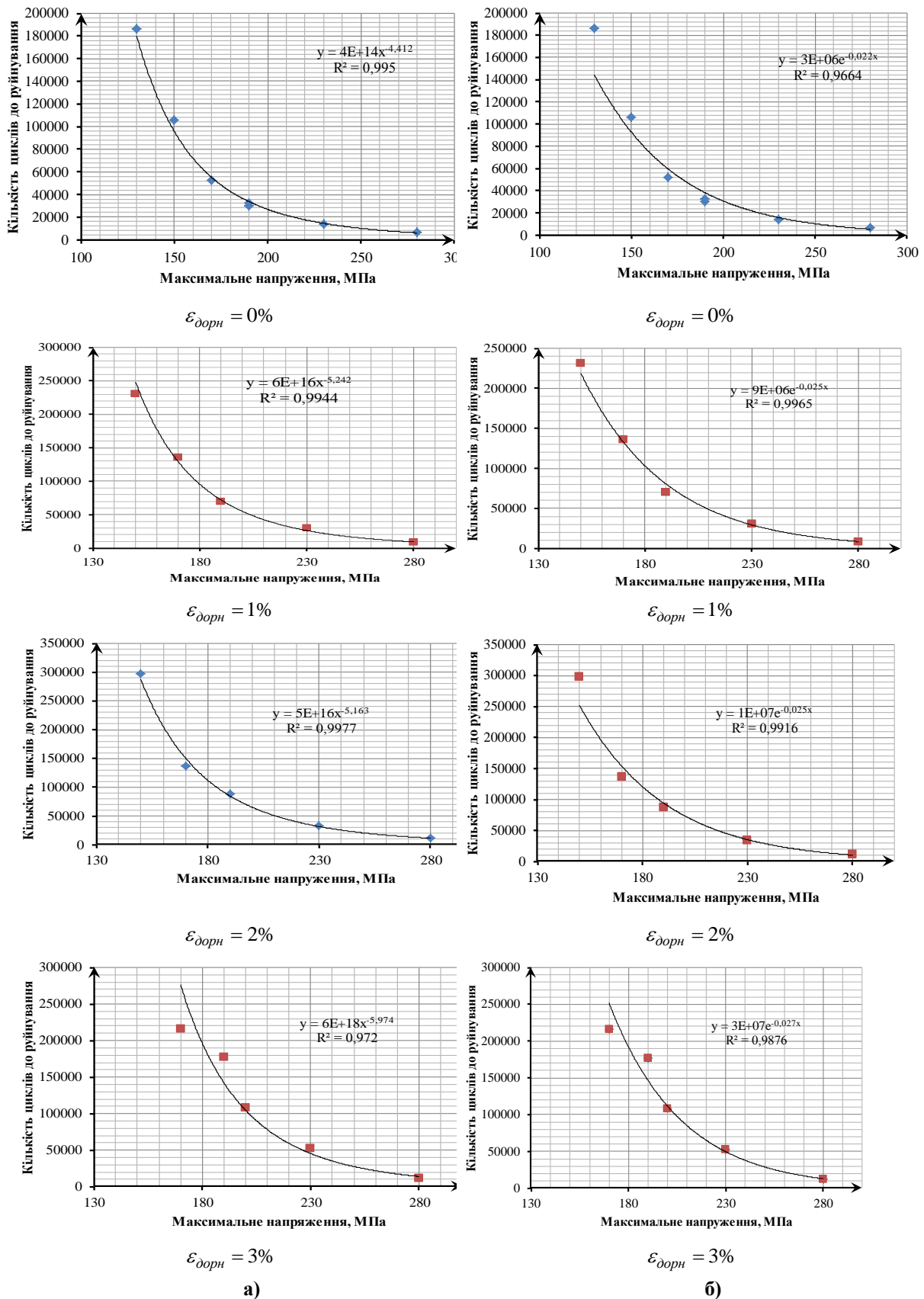


Рис. 1. Криві залежності експериментальних точок N_R від σ_{max} при певному рівні пластичної деформації $\epsilon_{дорн}$: (а)- степеневі криві, (б)- експоненціальні криві

В узагальненому вигляді для опису залежності N_R від σ_{\max} при фіксованому значенні пластичної деформації $\varepsilon_{\text{дорн}}$, степеневе рівняння і експоненціальне рівняння матиме вигляд:

$$N_R = A_{1i} \cdot \sigma_{\max}^{B_{1i}} \tag{8}$$

$$N_R = A_{2i} \cdot e^{\sigma_{\max} \cdot B_{2i}} \tag{9}$$

Параметри A_{1i}, B_{1i} рівняння (8) та A_{2i}, B_{2i} рівняння (9) залежать від властивостей матеріалу і величини пластичної деформації $\varepsilon_{\text{дорн}}$. Експериментально визначені величини цих параметрів для різних рівнів $\varepsilon_{\text{дорн}}$, наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Величини параметрів рівняння (1) та рівняння (2) від величини пластичної деформації $\varepsilon_{\text{дорн}}$

