

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бреславський Дмитро Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем і процесів управління, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

Breslavsky Dmytro Vasylovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Control Systems and Processes, National Technical University "KhPI"; tel.: (057)-707-64-54; e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

Бреславська Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри теоретичної механіки, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: (057)-707-63-73; e-mail: breslavska@ukr.net.

Breslavska Olena Oleksandrivna – Candidate of Technical Sciences, Research Associate of the Department of Theoretical Mechanics, National Technical University "KhPI"; tel.: (057)-707-63-73; e-mail: breslavska@ukr.net.

Хорошун Андрій Сергійович – магістр з інформатики, web-розробник у компанії SKALAR; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: a.s.khoroshun@gmail.com.

Khoroshun Andriy Sergiyovych – Master of Informatics, Web-developer of the company SKALAR; tel.: (057) 707-64-54; e-mail: a.s.khoroshun@gmail.com.

УДК 539.3

Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, В. М. КОНКІН, В. О. МЕТЕЛЬОВ**ПЛАСТИЧНІСТЬ ТА ПОВЗУЧІСТЬ СТАЛІ 3 ПРИ КІМНАТНІЙ ТЕМПЕРАТУРІ**

В статті наведено отримані авторами експериментальні результати з деформування зразків зі сталі 3 при кімнатній температурі й напруженнях, що перевершують межу міцності. Обговорюються рівняння стану, що можуть бути застосовані для опису деформування цієї сталі за часом. Виявлено істотну анізотропію властивостей повзучості. Порівняння даних, отриманих розрахунками, з експериментальними показало задовільну можливість використання запропонованих рівнянь.

Ключові слова: пластичність, повзучість, рівняння стану, криві повзучості, анізотропія властивостей повзучості, прокатка, експериментальні дослідження, плоскі зразки.

Вступ. Деформування матеріалів за межами пружності призводить до виникнення незворотних деформацій. Зазвичай вони розподіляються на миттєві деформації пластичності та деформації повзучості, що залежать від часу. Як відмічають Ж. Леметр та Ж.-Л. Шабош [1], для більшості металів деформації повзучості є суттєвими при температурі $T > T_{nl}/3$, де T_{nl} – температура плавлення, однак існують метали, що виявлять властивості повзучості й при кімнатній температурі $T = 300$ К, навіть якщо $T_{nl} = 1400$ К. Часто деформації повзучості виникають на тлі миттєвих пластичних деформацій. При цьому часто рівень напружень є досить високим, що призводить до дуже швидкого руйнування матеріалу. У цьому випадку таке явище носить назву короткочасної повзучості [2, 3].

Особливо важливим є аналіз рівня деформацій повзучості, які є короткочасними, при розрахунках технологічних процесів, наприклад прокатки, волочіння тощо, у зв'язку з необхідністю точного визначення розмірів листових заготовок та їхнього напружено-деформованого стану у будь-який момент часу [4, 5]. Розрахункове оцінювання незворотних деформацій потребує формулювання відповідних рівнянь стану та проведення експериментальних досліджень для визначення значень констант, що до них входять.

Для опису плинності матеріалу при складному напруженому стані найкращі результати як в теорії повзучості, так й в теорії пластичності надають теорії інкрементального типу [6-9]. При аналізі деформування

листових матеріалів, отриманих прокаткою, часто встановлюють ортотропію залежностей деформацій чи їхніх швидкостей від напружень. У цьому випадку застосовують спеціальні форми визначальних співвідношень, що її враховують [1, 7, 10-12].

Дану статтю присвячено дослідженню деформування Сталі 3 при кімнатній температурі. Надано опис методики експериментів при простому напруженому стані. Наведено отримані експериментальні результати: діаграми деформування зразків, криві повзучості зразків, що були вирізані в трьох напрямках з листового матеріалу. Запропоновано рівняння стану, які враховують присутність складових, викликаних миттєвою пластичністю та повзучістю матеріалу, та отримано значення констант, що до них входять.

Експериментальні дослідження плоских зразків.

В роботі виконано дослідження деформування зразків зі Сталі 3. Для всіх експериментів було використано сталеві листи однієї партії постачання. Було проведено дві групи експериментів: зняття кривих деформування для встановлення залежності «напруження-деформація» при одноісному розтягу; отримання залежності повної деформації зразків від часу. Всі дослідження було виконано при нормальній температурі 293 К.

Для зняття діаграми деформування зразків з листового матеріалу було вирізано по три зразки: вздовж, поперек напрямку прокатки та під кутом 45° до нього. Зразки виготовлялись фрезеруванням за вимогами ДСТУ 3248-81. До експериментів було залучено ви-

пробувальну машину Neckert FP-100/1 кафедри опору матеріалів НТУ «ХП».

