

PACS numbers: 46.35.+z, 62.20.fq, 81.40.Ef, 81.40.Gh, 81.40.Lm, 81.70.Bt, 83.60.-a

## **Закономірності відновлення запасу пластичності та методика його розрахунку за деформування проміжним термообробленням**

О. Л. Гайдамак

*Вінницький національний аграрний університет,  
вул. Сонячна, 3,  
21008 Вінниця, Україна*

Холодна пластична деформація металів приводить до зростання твердості, міцності, а також пониження пластичності та в'язкості. Для розширення можливостей холодного деформування металів застосовують деформування за декілька переходів з проміжними відпалами. В статті досліджено відновлення використаного ресурсу пластичності через відпалювання після холодної пластичної деформації інструментальної криці Р6М5 для різних шляхів деформування. Встановлено закономірності відновлення використаного ресурсу пластичності через відпалювання для простих і складних шляхів деформування криці Р6М5. Показано, що історія деформування не має істотного впливу на закономірності відновлення запасу пластичності проміжним термічним обробленням. Запропоновано нову методику розрахунку граничного ступеня деформації для деформування за декілька переходів з проміжними термічними обробленнями (відпалами), що уможлиблює враховувати вплив історії деформування, яка передувала кожному переходу, та відновлення ресурсу пластичності проміжним термічним обробленням, що більш повно відображає сутність процесів, що відбуваються під час холодної деформації з проміжними відпалами. Цю методику засновано на аналізі результатів проведених експериментальних досліджень холодного пластичного деформування зразків у процесі їх осаджування, розтягування, кручення та

Corresponding author: Oleh Leonidovych Haydamak  
E-mail: [vntu111@gmail.com](mailto:vntu111@gmail.com)

*Vinnitsia National Agrarian University,  
3 Soniachna Str., UA-21008 Vinnitsia, Ukraine*

Citation: O. L. Haydamak, Regularities of Plasticity Reserve Restoration and Method of Its Calculation for Deformation by Intermediate Heat Treatment, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 10: 1189–1204 (2023) (in Ukrainian).  
DOI: [10.15407/mfint.45.10.1189](https://doi.org/10.15407/mfint.45.10.1189)

розтягування з одночасним крученням за два етапи з проміжним відпалом, який проводився за температури у  $760^{\circ}\text{C}$ , та витримкою в 1 годину із подальшим охолодженням з піччю. Запропоновано два методи розрахунку граничної деформації матеріалу заготовки після відпалу. Перший передбачає побудову нової діаграми пластичності, що враховує відновлення запасу пластичності проміжним відпалом за рахунок геометричної побудови нової діаграми пластичності на основі одержаних експериментальних результатів для різних шляхів деформування. Другий метод передбачає використання залежності відновлення використаного ресурсу пластичності деформованого матеріалу відпалом від ступеня деформації до відпалу, що уможливорює розрахувати нову діаграму пластичності, яка дає змогу прогнозувати можливості деформування матеріалу заготовки після відпалу без його руйнування.

**Ключові слова:** пластичність, фазові перетворення, шлях деформування, відпал.

Cold plastic deformation of tool steel P6M5 for different ways of deformation is investigated. The regularities of recovery of the used plasticity resource during annealing for the simple and complex ways of deformation of P6M5 steel are established. As shown, the history of deformation does not have a significant effect on the patterns of restoration of the plasticity reserve by intermediate heat treatment. A new method of calculating the ultimate degree of deformation during deformation for several transitions with intermediate heat treatments (annealing) is proposed that allows taking into account the influence of the deformation history, which preceded each transition, and the restoration of the plasticity resource by intermediate heat treatment that more fully reflects the essence of the processes taking place during cold deformation with intermediate annealing. This technique is based on the analysis of the results of experimental studies of cold plastic deformation of samples in the process of their deposition, stretching, twisting, and stretching with simultaneous twisting in two stages with intermediate annealing, which was carried out at a temperature of  $760^{\circ}\text{C}$  and held for 1 hour with subsequent cooling with a furnace. Two methods of calculating the ultimate deformation of the workpiece material after annealing are proposed. The first one involves the construction of a new plasticity diagram, which takes into account the restoration of the plasticity reserve by intermediate annealing due to the geometrical construction of a new plasticity diagram based on the obtained experimental results for different deformation paths. The second technique involves the use of the dependence of the restoration of the used plasticity resource of the deformed material by annealing on the degree of deformation before annealing, which allows to calculate a new plasticity diagram that takes into account the restoration of the reserve of plasticity by heat treatment and allows to predict the possibility of deformation of the workpiece material after annealing without destroying it.