$\varepsilon_{\text{дорн}}$	Степенева		Експоненційна	
	A_{1i}	$D_{1i} = B_{1i} \cdot 10$	$C_{2i} = A_{2i} / 10^6$	$D_{2i} = B_{2i} \cdot 10^2$
0	$4 \cdot 10^{14}$	-44,12	3	-2,2
1	$6 \cdot 10^{16}$	-52,42	9	-2,5
2	$5 \cdot 10^{16}$	-51,63	10	-2,5
3	$6 \cdot 10^{18}$	-59,74	30	-2,7

За даними табл. 2, з використанням регресійного аналізу, були підібрані рівняння для опису залежності кожного з параметрів $A_{1i}, D_{1i}, C_{2i}, D_{2i}$ від величини деформацій $\varepsilon_{\text{дорн}}$ та побудовані криві, де $i = 1, 2$. При цьому у якості залежностей, що аналізувалися були вибрані лінійна, експоненціальна та поліноміальна. Графічно вони представлені на рис. 2-5.

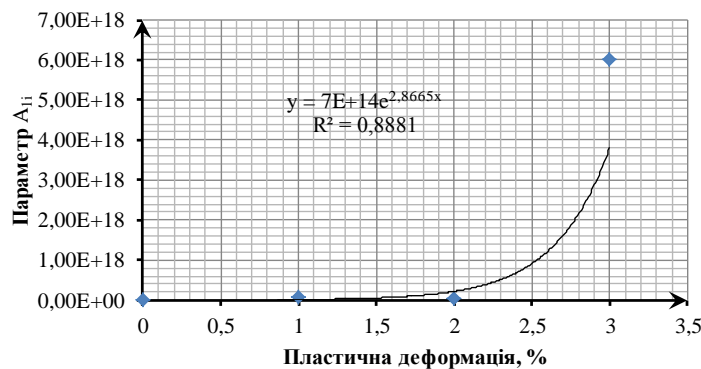


Рис. 2. Експоненціальна крива для опису залежності параметра A_{1i} від величини пластичної деформації $\varepsilon_{\text{дорн}}$

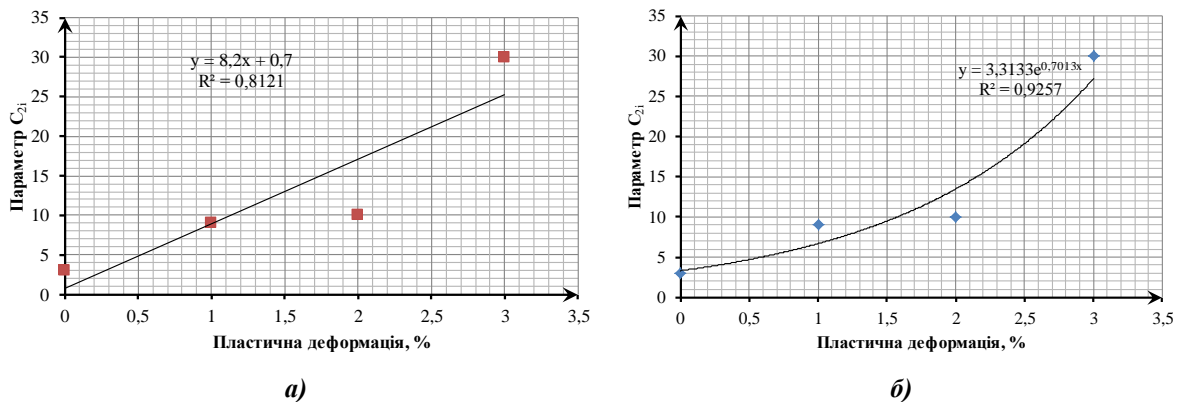


Рис. 3. Крива для опису залежності параметра C_{2i} від величини пластичної деформації $\varepsilon_{\text{дорн}}$
а) лінійна; б) експоненціальна

