

УДК 621.774

**В. А. Огородніков**, д. т. н., проф.;**О. В. Нахайчук**, к. т. н., доц.;**В. І. Музичук**

## **ВПЛИВ ТЕРМООБРОБКИ НА ВІДНОВЛЕННЯ ЗАПАСУ ПЛАСТИЧНОСТІ ВИРОБУ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ШЛІЦЬОВОГО ПРОФІЛЮ**

Дослідження рекристалізаційних процесів матеріалів в процесі обробки тиском мають велике практичне значення [1]. Вони показують, з яким ступенем деформації і з якою температурою необхідно проводити процес оброблення металу, для запобігання появи крупного зерна. Крупнозернистий метал має пониженою пластичність, що в багатьох випадках є небажаним. За даними досліджень [2, 3] для низьковуглецевих легованих сталей критичний ступінь деформації  $\varepsilon = 4...10\%$ , тому виникає практичний інтерес до дослідження процесів, що супроводжуються великими пластичними деформаціями з точки зору можливості відновлення запасу пластичності в найнебезпечніших областях деформування.

Сучасний етап розвитку машинобудування характеризується створенням нових «високих» технологій, які відрізняються продуктивністю, низькими енерговитратами, високою якістю і надійністю виробів та іншими позитивними факторами. Прикладом таких технологій може бути розроблений в Інституті надтвердих матеріалів НАН України технологічний процес формування внутрішнього шліцьового профілю в трубних заготовках обтиском матрицями на профільних оправках (спосіб «охоплювального» протягування) [4]. Суть процесу (рис. 1) полягає в тому, що трубна заготовка 1 разом із розміщеною всередині з мінімальним зазором шліцьовою оправкою 2 проштовхується через деформувальну матрицю. Після обтиску по всій довжині виробу (здійснюється декілька робочих ходів через різні виконавчі поверхні матриць) оправка випресовується і отримується готовий виріб. Таким способом формували прямобічний шліцьовий профіль, який відповідає профілю карданного вала рульового керування автомобіля ГАЗ-3307. Процес дозволяє одержувати шліцьові втулки підвищеної точності без подальшої обробки в серійному і масовому виробництві і може бути здійснений на вертикально-протяжних верстатах або гідропресах. Ззна-

чена технологія використана також для відновлення шліцьового з'єднання карданного вала дизель-потяга Д – 2. Основні характеристики шліцьової втулки:  $z = 34$ ,  $m = 2,5$ , кут профілю зуба  $\alpha_0 = 30^\circ$ ,  $D_f = 90$  мм, матеріал – Ст 20Х. Розглянутий процес можна охарактеризувати як високопродуктивний і металозаощаджувальний, проте його широке впровадження стримується відсутністю надійних розрахункових методів, які дозволяють визначати напружено-деформований стан на різних стадіях формування виробу з оцінкою ступеня використання пластичності, застосування різних матеріалів без технологічних відмов (руйнувань металу, втрати стійкості). Крім того, необхідно вміти прогнозувати на стадії проектування технологічного процесу очікувані фізико-механічні характеристики виробів. В даному процесі осьові і радіальні зусилля досягають значень біля 250 кН, а контактний тиск 1 ГПа, що може негативно вплинути на довговічність інструментів і обладнання, тому виникла необхідність проведення комплексного дослідження даного процесу. В роботі [5] представлена методика розрахунку напружено-деформованого стану і розроблені підходи до прогнозування руйнування в області формування внутрішнього шліцьового профілю.

Дана робота присвячена дослідженню впливу рекристалізаційного відпалу на відновлення пластичності з метою оптимізації технології виготовлення подібного виду деталей.

З результатів роботи [5] випливає, що найнебезпечнішою областю є область контакту АВ — область торкання клина шліца оправки і пластичної області (рис. 1). В цій області показники [6]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}; \quad \chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u} \quad (1)$$

досягають найбільшого (з врахуванням знака) значення, ця область є найжорсткішою. В процесі досліджень вивчалось переміщення точок небезпечних областей у фізичній площині за допомогою моделювання на збірних зразках (рис. 2) в площині показників  $\bar{\epsilon}_u$ ;  $\eta$ ;  $\chi$ , компоненти яких розраховувались поетапно за результатами експериментальних досліджень. Розглянемо переміщення точок 1 і 2 у фізичній площині (рис. 1), де суцільними лініями показані положення зовнішньої і внутрішньої поверхонь втулки до деформування, штриховими – після проходження через матрицю. Вихідним положенням т. 1 була відстань, рівна радіусу області наростотворення, яка, за даними Г. А. Смірнова-Аляєва, утворюється вже, якщо  $h \approx 0,1b$ ;  $b = 2r$  [5], цю ж область видно на рис. 2.