За результатами досліджень встановлено ізотропію миттєвого деформування матеріалу. Похибка не перевищувала 10 % та була однаковою для різних зразків, вирізаних з різних напрямів. Експериментальні дані використано для побудови діаграми деформування (рис. 1).

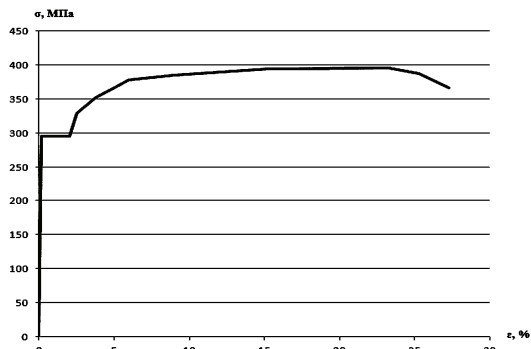


Рисунок 1 – Діаграма деформування Сталі 3

За дослідними даними встановлено, що модуль пружності матеріалу, що розглядається, дорівнює $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, межа плинності $\sigma_T = 295,8$ МПа, межа міцності $\sigma_B = 395,3$ МПа. Відмітимо, що діаграма має досить значну площадку плинності. Значення руйнівної деформації складала 27-28 %.

До експериментів на повзучість було залучено стандартну випробувальну машину АІМА-5-2 [13] лабораторії кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП». Використовувався модифікований пристрій для закріплення плоских зразків. Зразки також вирізалися з тих самих трьох напрямів та виготовлялись фрезеруванням за ДСТУ 3248-81. На рис. 2 надано загальний вигляд та їхні основні розміри. Вимірювання переміщень здійснювалось за допомогою індикаторів годинникового типу з можливістю вимірювань до 0,01 мм.

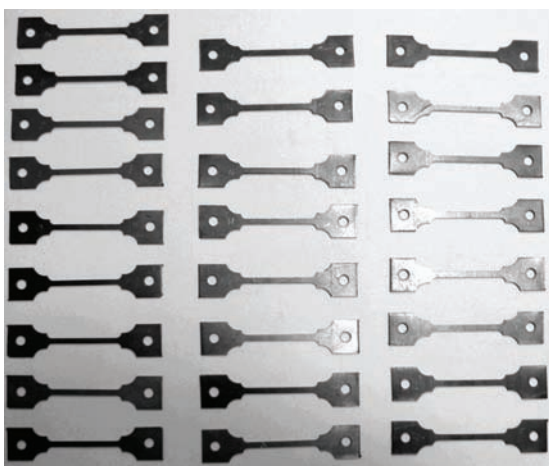


Рисунок 2 – Зразки для випробувань на повзучість

Для досліджень було обрано діапазон напружень, що суттєво перебільшує межу плинності. Експерименти виконувались для трьох значень напруження розтягу: 378,7 МПа, 366,8 МПа та 352,3 МПа.

Проведено випробування 27 зразків: три групи

експериментів для кожного значення напруження, в кожній з яких випробувалося по 9 зразків. Досліджено по три зразки для трьох напрямків – вздовж, поперек напрямку прокатки та під кутом 45° до нього. Розкид даних не перевищував 18-23 %, що є типовим для експериментів на повзучість [6].

За результатами дослідів встановлено, що для Сталі 3, яка розглядається, у прийнятному діапазоні напружень є характерною короткочасна повзучість. Деформації повзучості розвиваються після миттєвих деформацій пластичності. Зауважимо, що повзучість має обмежений у часі характер: вона інтенсивно розвивається у перші хвилини, та практично зупиняється після 30 хвилин деформування. Один з зразків (вирізаний поперек прокатки, при дії напруження 378,8 МПа) було залишено під навантаженням на термін 2 місяці (61 день), при цьому за цей час деформація не була зафіксована датчиками, що застосовувались. У зв'язку з цим було прийнято рішення проводити експерименти на часовій базі 0,5 години. По одному зі зразків було випробувано на часовій базі 1,5 години (90 хвилин). Додаткова деформація була на рівні $1-2 \cdot 10^{-3}$ %.

Загальні криві деформування наведено на рис. 3–5. Тут кривою 1 позначено дані експериментів з напруженням 378,7 МПа, кривою 2 – 366,8 МПа та кривою 3 – 352,3 МПа.