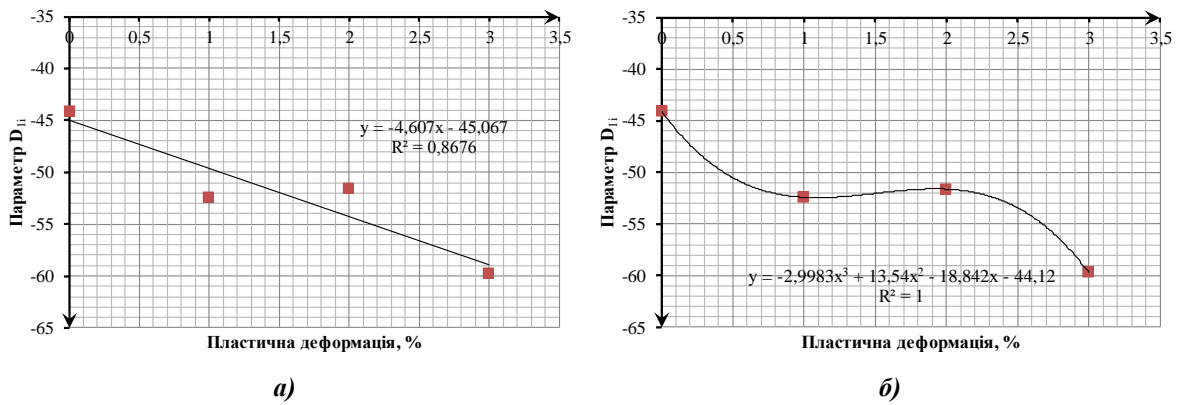


Рис. 4. Крива для опису залежності параметра D_{1i} від величини пластичної деформації $\epsilon_{дорн}$
 а) лінійна; б) експоненціальна

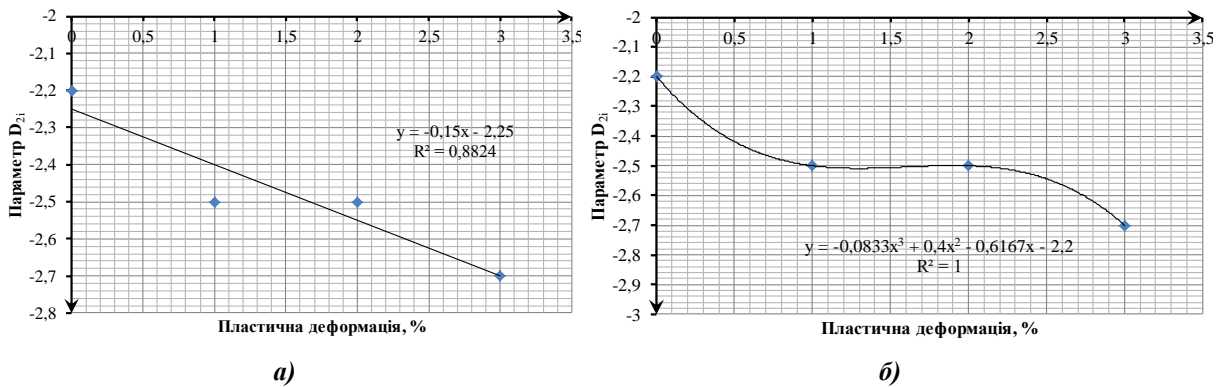


Рис. 5. Крива для опису залежності параметра D_{2i} від величини пластичної деформації $\epsilon_{дорн}$:
 а). лінійна; б) поліноміальна

Для розглянутих вище залежностей параметрів $A_{1i}, D_{1i}, C_{2i}, D_{2i}$ від величини пластичної деформації $\epsilon_{дорн}$, проведемо аналіз щодо визначення доцільності використання того чи іншого запропонованого рівняння. Параметри $A_{1i}, D_{1i}, C_{2i}, D_{2i}$ з новими позначеннями залежно від типу кривої, представлені у табл.3.

Таблиця 3

Рівняння залежності параметрів $A_{1i}, D_{1i}, C_{2i}, D_{2i}$ від величини пластичної деформації $\epsilon_{дорн}$.

Тип рівня	Параметр	коефіцієнт детермінації, R^2	Залежність від пластичної деформації
Експоненційна	A_{11}	0,89	$7 \cdot 10^{14} \cdot e^{2,8665 \cdot \epsilon_{дорн}}$
Лінійна	C_{21}	0,81	$8,2 \cdot \epsilon_{дорн} + 0,7$
Експоненційна	C_{22}	0,93	$3,3133 \cdot e^{0,7013 \cdot \epsilon_{дорн}}$
Лінійна	D_{11}	0,87	$-4,607 \cdot \epsilon_{дорн} - 45,067$
Поліноміальна	D_{12}	1	$-2,9983 \cdot \epsilon_{дорн}^3 + 13,54 \cdot \epsilon_{дорн}^2 - 18,842 \cdot \epsilon_{дорн} - 44,12$
Лінійна	D_{21}	0,88	$-0,15 \cdot \epsilon_{дорн} - 2,25$
Поліноміальна	D_{22}	1	$-0,0833 \cdot \epsilon_{дорн}^3 + 0,4 \cdot \epsilon_{дорн}^2 - 0,616 \cdot \epsilon_{дорн} - 2,2$

Як видно з рис. 2 та даних табл. 2, параметр A_{1i} в залежності від рівня пластичної деформації $\epsilon_{дорн}$ може змінюватись на кілька порядків, що ускладнює визначення адекватного рівняння, тому було запропоновано параметр A_{1i} представити у вигляді:

$$A_{1i} = A_{12}(\epsilon_{дорн}) = f(\epsilon_{дорн}) \cdot 10^{g(\epsilon_{дорн})} \tag{10}$$

Використовуючи дані табл. 2, представимо графічно залежність функцій $f(\varepsilon_{дорн})$ і $g(\varepsilon_{дорн})$ від величини пластичної деформації (рис. 6).