**Key words:** plasticity, phase transformations, deformation path, annealing.

*(Отримано 15 червня 2023 р.; остаточн. варіант — 5 вересня 2023 р.)*

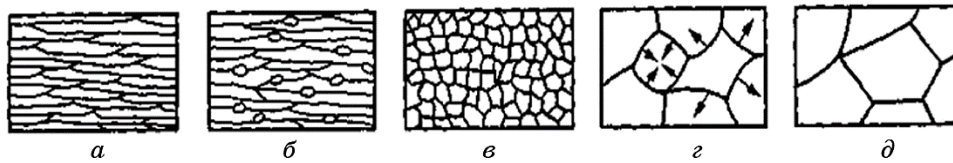
## 1. ВСТУП

Відомо, що холодна пластична деформація металу характеризується зростанням твердості, міцності, а також пониженням пластичності та в'язкості [1]. В процесі деформування на його початковій стадії відбувається інтенсивне зміцнення, зростають такі характеристики як межа міцності  $\sigma_B$  та межа плинності  $\sigma_{0,2}$ . Межа плинності зростає швидше, ніж межа міцності, а за великих деформацій межа міцності та межа плинності зрівнюються між собою, а пластичність металу падає до нуля. Такий стан матеріалу, що деформується, називається граничним, і подальше його деформування призводить до його руйнування. Ефект зміцнення металу під впливом холодної деформації названо наклепом або нагартуванням. Холодна пластична деформація завдяки наклепу може підвищити твердість і міцність деформованого металу в 1,5–3 рази. В той же час наклеп значно зменшує пластичні властивості металу, що унеможливує в багатьох випадках досягти бажаного ступеня деформування металу, не перевищуючи його межу міцності, тобто без руйнування. Водночас холодна пластична деформація металу переводить його у термодинамічний нестійкий стан, який зберігається необмежено довго за кімнатної температури. Переведення металу у більш стійкий стан можливе лише із застосуванням термічного впливу на деформовану заготовку. Такий термічний вплив називається відпалом, за якого відбувається процес рекристалізації деформованого металу. Через нагрівання деформованої заготовки із зростанням температури відбувається підвищення пластичності та пониження міцності, тобто зникає ефект наклепу у деформованій заготовці. В процесі рекристалізації відбувається утворення та збільшення нових зерен з меншою кількістю дефектів будови та з рівновісною формою.

Для того щоб відбулася рекристалізація потрібно мати певні умови, а саме, ступінь деформації має бути не менше 2% для алюмінію, 5% — для заліза та міді, 6% — для нікелю, і для кожного з вказаних матеріалів є своя мінімальна температура початку процесу рекристалізації  $T_{рек}$ , і залежить вона від температури топлення  $T_{топ}$  та розраховується за формулою  $T_{рек} = \alpha T_{топ}$ , де коефіцієнт пропорційності  $\alpha = 0,2$  для хемічно чистих металів,  $\alpha = 0,4$  для технічно чистих стопів і металів,  $\alpha = 0,8$  для складних стопів.

Процес рекристалізації zdeформованих зерен металу показано схематично на рис. 1 [1].

Із збільшенням ступеня попередньої деформації, перед термообробленням, зростає кількість центрів рекристалізації (рис. 1, б), виникає так звана первинна рекристалізація, яка приводить до утворення дрібних рівновісних зерен (рис. 1, в). В результаті утворення нових зерен зникає наклеп і зростає пластичність деформованого металу. В цьому випадку властивості металу наближаються



**Рис. 1.** Схематичне зображення змін мікроструктури здеформованого металу в процесі рекристалізації: зерна після холодної деформації (*a*), початкові зародки рекристалізації на межах зерен (*б*), первинна рекристалізація з утворенням дрібних рівновісних зерен (*в*), зростання зерен (*г*), нова крупнозерниста структура (*д*).

**Fig. 1.** Schematic representation of changes in the microstructure of the deformed metal during the recrystallization process: grains after cold deformation (*a*), initial nuclei of recrystallization at grain boundaries (*б*), primary recrystallization with the formation of small equiaxed grains (*в*), growth of grains (*г*), new coarse-grained structure (*д*).

до тих, що були до деформації цього матеріалу. З подальшим нагріванням сусідні зерна об'єднуються (рис. 1, *г*), і може виникнути нова крупнозерниста структура (рис. 1, *д*), яка погіршує механічні властивості, особливо ударну в'язкість.

Рекристалізаційний відпал, як правило, застосовують для міжопераційного пом'якшення металу під час холодного волочіння, прокатки та інших формоутворювальних операцій холодного оброблення тиском. На підприємствах для скорочення часу термооброблення температуру рекристалізаційного відпалу призначають на 100–200°C вище за температуру рекристалізації.

Деформування заготовок за кілька переходів з відпалом між переходами може істотно розширити технологічні можливості таких процесів, як видавлювання радіальним обтисканням з одержанням три- і чотиригранних порожнин, пресування, волочіння, та багатьох інших процесів.

Термооброблення лікує мікродофекти, що виникають під час холодного деформування, усуває наклеп, який утворюється за пластичної формозміни. Це уможлиблює досягати більших ступенів деформацій. Однак, незважаючи на велику увагу дослідників [5] до вивчення впливу проміжного термооброблення на пластичність, у відомій нам літературі відсутні дані про відновлення запасу пластичності інструментальних криць під час відпалу та дані про вплив історії деформування на закономірності відновлення запасу пластичності. Методика розрахунку граничних деформацій за деформування із проміжним термообробленням є недостатньо обґрунтованою. Для вирішення зазначених завдань провели експериментальні дослідження процесів холодного пластичного деформування заготовок з інструментальної криці марки Р6М5 із проміжним тер-

мообробленням.