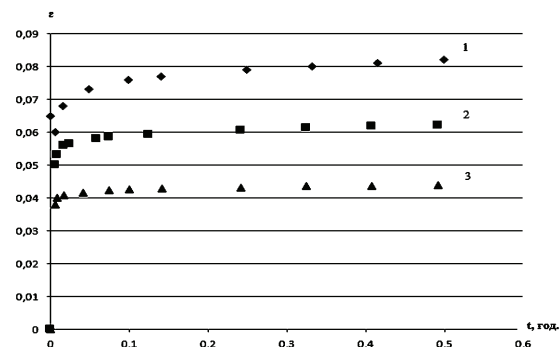


Рисунок 3 – Залежність повної деформації зразку від часу. Зразки, що вирізано вздовж напрямку прокатки

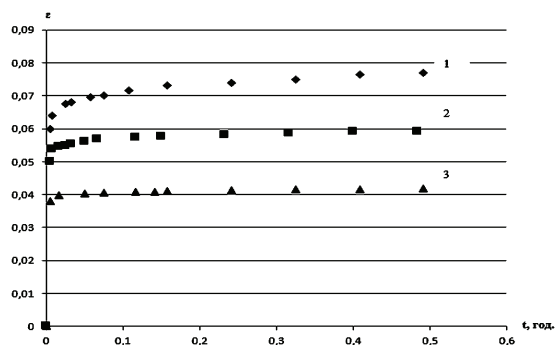


Рисунок 4 – Залежність повної деформації зразку від часу. Зразки, що вирізано поперек напрямку прокатки

З кривих деформування за часом було виділено криві повзучості (рис. 6–8). Для цього від значень повних деформацій віднімалися миттєві пружні та пластичні, які були визначені для даного напруження за діаграмою деформування. На рис. 6 наведено дані для

зразків, що було вирізано вздовж прокатки, рис. 7 – поперек прокатки, рис. 8 – під кутом 45° до напрямку прокатки. На цих графіках кривими 1, 2, 3 позначені дані для трьох значень напруження розтягу: 378,7 МПа, 366,8 МПа та 352,3 МПа відповідно.

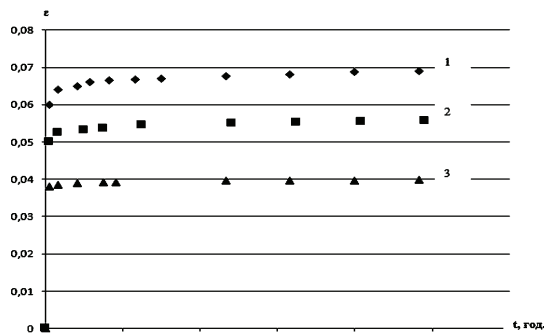


Рисунок 5 – Залежність повної деформації зразку від часу. Зразки, що вирізано під кутом 45° до напрямку прокатки

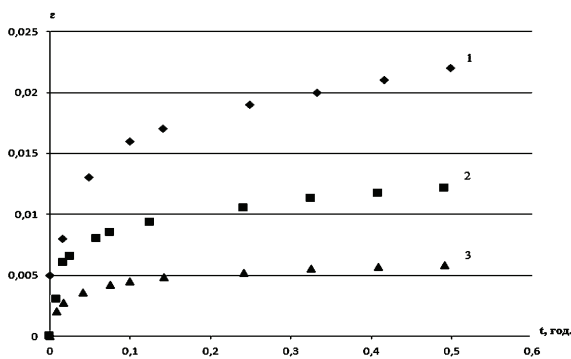


Рисунок 6 – Криві повзучості. Зразки, що вирізано вздовж напрямку прокатки

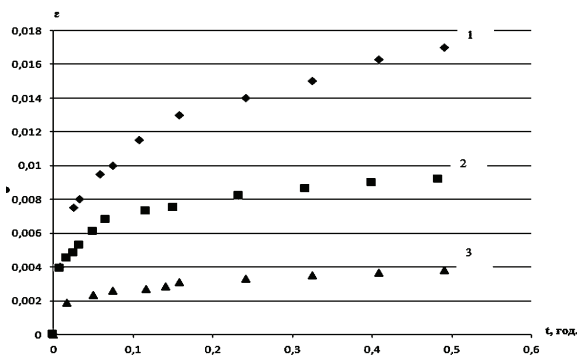


Рисунок 7 – Криві повзучості. Зразки, що вирізано поперек напрямку прокатки

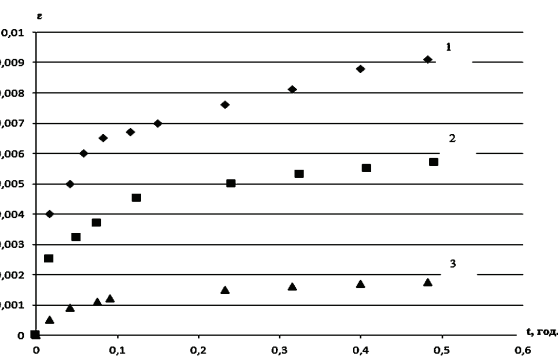


Рисунок 8 – Криві повзучості. Зразки, що вирізано під кутом 45° до напрямку прокатки

Аналіз отриманих експериментальних результатів для всіх напрямків показує, що для всіх значень напружень з обраного діапазону форма кривих повзучості відповідає першому етапу повзучості матеріалів – неусталеної повзучості.