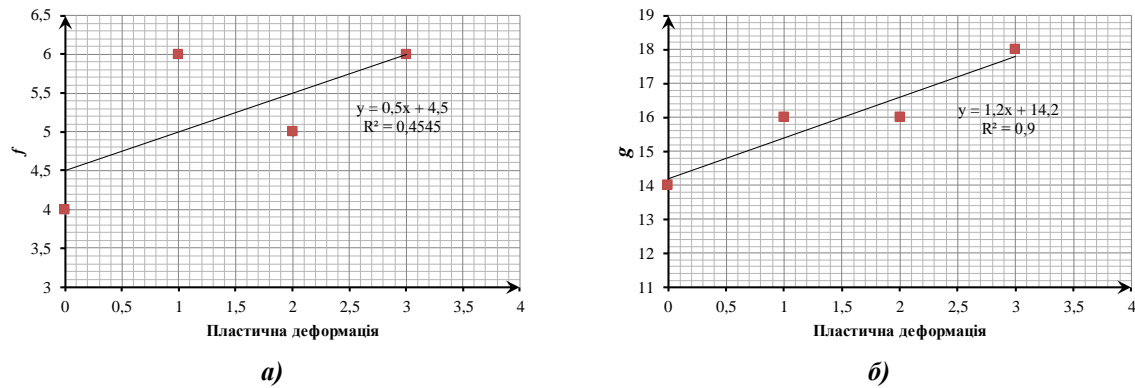


Рис. 6. Залежність функцій від величини пластичної деформації $\varepsilon_{дорн}$: а) $f(\varepsilon_{дорн})$; б) $g(\varepsilon_{дорн})$

З рис.6 видно,що функції $f(\varepsilon_{дорн})$ та $g(\varepsilon_{дорн})$ можуть бути задовільно описані за допомогою лінійної залежності у вигляді:

$$f(\varepsilon_{дорн}) = 0,5 \cdot \varepsilon_{дорн} + 4,5 \tag{11}$$

$$g(\varepsilon_{дорн}) = 1,2 \cdot \varepsilon_{дорн} + 14,2 \tag{12}$$

Підставимо рівняння (11) і (12) в рівняння (10), отримаємо додатково залежність A_{i1} від величини пластичної деформації $\varepsilon_{дорн}$:

$$A_{i1} = A_{i2} = [0,5 \cdot \varepsilon_{дорн} + 4,5] \cdot 10^{[1,2 \cdot \varepsilon_{дорн} + 14,2]} \tag{13}$$

Скориставшись залежностями з табл. 3 і рівняння (13), отримуємо різні комбінації параметрів для рівняння (8) і рівняння (9). Це дозволяє зв'язати кількість циклів до руйнування N_R з максимальними напруженнями σ_{max} та рівнем пластичної деформації $\varepsilon_{дорн}$. Можливі комбінації параметрів представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Можливі комбінації параметрів рівнянь(8) та (9)

Використовувані параметри	Рівняння степеневі залежності	Використовувані параметри	Рівняння експоненційної залежності
A_{11}, B_{11}	$N_R = A_{11} \cdot \sigma_{max}^{B_{11}}$	A_{21}, B_{21}	$N_R = A_{21} \cdot e^{\sigma_{max} \cdot B_{21}}$
A_{11}, B_{12}	$N_R = A_{11} \cdot \sigma_{max}^{B_{12}}$	A_{21}, B_{22}	$N_R = A_{21} \cdot e^{\sigma_{max} \cdot B_{22}}$
A_{12}, B_{11}	$N_R = A_{12} \cdot \sigma_{max}^{B_{11}}$	A_{22}, B_{21}	$N_R = A_{22} \cdot e^{\sigma_{max} \cdot B_{21}}$
A_{12}, B_{12}	$N_R = A_{12} \cdot \sigma_{max}^{B_{12}}$	A_{22}, B_{22}	$N_R = A_{22} \cdot e^{\sigma_{max} \cdot B_{22}}$