Важливим питанням методики дослідження впливу історії деформування на відновлення запасу пластичності заготовок під час холодного деформування з проміжним відпалом є вибір програм випробувань. Оскільки йдеться про пластичність за складного навантаження, необхідно реалізувати різні шляхи деформування. Згідно з лінійною теорією накопичення пошкоджень [2, 3], швидкість накопичення пошкоджень під час пластичного деформування в даний момент часу визначається величиною граничної деформації  $e_p$ . Швидкість накопичення пошкоджень за складного деформування залежить не тільки від граничної деформації, а й від «напрямку деформування», що визначається похідною  $dh/de_u$ , де  $\eta$  — показник напруженого стану, а  $e_u$  — ступінь деформації [4].

З метою виявлення зазначеної залежності на закономірності відновлення запасу пластичності за холодного деформування з проміжним термообробленням основну серію експериментів проводили за програмами, що відповідають променям, які виходять з точок  $\eta = 0, e_u = 0, \eta = -1, e_u = 0$ . У просторі вектора деформацій у цьому випадку шлях деформування зображується траєкторіями малої кривини.

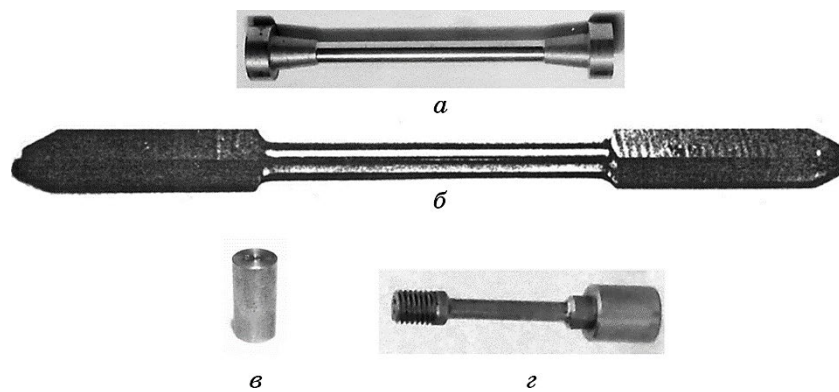
У дослідженні впливу історії деформування на відновлення запасу пластичності заготовок, що деформуються з проміжним відпалом, проводили зіставлення результатів досліджень за простого та складного деформування.

Надалі під простим розуміється деформування, за якого показник напруженого стану залишається незмінним упродовж усього деформування  $\eta = \text{const}$ . Під складним розуміється деформування, за якого показник напруженого стану змінюється зі зростанням ступеня деформації  $e_u$ . Водночас співвідношення головних напружень і деформацій змінюється. Деформування є активним (деформування без проміжних розвантажень).

Усі зразки виготовляли із криці Р6М6. Заготовки для зразків бралися із однієї партії металу. Зразки доводилися до різних стадій попередньої деформації (по три зразки на кожну стадію), потім відпалювали в електропечі за температури у  $760^\circ\text{C}$  з витримкою в 1 годину (охолодження з піччю) і надалі деформували до руйнування.

Для реалізації простого деформування застосовували зразки на осаджування, кручення та розтягування.

Зразки для випробувань на осаджування мали діаметер у 10 мм і висоту у 16 мм (див. рис. 2, *в*). На екваторі циліндричної поверхні зразків наносили твердоміром координатну сітку. Розмір сітки за екватором — 1 мм, а за висотою — 2 мм. Деформування робили на пресі ПММ-125. Під торці зразків підкладали олив'яну фольгу разом із графітовим мастилом. Зміну розмірів координатної сітки міряли на інструментальному мікроскопі з точністю у  $\pm 0,005$  мм. Мо-



**Рис. 2.** Загальний вид зразків для випробувань на: розтяг (*a*), кручення (*б*), осаджування (*в*), кручення з розтягом (*г*).

**Fig. 2.** General view of samples for tests on: tension (*a*), torsion (*б*), deposition (*в*), torsion with tension (*г*).

мент руйнування фіксували з появою першої тріщини шириною у 0,05–0,1 мм. Показник напруженого стану цього виду випробувань —  $\eta = -1$ . Усього було випробувано 12 зразків.

Зразки, призначені для випробувань в умовах кручення, мали довжину робочої частини  $b = 100$  мм і діаметер  $d = 10$  мм (рис. 2, б). На робочій частині зразків зробили подряпину паралельно твірній циліндра робочої частини. Після руйнування міряли на інструментальному мікроскопі кут нахилу цієї подряпини щодо її вихідного положення. Випробування на кручення проводили на випробувальній машині КМ-50. Показник напруженого стану для цього виду випробувань —  $\eta = 0$ . Усього було випробувано 25 зразків.