Рівняння стану. Надамо опис рівнянь стану для однорідного матеріалу з ізотропією властивостей пружності та пластичності та ортотропними (транверсально-ізотропними) властивостями повзучості. Розглядаємо випадок малих деформацій. Для повної деформації $\underline{\varepsilon}$ приймаємо гіпотезу адитивності її складових: пружної \underline{e} та незворотної деформації $\underline{\varepsilon}^{in}$:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{e} + \underline{\varepsilon}^{in} \quad (1)$$

У загальному випадку, коли початкове навантаження є таким, що другий інваріант тензору напружень σ_i (інтенсивність напружень за Мізесом) перевищує межу плину [1], незворотна деформація $\underline{\varepsilon}^{in}$ складається з деформації пластичності \underline{p} та деформації повзучості \underline{c} :

$$\underline{\varepsilon}^{in} = \underline{p} + \underline{c} \quad (2)$$

Розглядаємо адіабатичні процеси при незмінних температурах. При цьому всі основні невідомі - вектори напружень $\underline{\sigma}$, деформацій $\underline{\varepsilon}$, $\underline{\varepsilon}^{in}$, \underline{e} , \underline{p} , переміщень \underline{u} – є функціями, що визначені при заданій температурі.

Для визначення пластичних деформацій застосуємо теорію інкрементального типу – теорію плину з ізотропним зміцненням [6]. Використаємо умову пластичності Губера-Мізеса:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - [\Phi(\int d\bar{p}_i)]^2, \quad (3)$$

де $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{ii}$ – компоненти девіатора тензору напружень, $\int d\bar{p}_i$ – параметр Удквіста, та інтенсивність деформацій Мізеса: $p_i = \Phi(\int d\bar{p}_i)$. В цьому випадку компоненти приростів пластичних деформацій визначаються наступним чином:

$$dp_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{p}_i}{\sigma_i} s_{ij} \quad (4)$$

Далі розглянемо визначальні співвідношення повзучості. Застосуємо тензорні співвідношення інкрементальної теорії повзучості [1, 6]. Використовуємо запропоновані О.К.Морачковським [11] визначальні тензорно-лінійні рівняння для матеріалів з анізотропією властивостей повзучості та пошкоджуваності. Рівняння формуємо в головних осях симетрії повзучості і пошкоджуваності анізотропного тіла. Обмежимо випадком двовимірних задач теорії повзучості. Розглядаємо плоский напружений стан з векторами напружень $\underline{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$ та швидкостей деформацій повзучості $\underline{\dot{c}} = (\dot{c}_{11}, \dot{c}_{22}, 2\dot{c}_{12})^T$.

По-перше розглянемо визначальні співвідношення для закону повзучості. Зв'язок між компонентами

вектору деформацій повзучості та напружень приймаємо у вигляді [1, 11] за умов його модифікації для застосування закону зміцнення (за термінологію роботи [1] – закону у формі добутку)

$$\dot{\underline{c}} = c_{vM}^{-\alpha} \frac{\dot{D}}{\sigma_v} [B] \underline{\sigma}. \quad (5)$$

Тут вжито такі позначення

$\dot{D} = \dot{D}(\sigma_v; T) = \sigma_{ij} \dot{c}_{ij}$ – потенціал дисипації для швидкостей деформацій повзучості;

$$[B] = \begin{bmatrix} b_{1111} & b_{1122} & 0 \\ b_{1122} & b_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & b_{1212} \end{bmatrix} \text{ – матриця, що містить}$$

постійні до закону ортотропної повзучості матеріалу при двовимірному напруженому стані, при цьому b_{ijkl} – компоненти тензору властивостей повзучості матеріалу. $b_{1122} = -0,5 \cdot b_{1111}$ [11];

$$c_{vM} = \sqrt{\frac{2}{3}} c_{ij} c_{ij} \text{ – інтенсивність деформацій повзучості; } \alpha \text{ – матеріальна постійна до закону зміцнення;}$$

$\sigma_v = \underline{\sigma}^T [B] \underline{\sigma}$ – еквівалентне напруження, яке є спільним інваріантом тензорів напружень та матеріальних констант, $\sigma_v = (b_{1111} \sigma_{11}^2 + 2b_{1122} \sigma_{11} \sigma_{22} + b_{2222} \sigma_{22}^2 + 4b_{1212} \sigma_{12}^2)^{1/2}$ [11].