З табл. 4 видно, що можна отримати 8 різних рівнянь залежності кількості циклів до руйнування N_R від максимального напруження σ_{max} та рівнем пластичної деформації $\varepsilon_{дорн}$, яке входять в параметри $A_{1i}, B_{1i}, A_{2i}, B_{2i}$. Використовуючи комбінації, представлені в табл. 4 з урахуванням табл. 3, рівняння 13 та залежностями D_{1i}, C_{2i}, D_{2i} , представлених в табл. 2, отримуємо:

$$N_R = [7 \cdot 10^{14} \cdot e^{2,8665 \cdot \varepsilon_{дорн}}] \cdot \sigma_{max}^{(-4,607 \cdot \varepsilon_{дорн} - 45,067)/10} \tag{14}$$

$$N_R = [7 \cdot 10^{14} \cdot e^{2,8665 \cdot \varepsilon_{дорн}}] \cdot \sigma_{max}^{(-2,9983 \cdot \varepsilon_{дорн}^3 + 13,54 \cdot \varepsilon_{дорн}^2 - 18,842 \cdot \varepsilon_{дорн} - 44,12)/10} \tag{15}$$

$$N_R = \left\{ [0,5 \cdot \varepsilon_{дорн} + 4,5] \cdot 10^{[1,2 \cdot \varepsilon_{дорн} + 14,2]} \right\} \cdot \sigma_{max}^{(-4,607 \cdot \varepsilon_{дорн} - 45,067)/10} \tag{16}$$

$$N_R = \left\{ \left[0,5 \cdot \varepsilon_{дорн} + 4,5 \right] \cdot 10^{\left[1,2 \cdot \varepsilon_{дорн} + 14,2 \right]} \right\} \cdot \sigma_{\max}^{\left(-2,9983 \cdot \varepsilon_{дорн}^3 + 13,54 \cdot \varepsilon_{дорн}^2 - 18,842 \cdot \varepsilon_{дорн} - 44,12 \right) / 10} \quad (17)$$

$$N_R = 10^6 \cdot (8,2 \cdot \varepsilon_{дорн} + 0,7) \cdot e^{\sigma_{\max} \cdot (-0,15 \cdot \varepsilon_{дорн} - 2,25) / 100} \quad (18)$$

$$N_R = 10^6 \cdot (8,2 \cdot \varepsilon_{дорн} + 0,7) \cdot e^{\sigma_{\max} \cdot (-0,0833 \cdot \varepsilon_{дорн}^3 + 0,4 \cdot \varepsilon_{дорн}^2 - 0,616 \cdot \varepsilon_{дорн} - 2,2) / 100} \quad (19)$$

$$N_R = 10^6 \cdot (3,3133 \cdot e^{0,7013 \cdot \varepsilon_{дорн}}) \cdot e^{\sigma_{\max} \cdot (-0,15 \cdot \varepsilon_{дорн} - 2,25) / 100} \quad (20)$$

$$N_R = 10^6 \cdot (3,3133 \cdot e^{0,7013 \cdot \varepsilon_{дорн}}) \cdot e^{\sigma_{\max} \cdot (-0,0833 \cdot \varepsilon_{дорн}^3 + 0,4 \cdot \varepsilon_{дорн}^2 - 0,616 \cdot \varepsilon_{дорн} - 2,2) / 100} \quad (21)$$

На рис. 7.представлені порівняння отриманих рівнянь (14) - (21)з експериментальними даними, які наведені в табл. 1