Зразки, призначені для випробувань в умовах розтягування, мали довжину робочої частини  $L = 100$  мм і діаметер  $d = 10$  мм (див. рис. 2, а). Випробування на розтягування проводили на випробувальній машині Р-20. Після руйнування зразка міряли подовження та діаметер робочої частини. Показник напруженого стану цього виду випробувань —  $\eta = \text{const} = 1$ . Усього було випробувано 22 зразки.

В умовах складного деформування застосовували зразки на осаджування заввишки  $H = 16$  мм і діаметром  $d = 10,6$  мм (див. рис. 2, в). Деформування здійснювали без змащування торців; на бічній поверхні зразок мав опуклу форму, що викликало зміну показника напруженого стану зі зростанням ступеня деформації. Методика випробувань на осаджування без змащування торців є аналогічною випробуванням на осаджування зі змащенням торців, як описано вище. Усього було випробувано 16 зразків. Крім зазначених випробувань, деформували зразки в умовах спільного розтягування та кручення; вони мали довжину робочої частини у 30 мм і діаметер у

6 мм. Деформування зразків здійснювали відповідно до заданої програми на випробувальній машині ZDMU-30 шляхом плавного збільшення кутів закручування й осьових подовжень. Водночас необхідні подовження контролювали мікрометром, а кут закручування — за допомогою лімба, встановленого на випробувальній машині.

Шляхи деформування під час розтягування з крученням задавали прямими лініями у вигляді  $\eta = Ke_u$ . Згідно з [5], для цих шляхів розраховували програму деформування за співвідношенням

$$\operatorname{tg}\alpha = z^{-1,5} \int_1^z \sqrt{\frac{3z}{K^2} \left( \frac{2}{K} \ln z \right)^{-1} - 1} dz, \quad (1)$$

де  $z$  — безрозмірний параметер зразка,  $\ln z = \ln(l/l_0)$ , де  $l$  та  $l_0$  — поточна та вихідна довжини зразка,  $\alpha$  — кут закручування вихідної твірної на поверхні циліндра робочої частини зразка. Кут повороту одного кінця зразка відносно іншого становитиме

$$\varphi = \frac{2l \operatorname{tg}\alpha}{d} \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (2)$$

Для шляхів деформування, де  $K = 0,4, 0,65, 1,1, 1,3$ , використовували зразки на одночасні розтяг і кручення (рис. 2, з), що мали довжину робочої частини  $L = 60$  мм і діаметер  $d = 6$  мм. На робочій частині зразків зробили подряпину паралельно твірній циліндра робочої частини. Після руйнування міряли на інструментальному мікроскопі кут нахилу цієї подряпини щодо її вихідного положення та подовження зразка. Для цих зразків розраховано програми випробувань, яких у вигляді графіків представлено на рис. 3. Усього було випробувано 55 зразків.

Для оцінки використаного ресурсу пластичності необхідно мати діаграму пластичності. Діаграму пластичності будували за одержаними результатами за допомогою апроксимувального виразу, запропонованого Г. Д. Делем та ін. [6], в яке у вигляді коефіцієнтів входять значення граничних деформацій за кручення  $e_{p(\eta=0)}$  і стискання  $e_{p(\eta=-1)}$ :

$$e_p = \frac{e_{p(\eta=-1)} e_{p(\eta=0)} \exp(-\eta)}{e_{p(\eta=-1)} + \eta(e_{p(\eta=-1)} - e^* e_{p(\eta=0)})}, \quad (3)$$

де  $e^*$  — основа натурального логаритму.

Аналогічно цим випробуванням провели випробування для відпаленого матеріалу за режимом, що відповідає проміжному термообробленню. Таким чином, ми одержали дві діаграми пластичності: це діаграми для матеріалу в стані постачання і того самого матеріалу, але відпаленого за режимами, що відповідають режимам проміжного термооброблення.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Обробку одержаних експериментальних результатів проводили за методикою, викладеною в роботі [4]. Для осаджування зразків ступінь деформації розраховували за формулою

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_z^2 + e_z e_\varphi + e_\varphi^2}, \quad (4)$$

а показник напруженого стану визначали за співвідношенням

$$\eta = \sqrt{3} \frac{e_z + e_\varphi}{\sqrt{e_z^2 + e_z e_\varphi + e_\varphi^2}}, \quad (5)$$

де  $e_z = \ln(z/z_0)$ ,  $e_\varphi = \ln(\varphi/\varphi_0)$ ,  $z_0$  і  $\varphi_0$  — віддалі між маркерами у середній зоні вихідного зразка (рис. 2, в) по вертикалі та горизонталі відповідно,  $z$  і  $\varphi$  — віддалі між тими самими маркерами zdeформованого зразка по вертикалі та горизонталі відповідно.