Потенціал повзучості приймаємо у формі $D = \sigma_v^{n+1}$, де n – значення степені у законі повзучості. При цьому отримуємо узагальнення закону зміцнення (закону первісної повзучості), який є перевіреним для ізотропних та трансверсально-ізотропних матеріалів [1, 11]:

$$\dot{\underline{c}} = c_{vM}^{-\alpha} \sigma_v^{n-1} [B] \underline{\sigma}. \quad (6)$$

Як відомо [6], значення матеріальних постійних, що входять до співвідношення (6), визначаються за експериментальними даними. Застосовуються результати досліджень з одновісної повзучості зразків, що їх вирізано з листового матеріалу. При цьому вже відпрацьовано є методика, згідно з якою визначаються напрямки у сталевому листі, в яких вирізають зразки. Це 0° , 90° та 45° відносно до напрямку прокатки [11].

Наведемо результати, що їх отримано після статистичної обробки даних проведених в роботі експериментальних досліджень з повзучості зразків зі сталі 3 (криві на рис. 6-8). Аналіз графіків показує, що залежність деформації від часу є характерною для першої ділянки повзучості, чи нествановленої повзучості. Відомо [6], що при цьому найкращі результати з опису експериментальних кривих надає застосування гіпотези зміцнення:

$$\dot{c}_i = B_i c_i^{-\alpha_i} \sigma^{n_i}. \quad (7)$$

Тут індексом i , $i = 1, 2, 3$ позначено напрямок орієнтації зразку: 1 відповідає куту до напрямку прокатки $\varphi = 0^\circ$, 2 – $\varphi = 90^\circ$, 3 – $\varphi = 45^\circ$; B_i , n_i , α_i – константи, що визначаються експериментально. За аналізом експериментальних кривих приймаємо: $n_i = n$, $\alpha_i = \alpha$, $i = 1, 2, 3$. Визначення констант ефективно проводити для проінтегрованого співвідношення (7):

$$c_i = b_i \sigma^{m_i} t^k. \quad (8)$$

Тут введено позначення: $b_i = ((\alpha + 1) B_i)^{\frac{1}{\alpha + 1}}$, $i = 1, 2, 3$, $m = \frac{n}{\alpha + 1}$, $k = \frac{1}{\alpha + 1}$.

Обробка експериментальних даних надає можливість визначити значення констант b_i , m , k . Для цього по-перше розглядають дані, отримані в експериментах з $\varphi = 0^\circ$ (рис. 6). З трьох кривих повзучості, отриманих в дослідах з трьома різними значеннями напруження σ_j , визначають три пари експериментальних даних (c_j , t_j), $j = 1, 2, 3$. За розв'язком системи алгебраїчних рівнянь

$$c_j = b_1 \sigma_j^m t_j^k \quad (9)$$

визначають значення констант b_1 , m , k , де b_1 – константа у рівнянні нествановленої повзучості, що відноситься до першого напрямку $\varphi = 0^\circ$. Далі, за відповідними кривими, одержаними у двох інших напрямках $\varphi = 90^\circ$ та $\varphi = 45^\circ$, визначають значення констант b_2 та b_3 .

Далі проінтегруємо залежності (6) та представимо їх у наступному вигляді:

$$\underline{c} = b_{1111}^{\frac{m+1}{2}} \sigma_v^{m-1} [\bar{B}]^k, \quad (10)$$

$$\text{де } [\bar{B}] = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} & 0 \\ \beta_{12} & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\beta \end{bmatrix};$$

$$\beta_{12} = -\frac{1}{2} b_{1111}, \beta_{22} = \frac{b_{2222}}{b_{1111}}, 4\beta = \frac{b_{1212}}{b_{1111}}.$$

Зіставлення співвідношень (9) з рівняннями стану (10) надає можливість визначення компонентів тензору властивостей повзучості матеріалу b_{ijkl} . Для напрямків 1 і 2, в яких розтяг зразків співпадає з напрямками головних осей симетрії, отримуємо:

$$b_{1111} = b_1^{\frac{2}{m+1}}, b_{2222} = b_2^{\frac{2}{m+1}}. \quad (11)$$

Для напрямку 3, де $\varphi = 45^\circ$ та ($\cos \varphi = \sin \varphi = \frac{\sqrt{2}}{2}$),

компоненти вектору напружень обчислюються як:

$$\sigma_{11} = \frac{1}{2} \sigma_3, \sigma_{22} = \frac{1}{2} \sigma_3, \sigma_{12} = \frac{1}{2} \sigma_3,$$

а еквівалентне напруження

$$\sigma_v = \sigma_3 \left(\frac{1}{4} (1 + 2\beta_{12} + \beta_{22} + 4\beta) \right)^{1/2}. \text{ З урахуванням цього}$$