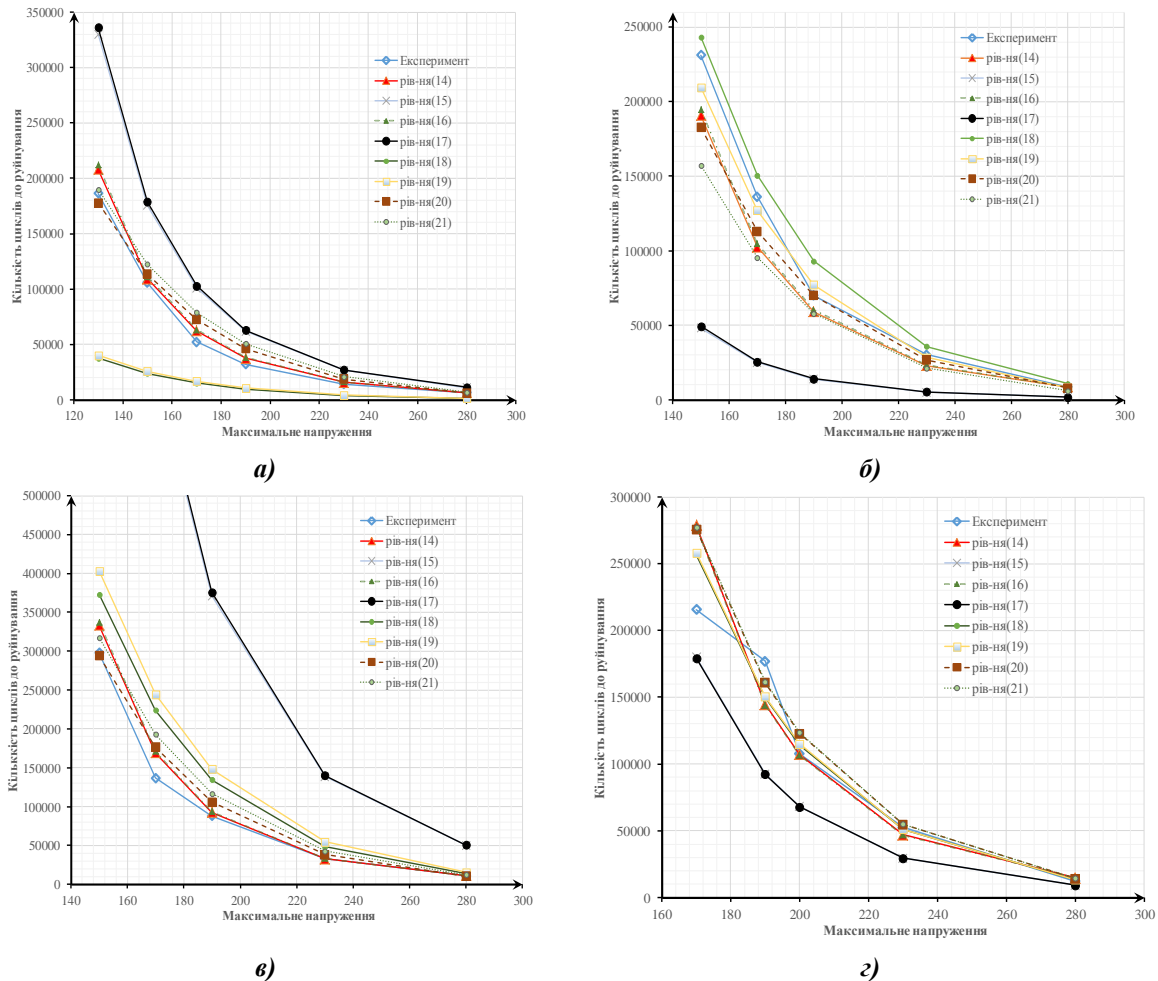


Рис.7. Графік порівняння кількості циклів до руйнування експериментальних даних з теоретичними за рівняннями (6) - (13) від різних рівнів напруження:
а) $\varepsilon_{дорн} = 0\%$;б) $\varepsilon_{дорн} = 1\%$;в) $\varepsilon_{дорн} = 2\%$;г) $\varepsilon_{дорн} = 3\%$.

Для більш детального аналізу представлених рівнянь і кривих були визначені коефіцієнти детермінацій, які оцінюють якість підібраних рівнянь при фіксованих значеннях $\varepsilon_{дорн}$, які представлені в табл. 5.

Таблиця 5

Коефіцієнти детермінації рівнянь (14) - (21) при фіксованих значеннях $\varepsilon_{дорн}$

$\varepsilon_{дорн}, \%$	Р-ня (14)	Р-ня (15)	Р-ня (16)	Р-ня (17)	Р-ня (18)	Р-ня (19)	Р-ня (20)	Р-ня (21)
0	0,9969	0,9970	0,9969	0,9970	0,9809	0,9787	0,9809	0,9787
1	0,9960	0,9943	0,9960	0,9943	0,9934	0,9950	0,9934	0,9950
2	0,9958	0,9946	0,9958	0,9946	0,9762	0,9744	0,9762	0,9744
3	0,9010	0,8984	0,9010	0,8984	0,9385	0,9386	0,9385	0,9386

Для більшої наочності в табл. 6 представлені похибки розрахункової кількості циклів до руйнування N_R по рівняннях (14) - (21) відносно експериментальних значень.

Таблиця 6

Похибка в%, розрахункової кількості циклів до руйнування N_R по рівняннях (14) - (21) щодо експериментальних даних

$\sigma_{\max},$ МПа	$\varepsilon_{дорн},$ %	Р-ня (14)	Р-ня (15)	Р-ня (16)	Р-ня (17)	Р-ня (18)	Р-ня (19)	Р-ня (20)	Р-ня (21)
130	0	11,7	77,1	13,8	80,4	-79,8	-78,5	-4,6	1,9
150	0	3,2	65,8	5,1	68,9	-77,4	-75,6	7,1	15,5
170	0	18,7	93,0	20,9	96,6	-70,8	-68,2	38,1	50,4
190	0	16,7	91,8	18,9	95,4	-69,8	-66,8	43,0	57,3
230	0	12,0	87,4	14,1	91,0	-72,1	-68,7	32,0	48,0
280	0	-2,0	67,2	-0,1	70,3	-80,8	-77,9	-9,0	4,7
150	1	-17,4	-79,	-15,7	-78,7	5,2	-9,3	-21,0	-31,9
170	1	-24,8	-81,6	-23,2	-81,3	10,5	-6,7	-17,0	-29,9
190	1	-15,8	-80,1	-14,0	-79,6	33,0	10,2	-0,2	-17,3
230	1	-24,8	-83,1	-23,2	-82,8	17,5	-6,5	-11,8	-29,8
280	1	0,4	-78,6	2,4	-78,2	25,5	-5,0	-5,8	-28,7
150	2	12,0	322,7	13,4	328,0	25,4	35,5	-1,2	6,7
170	2	23,3	381,2	24,9	387,2	63,5	78,5	28,8	40,7
190	2	5,0	321,7	6,3	327,0	52,8	68,6	20,4	32,8
230	2	-1,7	315,5	-0,5	320,7	45,6	63,9	14,7	29,2
280	2	1,5	351,9	2,8	357,6	22,2	41,2	-3,7	11,2
170	3	29,1	-16,6	28,7	-16,9	19,0	19,6	27,8	28,4
190	3	-18,2	-47,7	-18,5	-47,9	-15,5	-15,0	-9,2	-8,7
200	3	-0,7	-36,7	-1,0	-37,0	6,0	6,7	13,9	14,5
230	3	-10,4	-43,7	-10,8	-43,8	-3,1	-2,5	4,0	4,7
280	3	21,8	-24,6	21,3	-24,9	8,8	9,7	16,8	17,7