Шлях деформування, розрахований за цими співвідношеннями, наведено на рис. 3, де знаком ( $\circ$ ) позначено місце проведення відпапу, а знаком ( $\bullet$ ) — місце руйнування зразка. Шлях деформування,

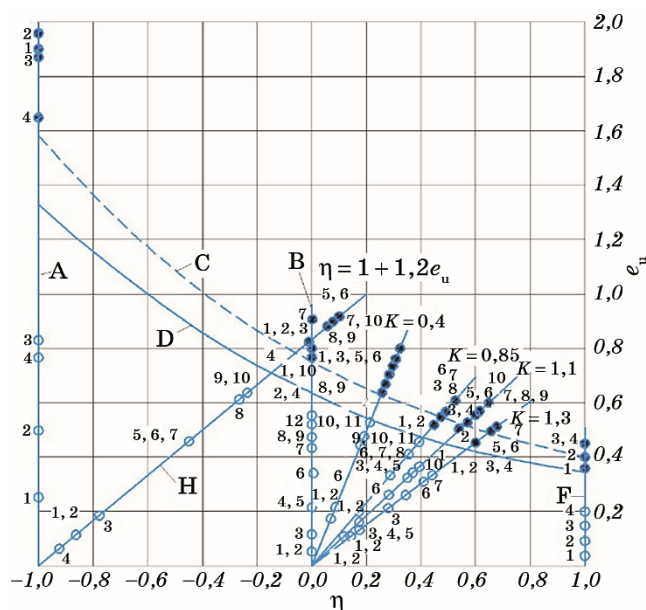


Рис. 3. Шляхи деформування зразків за формозміни з проміжним відпапом.

Fig. 3. Ways of deformation of blanks during shape change with intermediate annealing.



якому відповідає лінія А, одержано за осаджування зразків із інтенсивним змащуванням торців зразків. Шлях деформування, якому відповідає лінія Н, одержано за осаджування зразків без змащування торців зразків і описується рівнянням  $\eta = -1 + 1,2e_u$ .

Ступінь деформації зразка (рис. 2, б) за кручення розраховували за кутом нахилу  $\alpha$  подряпини на твірній циліндричній поверхні до її вихідного положення, яке є паралельним до осі зразка, за співвідношенням

$$e_{u(\eta=0)} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\sqrt{3}}. \quad (6)$$

Шлях деформування наведено на рис. 3 (лінія В).

Ступінь деформації для розтягування визначали за співвідношенням

$$e_{p(\eta=1)} = 2 \ln \frac{d_0}{d}, \quad (7)$$

де  $d_0, d$  — діаметри зразка до та після деформування. Цей шлях деформування наведено на рис. 3 (лінія F).

Для кручення з розтягуванням будували шляхи деформування за співвідношенням (1) для різних значень  $K = 0,4, 0,85, 1,1, 1,3$ .

Для оцінки впливу історії деформування на відновлення ресурсу пластичності під час відпалювання необхідно розрахувати використаний ресурс пластичності до та після відпалювання. Так, наприклад, за кручення, розтягування й осаджування зі змащуванням торців використаний ресурс до відпалу  $\psi_1 = e_{u1}/e_{p1}$ , а після відпалювання —  $\psi_2 = e_{u2}/e_{p2}$ , де  $e_{p1}$  — ступінь деформації, що відповідає руйнуванню за деформування зразка у стані постачання,  $e_{p2}$  — те саме, але відпаленого зразка за тими ж режимами, що й у проміжному відпалюванні.

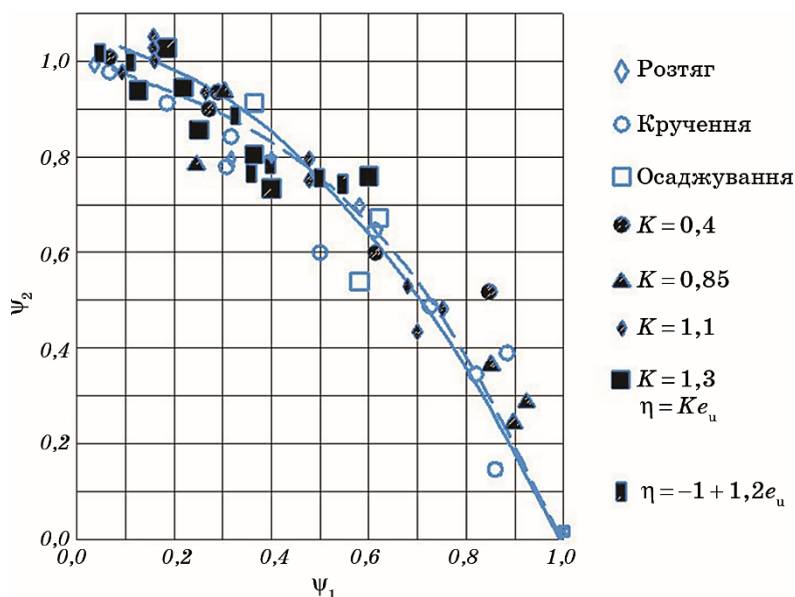
Якщо зразки в початковому стані постачання не мають наклепу, то  $e_{p1} = e_{p2}$ . Таким чином, були одержані точки для простих видів деформування. Їх нанесли на діаграму  $\psi_2 = f(\psi_1)$  (рис. 4). Одержані дані апроксимували методом найменших квадратів та одержали апроксимацію, показану на рис. 4 суцільною лінією:

$$\psi_2 = 0,97269 - 0,29\psi_1 - 0,428\psi_1^2. \quad (8)$$

У розрахунку  $\psi_1, \psi_2$  для складних шляхів деформування (на рис. 3 позначені літерами Н і К) ці величини визначали за формулою [6]

$$\psi = \int_0^{e_u} \left( 1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u} \right) \frac{e_u^{0,2 \operatorname{arctg}(d\eta/de_u)}}{[e_p^*(e_u)]^{1+0,2 \operatorname{arctg}(d\eta/de_u)}} de_u. \quad (9)$$