го визначаємо:

$$\beta = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{\cos^4(\pi/4)} (b_3 / b_1)^{\frac{2}{m+1}} - (b_2 / b_1)^{\frac{2}{m+1}} \right] \text{ та} \quad b_{1212} = 4\beta b_{1111}. \quad (12)$$

Після цього з застосуванням залежностей

$$\tilde{B} = \frac{\left(b_{1111}^{\frac{m+1}{2}} \right)^{\alpha+1}}{\alpha+1}, n = m(\alpha+1), \alpha = \frac{1}{k} - 1 \quad (13)$$

виконується зворотний перерахунок констант, що входять до співвідношень типу (6). Остаточоно отримуємо

$$\dot{\epsilon} = \tilde{B} c_{vM}^{-\alpha} \sigma_V^{n-1} [\tilde{B}] \sigma \quad (14)$$

В експериментах з деформування зразків зі Сталі 3 було визначено, що вони виявляють властивості невстановленої повзучості. Далі наведемо значення постійних матеріалу, що отримані після обробки експериментальних даних.

Розглядалися криві 1-ї стадії повзучості, що було отримано у експериментах при трьох значеннях напружень на зразках, вирізаних у трьох напрямках: 0° (1), 90° (2) та 45° (3) відносно до напрямку прокатки. Обробкою кривих з застосуванням співвідношень (9) було отримано такі значення констант повзучості:

$$m = 18,305, k = 0,1887;$$

$$\left((\alpha + 1) \tilde{B} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} = b_1 = 3,166 \cdot 10^{-31} \text{ (10 МПа)}^{-m}/\text{г};$$

$$b_2 = 0,75 \cdot b_1; \quad b_3 = 0,42 \cdot b_1; \quad n = 97,35; \quad \alpha = 4,32. \quad (15)$$

Також для матеріалу, що розглядається, за формулами (11), (12) отримано значення компонентів тензору b_{ijkl} :

$$b_{1111} = 6,9 \cdot 10^{-4}; \quad b_{1122} = -3,45 \cdot 10^{-4};$$

$$b_{2222} = 6,7 \cdot 10^{-4}; \quad b_{1212} = 1,85 \cdot 10^{-4}.$$

Отримані значення констант повзучості матеріалу було застосовано до побудови кривих повзучості та подальшого порівняння їх з експериментальними, (рис. 6-8).

На рис. 9 наведено криві повзучості зразків, що вирізані вздовж прокатки при напруженні 378,7 МПа (крива 1), 366,8 МПа (крива 2) та 352,3 МПа (крива 3). Точками позначено експериментальні дані, розрахункові надано суцільними лініями. Обробку дослідних даних виконано за співвідношеннями (9), $i = 1$.

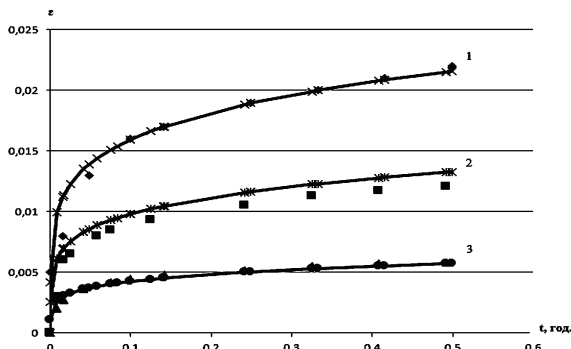


Рисунок 9 – Порівняння чисельних та експериментальних результатів. Зразки, вирізані вздовж прокатки

Порівняння чисельних та експериментальних результатів, що наведені на рис. 9, показує, що запропоноване рівняння (9) цілком задовільно надає опис даних повзучості при розтягу. Найбільша відміна є для кривої 2, де різниця між розрахунковими та експериментальними даними не перевершує 15 %.

Після отримання значень констант повзучості для рівняння (15) було виконано порівняння даних для всіх варіантів. Рис. 10–12 містять такі дані для трьох значень напружень 378,7 МПа, 366,8 МПа та 352,3 МПа відповідно. Тут також точками позначено експериментальні дані, розрахункові надано суцільними лініями, крива 1 відповідає напрямку 1 (вздовж

прокатки), крива 2 – 2 (поперек), крива 3 – 3 під кутом 45° до напрямку прокатки.