З представлених результатів на рис. 7 та даних табл. 5 і табл. 6 можна виділити 2 рівняння, які найбільш точно визначають кількість циклів до руйнування N_R для матеріалу Д16чТ при заданих значеннях максимального напруження σ_{\max} та пластичної деформації $\varepsilon_{дорн}$, а саме (14) та (16). Округляючи коефіцієнти в цих рівняннях до більш простого виду для зручності розрахунків, які при цьому істотно не впливають на точність результатів, отримуємо, відповідно:

$$N_R(\sigma_{\max}, \varepsilon_{дорн}) = \left[7 \cdot 10^{14} \cdot e^{2,9 \cdot \varepsilon_{дорн}} \right] \cdot \sigma_{\max}^{(-4,6 \cdot \varepsilon_{дорн} - 45,1)/10} \quad (22)$$

$$N_R(\sigma_{\max}, \varepsilon_{дорн}) = \left\{ \left[0,5 \cdot \varepsilon_{дорн} + 4,5 \right] \cdot 10^{\left[1,2 \cdot \varepsilon_{дорн} + 14,2 \right]} \right\} \cdot \sigma_{\max}^{(-4 \cdot \varepsilon_{дорн} - 45,1)/10} \quad (23)$$

У нашому випадку, при округленні коефіцієнтів в частині B_{11} , виходить наблизити результат розрахункових даних до експериментальних, що представлено в табл.7.

Таблиця 7

Результати порівняння експериментальних даних з теоретичними даними до і після округлення, похибка в%

σ_{\max} , МПа	$\varepsilon_{\text{дорн}}$, %	Р-ня (14)	Р-ня (22)	Р-ня (16)	Р-ня (23)
130	0	11,7	9,9	13,8	12,0
150	0	3,2	1,5	5,1	3,4
170	0	18,7	16,7	20,9	18,9
190	0	16,7	14,7	18,9	16,9
230	0	12,0	10,0	14,1	12,1
280	0	-2,0	-3,8	-0,1	-2,0
150	1	-17,4	-18,5	-15,7	-16,8
170	1	-24,8	-25,8	-23,2	-24,2
190	1	-15,8	-16,9	-14,0	-15,2
230	1	-24,8	-25,9	-23,2	-24,3
280	1	0,4	-1,1	2,4	1,0
150	2	12,0	11,0	13,4	12,3
170	2	23,3	22,1	24,9	23,7
190	2	5,0	4,0	6,3	5,1
230	2	-1,7	-2,7	-0,5	-1,5
280	2	1,5	0,4	2,8	1,7
170	3	29,1	28,4	28,7	27,9
190	3	-18,2	-18,7	-18,5	-19,0
200	3	-0,7	-1,3	-1,0	-1,7
230	3	-10,4	-11,0	-10,8	-11,4
280	3	21,8	21,0	21,3	20,5

В зв'язку з тим, що кількість циклів до руйнування N_R є функцією залежності від змінних σ_{\max} та $\varepsilon_{\text{дорн}}$, її можна описати поверхнею за допомогою рівнянь (22) і (23), що представлено на рис. 8-9.