Цей розрахунок проводили аналогічно наведеному для простих



**Рис. 4.** Експериментальні дані залежності  $\psi_2 = f(\psi_1)$  для різних шляхів деформування.

**Fig. 4.** Experimental data of the dependence  $\psi_2 = f(\psi_1)$  for the different ways of deformation.

шляхів деформування;  $\psi_1$  розраховували по відношенню до діаграми пластичності матеріалу в стані постачання (крива D на рис. 3), а  $\psi_2$  — по відношенню до діаграми пластичності відпаленого матеріалу (крива C на рис. 3).

Одержані результати нанесли на графік залежності використаного ресурсу пластичності до та після відпалу  $\psi_2 = f(\psi_1)$  (рис. 4). Обробивши результати за допомогою методу найменших квадратів, одержали вираз, що апроксимує залежність  $\psi_2 = f(\psi_1)$ , показану на рис. 4 штриховою лінією:

$$\psi_2 = 0,9858 - 0,1169\psi_1 - 0,8366\psi_1^2. \quad (10)$$

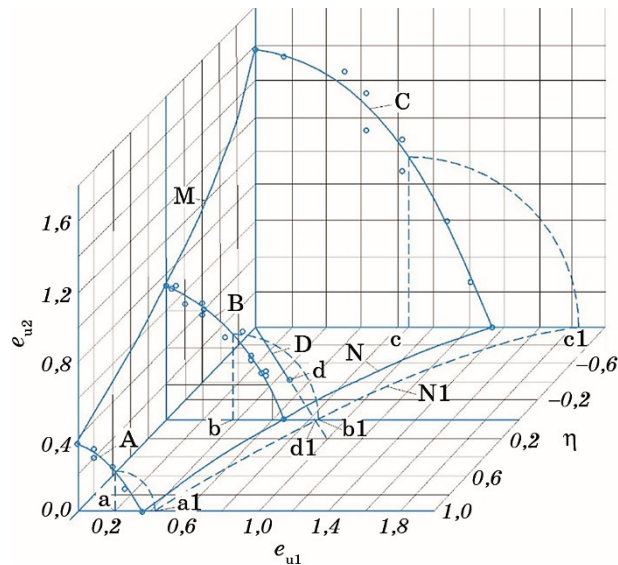
Як видно з одержаних апроксимацій для простих і складних шляхів деформування, мають місце незначні розбіжності відновлення ресурсу пластичності  $\psi_2$  у діапазоні  $0 \leq \psi_1 \leq 0,4$  в межах 5%. В той же час в діапазоні  $0,4 \leq \psi_1 \leq 1$  результати майже збігаються. Таким чином, можна зробити висновок, що історія деформування не має істотного впливу на закономірності відновлення ресурсу пластичності за деформування з проміжним відпалом для простих і складних шляхів деформування.

### 3. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗА ДЕФОРМУВАННЯ З ПРОМІЖНИМ ТЕРМООБРОБЛЕННЯМ

Для проєктування технологічного процесу оброблення металу тиском з проміжним термообробленням необхідно знати, на якому етапі деформування доцільно провести відпалювання для того щоб досягти бажаного ступеня деформації без руйнування. У зв'язку з цим ми пропонуємо методику розрахунку гранично допустимих деформацій за деформування з проміжним термообробленням.

Відомо, що ступінь деформації, яка відповідає руйнуванню матеріалу заготовки для різних шляхів деформування, є різним, а використаний ресурс пластичності в момент руйнування для будь-яких шляхів деформування буде однаковим і становитиме  $\psi = 1$ .

Виходячи з цих уявлень, з'ясовуємо можливість побудувати нову діаграму пластичності, що враховує відновлення пластичності залежно від попередньої деформації та відпалу. Для ліпшого уявлення про метод побудови нової діаграми пластичності скористаємося тривимірною діаграмою, яку наведено на рис. 5, де: по осі  $X$  відкладено ступінь деформації перед відпалом  $e_{u1}$ ; по осі  $Y$  — ступінь деформації, що відповідає руйнуванню за деформування після від-



**Рис. 5.** До розрахунку гранично допустимої деформації за деформування з проміжним термообробленням.

**Fig. 5.** Calculation of the maximum allowable deformation during deformation with intermediate heat treatment.

палу  $e_{u2}$ ; по осі  $Z$  — показник напруженого стану  $\eta$ . На цій діаграмі нанесено експериментальні значення, одержані за розтягування, стискання та кручення, через які проведено їхні апроксимувальні лінії А, В, С. У площині  $(e_{u1}, \eta)$  проведено діаграму пластичності N вихідного матеріалу в стані постачання. У площині  $(e_{u2}, \eta)$  проведено діаграму пластичності M вихідного матеріалу, відпаленого за режимами проміжного відпалу.