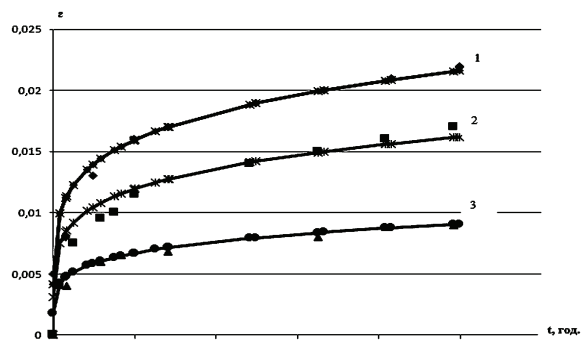


Рисунок 10 – Порівняння чисельних та експериментальних результатів. Зразки, вирізані у трьох напрямках при напруженні 378,7 МПа

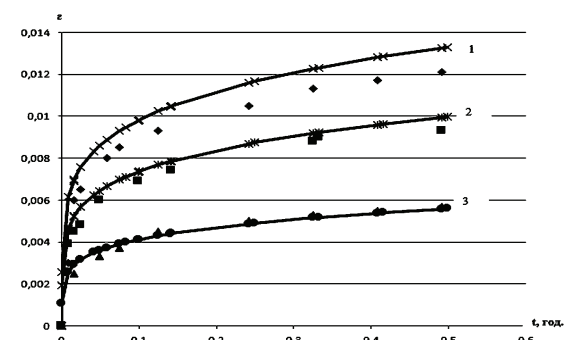


Рисунок 11 – Порівняння чисельних та експериментальних результатів. Зразки, вирізані у трьох напрямках при напруженні 366,8 МПа

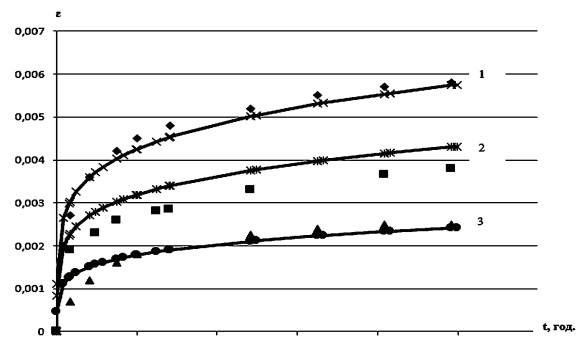


Рисунок 12 – Порівняння чисельних та експериментальних результатів. Зразки, вирізані у трьох напрямках при напруженні 352,3 МПа

За аналізом побудованих кривих робимо висновок, що отримані залежності цілком задовільно описують дані експериментальних досліджень з повзучості у всіх трьох напрямках, відмінність даних не перевершує 15 %, причому найгірша відповідність має місце для напружень 366,8 МПа (зразки, вирізані у 1-му напрямку) та 352,3 МПа (зразки, вирізані у 2-му напрямку). Такі відмінності вважаються прийнятними при обробці даних з анізотропними властивостями повзучості [11], та тому отримані значення констант матеріалу можуть бути застосовані у подальших розрахунках.

Висновки. В статті містяться результати експериментального дослідження зразків зі Сталі 3 при кімнатній температурі (20°C). Виявлено, що Сталь 3 демонструє при кімнатній температурі істотну (більш 2%) повзучість. Встановлено анізотропію властивостей невідновленої повзучості для сталі, що розглядається. Наведено рівняння стану для опису деформування Сталі 3 з урахуванням деформацій пластичності та повзучості. Для Сталі 3 при температурі 20°C знайдено значення констант, що входять до запропонованих рівнянь стану. Порівняння експериментальних та розрахункових даних показало задовільну можливість використання запропонованих рівнянь для розрахунків змінювання напружено-деформованого стану в умовах, коли навантаження є таким, що напруження перебільшують межу плину та виникають миттєві пластичні деформації.