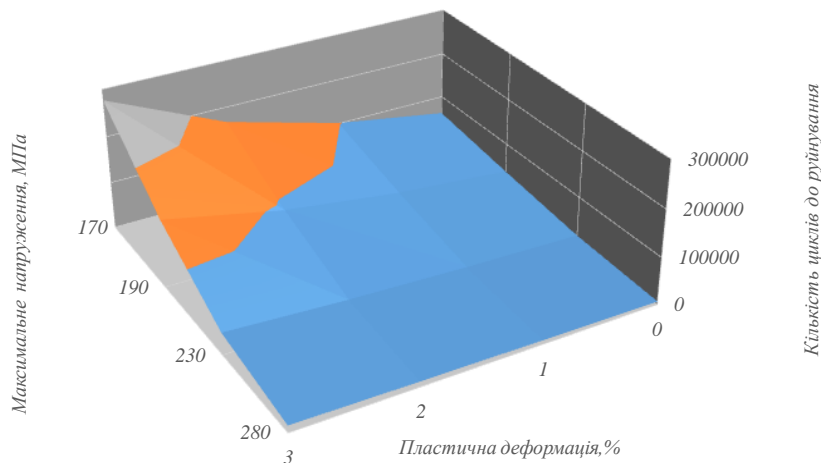


Рис. 8. Гранична поверхня за рівнянням (22)

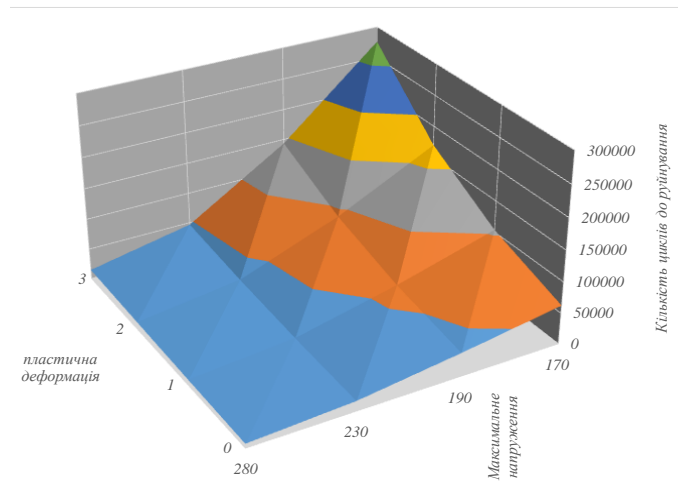


Рис. 9. Гранична поверхня за рівнянням (23)

Висновки

На основі отриманих експериментальних даних були побудовані залежності між кількістю циклів до руйнування та величинами номінальних напружень у циклі навантаження. Було показано, що найкраще ці залежності можуть бути описані за допомогою степеневі і експоненціальній функцій. Проведено порівняння результатів запропонованої математичної моделі з експериментальними значеннями, що підтвердили можливість використовувати запропоновані рівняння (22) та (23) для подальших розрахунків. Представлена гранична поверхня залежності кількості циклів до руйнування від рівня пластичної деформації при дорнуванні та максимального напруження в циклі.

Список використаної літератури

1. Manson S.S. Fatigue: A Complex Subject-Some Simple Approximations // Experimental Mechanics. 1965. V. 5, no. 7. P. 193-226.
2. Coffin L.F. A study of cyclic thermal stress in a ductile metal / L.F. Coffin // Trans. ASME. – 1954. – 76. – P. 931 – 950
3. Halford GR, Manson SS (1968) Application of a method of estimating high temperature low-cycle fatigue behavior of materials. // Trans ASM 61: P. 94–102
4. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С., Антипов Е.А. Пластичность и прочность материалов при нестационарных нагружениях // Київ: Наук. думка, 1984. — 216 с..
5. Н.С.Можаровский, Е.А.Антипов, Н.И.Бобырь. Ползучесть и долговечность материалов при программном нагружении. // Київ. Вища школа, 1982г. 136с.
6. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. Б-ка расчетчика. // М.: Машиностроение, 1984г. 256 с.
7. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. - Дерев.с англ. - М.: Машиноведение, 1974. - 344 с.
8. Stowell E.Z. A study of the energy criterion for fatigue. // Hue 1. Eng. and Des., 1966, 3, p.32-40.
9. Stowell E.Z. Theory of metal fatigue at elevated temperatures. - Nucl. Eng. and Des., 1969, 9, N1, p.239-257.
10. Проблемы прочности, долговечности и надежности продукции машиностроения. Расчеты прочности элементов конструкций при малоцикловом нагружении. Методические указания / гл. ред. Акад. Фролов К.В. – М.: АН СССР, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, 1987. – 42 с
11. Піманов В.В. Исследование процесса дорнования технологических отверстий в авиационном сплаве Д16чТ / В.В. Піманов, О.В. Тимошенко, А.М. Бабак // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. – 2015. – №1(75). – С. 144-150.
12. Яхно Б. О. Чисельне моделювання залишкових напружень і пошкоджуваність після дорнування технологічних отворів в авіаційному сплаві Д16чТ / Б. О. Яхно. // Вісник НТУУ «КПІ»: серія «Машинобудування». – 2015. – №1(73). – С. 96–99.
13. Коваль В.В. Вплив пошкоджуваності на НДС пластинки з отвором при статичному навантаженні / В.В. Коваль // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. – 2007. – №50. – С.162-168.