Методику побудови нової діаграми пластичності пояснимо на прикладі. Проведемо з точки  $\eta = -1$  шлях деформування D, що відповідає складному виду навантаження. Розрахуємо щодо діаграми пластичності матеріалу у вихідному стані постачання використаний ресурс пластичності до відпалу. Припустимо, він становитиме  $\psi_1 = 0,6$  (точка d). Визначимо, який ступінь деформації за найпростіших видів навантаження відповідає використаному ресурсу 0,6: для розтягування ( $\eta = 1$ )

$$e_{u1} = 0,6e_{p(\eta=1)} = 0,6 \cdot 0,33 = 0,2 \text{ (точка a),}$$

для кручення ( $\eta = 0$ )

$$e_{u1} = 0,6e_{p(\eta=0)} = 0,6 \cdot 0,64 = 0,384 \text{ (точка b),} \quad (11)$$

для стискання ( $\eta = -1$ )

$$e_{u1} = 0,6e_{p(\eta=-1)} = 0,6 \cdot 1,38 = 0,828 \text{ (точка c).}$$

З відповідних точок (a, b, c) на діаграмі проведемо вертикальні промені до перетину з лініями (А, В, С), що апроксимують експериментальні значення. Точка перетину визначає ступінь деформації, яку матеріал може витримати після відпалу; вона становитиме:

$$\begin{aligned} \text{для розтягування } e_{u2} &= 0,25, \\ \text{для крутіння } e_{u2} &= 0,46, \\ \text{для стискання } e_{u2} &= 0,98. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким чином, загальний ступінь деформації  $e_{P3}$ , який може витримати матеріал за деформування після першого відпалу, складе:

$$\begin{aligned} \text{для розтягування } e_{P3(\eta=1)} &= e_{u1} + e_{u2} = 0,45 \text{ (точка a1),} \\ \text{для кручення } e_{P3(\eta=0)} &= e_{u1} + e_{u2} = 0,844 \text{ (точка b1),} \\ \text{для стискання } e_{P3(\eta=-1)} &= e_{u1} + e_{u2} = 1,81 \text{ (точка c1).} \end{aligned} \quad (13)$$

Підставивши одержані значення у вираз (3), побудуємо нову діаграму пластичності (пунктирна лінія N1 на рис. 5), на якій точка d1 свідчить про відновлення пластичності матеріалу заготовки в

результаті відпалу для даного шляху деформування D.

Побудувати нову діаграму пластичності або знайти нові коефіцієнти, що входять до апроксимації діаграми пластичності (3), можна і більш простим шляхом. Для цього скористаємося графіком залежності  $\psi_2 = f(\psi_1)$  (див. рис. 4), що є загальною для всіх видів випробувань.

Знаючи використаний ресурс пластичності на першому етапі  $\psi_1 = 0,6$  можна з графіка на рис. 4 визначити  $\psi_2 = 0,68$ . Нові коефіцієнти діаграми пластичності визначаємо з рівняння

$$e_{P3(\eta=i)} = \psi_1 e_{p1(\eta=i)} + \psi_2 e_{p2(\eta=i)}; \quad (14)$$

для нашого прикладу будуть наступні значення:

$$\begin{aligned} e_{P3(\eta=1)} &= 0,6 \cdot 0,33 + 0,68 \cdot 0,38 = 0,441, \\ e_{P3(\eta=0)} &= 0,6 \cdot 0,64 + 0,68 \cdot 0,74 = 0,887, \\ e_{P3(\eta=-1)} &= 0,6 \cdot 1,33 + 0,68 \cdot 1,58 = 1,872. \end{aligned} \quad (15)$$

Розбіжність результатів розрахунку за розглянутими методиками не перевищує 5%.

Після першого етапу деформування незалікована частина використаного ресурсу пластичності становитиме

$$\Delta\psi_1 = 1 - \psi_2 = 1 - 0,68 = 0,32. \quad (16)$$

Для подальшого деформування розрахунок використаного ресурсу пластичності необхідно проводити за новою діаграмою пластичності N1, яка відображає підвищення пластичності в результаті відпалу після холодної деформації, тобто за діаграмою, побудованою за коефіцієнтами (15). Припустимо, що на другому етапі деформування, після відпалу, використаний ресурс пластичності становитиме  $\psi'_1 = 0,7$ , з графіка на рис. 4 знайдемо  $\psi'_2 = 0,55$ .