Список літератури: 1. *Lemaitre J.* Mechanics of solid materials / *J. Lemaitre, J.-L. Chaboche.* – Cambridge: University press, 1994. – 556 р. 2. *Хофф Н.* Кратковременная (быстрая) ползучесть в конструкциях / *Н. Хофф* // Проблемы высоких температур в авиационных конструкциях. Сборник статей. – М.: Изд. иностр. лит., 1961. – С. 365–394. 3. *Работнов Ю. Н.* Кратковременная ползучесть / *Ю. Н. Работнов, С. Т. Милейко.* – М.: Наука, 1970. – 224 с. 4. *Saanouni K.* On the numerical prediction of the ductile fracture in metal forming / *K. Saanouni* // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol. 75. – P. 3545–3559. 5. *Баркая В. Ф.* Формоизменение листового металла / *В. Ф. Баркая, С. Е. Рокотян, Ф. И. Рузанов.* – М.: Металлургия, 1976. – 264 с. 6. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций / *Ю. Н. Работнов.* – М.: Наука, 1966. – 752 с. 7. *Малинин Н. Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести / *Н. Н. Малинин.* – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с. 8. *Шевченко Ю. Н.* Физические уравнения термовязкопластичности / *Ю. Н. Шевченко, Р. Г. Терехов.* – К.: Наукова думка, 1982. – 239 с. 9. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур / *В. А. Стрижало.* – К.: Наукова думка, 1988. – 230 с. 10. *Badreddine H.* On non associative anisotropic finite plasticity fully coupled with isotropic ductile damage for metal forming / *H. Badreddine, K. Saanouni, A. Dogui* // International Journal of Plasticity. – 2010. – Vol. 26. – P. 1541–1575. 11. *Morachkovsky O.* Computational modelling of creep damage evolution in transversally-isotropic structures / *O. Morachkovsky, H. Altenbach, M. Pasynok* // Динамика и прочность машин. – Х.: ХГПУ, 1998. – Вып. 56. – С. 9–18. 12. *Бреславский Д. В.* Анизотропия ползучести и повреждаемости элементов конструкций при циклическом нагружении / *Д. В. Бреславский, В. А. Метелев, О. К. Морачковский* // Международный научно-технический журнал Проблемы прочности. – Киев: Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2015. – № 2 (434). – С. 21–29. 13. *Машина для испытания металлов на ползучесть и длительную прочность модели АИМА-5-2.* Техническое описание и инструкция по эксплуатации / Гб 2.773.С33 ТО. – Иваново: Ивановский ЗИП, 1977. – 63 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Lemaitre, J. and J.-L. Chaboche.* Mechanics of solid materials. Cambridge: University press, 1994. Print. 2. *Hoff, N.* Kratkovremennaja (bystraja) polzuchest' v konstrukcijah. Problemy vysokih temperatur v aviacionnyh konstrukcijah. Sbornik statej (1961): 365–394. Print. 3. *Rabotnov, Ju. N. and S. T. Milejko.* Kratkovremennaja polzuchest'. Moscow: Nauka, 1970. Print. 4. *Saanouni, K.* On the numerical prediction of the ductile fracture in metal forming. Engineering Fracture Mechanics 75 (2008): 3545–3559. Print. 5. *Barkaja, V. F., S. E. Rokotjan and F. I. Ruzanov* Formoizmenenie listovogo metalla. Moscow: Metallurgija, 1976. Print. 6. *Rabotnov, Ju. N.* Polzuchest' jelementov konstrukcij. Moscow: Nauka, 1966. Print. 7. *Malinin, N. N.* Prikladnaja teorija plastichnosti i polzuchesti. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. 8. *Shevchenko, Ju. N. and R. G. Terehov.* Fizicheskie uravnenija termovjazkoplastichnosti. Kiev: Naukova dumka, 1982. Print. 9. *Strizhalo, V. A.* Ciklicheskaja prochnost' i polzuchest' metallov pri malociklovom nagruzenii v uslovijah nizkih i vysokih temperatur. Kiev: Naukova dumka, 1988. Print. 10. *Badreddine, H., K. Saanouni and A. Dogui.* On non associative anisotropic finite plasticity fully coupled with isotropic ductile damage for metal forming. International Journal of Plasticity 26 (2010): 1541–1575. Print. 11. *Morachkovsky, O., H. Altenbach and M. Pasynok.* Computational modelling of creep damage evolution in transversally-isotropic structures. Dinamika i prochnost' mashin 56 (1998): 9–18. Print. 12. *Breslavsky, D. V., V. A. Metelev and O. K. Morachkovsky.* Anizotropija polzuchesti i povrezhdaemosti jelementov konstrukcij pri ciklicheskom nagruzenii. Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal Problemy prochnosti 2.434 (2015): 21–29. Print. 13. *Gb 2.773.S33 TO.* Mashina dlja ispytaniya metallov na polzuchest' i dlitel'nuju prochnost' modeli AIMA-5-2. Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po jekspluatcii. Ivanovo: Ivanovskij ZIP, 1977. Print.

Надійшло (received) 21.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бреславський Дмитро Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем і процесів управління, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

Breslavsky Dmytro Vasylovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Control Systems and Processes, National Technical University "KhPI"; tel.: (057)-707-64-54; e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

Конкін Валерій Миколайович – кандидат технічних наук, професор НТУ «ХПІ», декан інженерно-фізичного факультету, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: (057)-707-60-58; e-mail: konkin@kpi.kharkov.ua.

Konkin Valeriy Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences, Professor of NTU "KhPI", Dean of the Engineering and Physics Faculty, National Technical University "KhPI"; tel.: (057)-707-60-58; e-mail: konkin@kpi.kharkov.ua.

Метельов Володимир Олександрович – аспірант, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: (057)-370-44-70; e-mail: vometel@gmail.com.

Mietelov Volodymyr Oleksandrovych – Postgraduate Student, National Technical University "KhPI"; tel.: (057)-370-44-70; e-mail: vometel@gmail.com.