Нові коефіцієнти діаграми пластичності визначаємо з рівняння

$$\begin{aligned} e_{P4(\eta=i)} &= e_{p2(\eta=i)}\psi'_1 + e_{p3(\eta=i)}\psi'_2; \\ e_{P4(\eta=1)} &= 0,38 \cdot 0,7 + 0,441 \cdot 0,55 = 0,508, \\ e_{P4(\eta=0)} &= 0,74 \cdot 0,7 + 0,887 \cdot 0,55 = 1,005, \\ e_{P4(\eta=-1)} &= 1,58 \cdot 0,7 + 1,872 \cdot 0,55 = 2,135. \end{aligned} \quad (17)$$

На рисунку 6 представлено схему розрахунку гранично допустимого ступеня деформації за декілька переходів з проміжними відпалами. Ця схема передбачає можливість деформування за декілька переходів, доки сумарний використаний ресурс пластичності не сягне 1 та перевищить це значення.

Відмінною особливістю даної методики по відношенню до мето-



**Рис. 6.** Схема розрахунку гранично допустимого ступеня деформації за деформування з проміжним термообробленням.

**Fig. 6.** Scheme for calculating the maximum allowable degree of deformation during deformation with intermediate heat treatment.

дики, викладеної в роботі [5], є те, що розрахунок використаного ресурсу пластичності проводиться з урахуванням історії деформування, яка передує відпалюванню; водночас ступінь відновлення використаного ресурсу пластичності за відпалювання враховано підйомом діаграми пластичності у відповідності із запропонованою методикою розрахунку. Водночас розрахунок використаного ресурсу пластичності, наведений у роботі [5], проводиться без врахування історії деформування, що передувала відпалу, тому що ступінь деформації на кожному етапі деформування розраховується від нуля і до значення, що передує черговому відпалу.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Таким чином, проведено експериментальне дослідження відновлення використаного ресурсу пластичності за відпалювання після холодної пластичної деформації інструментальної криці Р6М5, результати якого добре узгоджуються з [2, 5, 7].
2. Встановлено закономірності відновлення використаного ресурсу пластичності за відпалювання для простих і складних шляхів де-

формування інструментальної криці.

3. Встановлено, що вид шляхів деформування в дослідженій області не має істотного впливу на закономірності відновлення запасу пластичності за проміжного відпалювання.

4. Розроблено методику розрахунку граничного ступеня деформації для деформування за багато переходів з проміжними відпалами, що уможливило враховувати вплив історії деформування, яка передувала кожному переходу.

5. Використаний ресурс пластичності за даною методикою визначався з урахуванням граничних значень пластичності деформованого металу, які постійно змінюються в результаті деформацій і відпалювань, що більш повно відображає сутність процесів, які відбуваються.

6. Результати даних досліджень можуть бути застосовані для розробки різних технологічних процесів, таких як видавлювання три-і чотиригранних порожнин радіальним обтисканням, осьове відкриття та закриття видавлювання, напівзакрите видавлювання, волочіння, та інших процесів, під час яких деформування за один перехід унеможливило одержувати деформації необхідної величини за один перехід без руйнування заготовки.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. О. В. Афанасьєва, *Матеріалознавство та конструкційні матеріали* (Харків: ХНУРЕ: 2016).
2. В. Л. Колмогоров, *Напряжения, деформации, разрушения* (Москва: Металлургия: 1970).
3. Л. Д. Соколов, *Доклады АН СССР*, **87**, № 952: 141 (1976).
4. В. А. Огородников, *Оценка деформируемости металлов во время обработки давлением* (Київ: Вища школа: 1983).
5. А. А. Богатов, С. В. Колмогоров, С. В. Смирнов, *Известия вузов. Чёрная металлургия*, **36**, № 2: 62 (1978).
6. Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук, *Известия вузов. Машиностроение*, **32**, № 12: 22 (1974).
7. Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др., *Теория пластических деформаций металлов* (Москва: Машиностроение: 1983).

## REFERENCES

1. O. V. Afanas'yeva, *Materialoznavstvo ta Konstruktsiyni Materialy* [Materials Science and Structural Materials] (Kharkiv: KhNURE: 2016) (in Ukrainian).
2. V. L. Kolmogorov, *Napryazheniya, Deformatsii, Razrusheniya* [Stresses, Deformations, Failures] (Moskva: Metallurgiya: 1970) (in Russian).
3. L. D. Sokolov, *Doklady AN SSSR*, **87**, No. 952: 141 (1976) (in Russian).
4. V. A. Ogorodnikov, *Otsenka Deformiruemosti Metallov vo Vremya Obrabotki Davleniem* [Assessment of the Deformability of Metals during Pressure Treat-

- ment] (Kiev: Vishcha Shkola: 1983) (in Russian).
5. A. A. Bogatov, S. V. Kolmogorov, and S. V. Smirnov, *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*, **36**, No. 2: 62 (1978) (in Russian).
  6. G. D. Del', V. A. Ogorodnikov, and V. G. Nakhaychuk, *Izvestiya Vuzov. Mashinostroenie*, **32**, No. 12: 22 (1974) (in Russian).
  7. E. P. Unksov, U. Johnson, V. L. Kolmogorov et al., *Teoriya Plasticheskikh Deformatsiy Metallov* [Theory of Plastic Deformations of Metals] (Moskva: Mashinostroenie: 1983) (in Russian).