Під час переміщення деформованого металу в процесі обтиску точка 1 проходить послідовно точки  $1_2...1_5$ , які обмежують область наростотворення. Для точки 2 розрахунок проводився як для точки, що рухається по збіжному каналу. Іншими, менш небезпечними областями були область наростотворення й область, що обмежується радіусами  $R = r...1,5r$  [7]. В таблиці представлені дані розрахунку напруженого стану, а також показники  $\eta$  і  $\chi$ , для небезпечних точок. З результатів, представлених в таблиці, випливає, що накопичена інтенсивність деформацій перевищує критичні ступені деформації, зазначені на початку статті. Таким чином, проведення термообробки для даного процесу є доцільним.

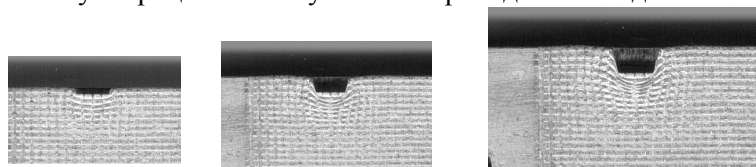


Рис. 2. Стадії формування трапецеїдального профілю

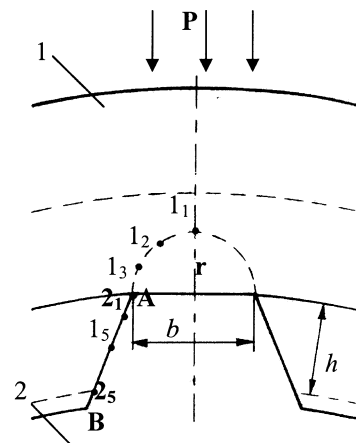


Рис. 1. Схема формування внутрішніх шліців в трубній заготовці

**Дані розрахунку напруженого стану і показників  $\eta$  і  $\chi$**

$h$ , мм	$e_u$	$\sigma_u$ , $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_p$ , $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_\theta$ , $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_0$ , $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\eta$	$\tau_{p\theta}$ , $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\chi$
Дані для точки 1								
1,5	0,28	61	0	- 60	- 30,5	- 1,5	9	0,22
1,7	0,32	62	10	- 51	- 20	- 1	7,7	0,366
1,8	0,35	63	12	- 51	- 19	-0,92	7,6	0,374
2,3	0,4	65	16	- 49	- 16	- 0,75	7,3	0,37
2,7	0,45	66	18	- 48	- 15	- 0,67	7,1	0,36
Дані для точки 2								
1,5	0,13	55	12	- 43	- 15	- 0,83	7,4	0,373
1,8	0,28	61	16	- 43	- 13,8	- 0,7	6,9	0,35
2	0,33	63	18	- 45	- 13	- 0,63	6,7	0,36
2,4	0,4	65	24	- 41	- 8,5	- 0,4	6,1	0,316
2,7	0,45	66	30	- 36	- 1,3	- 0,13	5,4	0,226

\* Розрахунок зроблений за методикою, викладеною в [5].

Дослідження виконували з однією проміжною термообробкою. Режим термообробки зразків після деформування був таким: температура 700 °С, витримка при цій температурі 4 години й охолодження разом з піччю. Швидкість нагрівання не перевищувала 3 град/хв. Граничну деформацію при стисканні визначали за відношенням

$$e_p = \ln \frac{h_0}{h_p}, \tag{2}$$

де  $h_0$  — початкова висота зразка;  $h_p$  — висота зразка після руйнування в процесі осідання.

Ступінь деформації на  $i$ -му етапі після стискання визначали за формулою

$$e_u = \ln \frac{h_0}{h_i}, \tag{3}$$

де  $h_i$  — висота зразка після деформування.

Використаний ресурс пластичності без відпалу визначався за співвідношенням  $\psi_1 = \frac{e_u}{e_p}$ . Ступінь деформації на  $i$ -му етапі із застосуванням відпалу знаходили як

$$e_{u2} = \ln \frac{h_0}{h_{p2}}, \tag{4}$$

де  $h_{p2}$  — висота зразка після руйнування в процесі осаджування на  $i$ -му етапі.

Використаний ресурс пластичності із застосуванням відпалу

$$\psi_2 = \frac{e_{u2}}{e_p}, \tag{5}$$

тоді величина відновленого запасу пластичності після відпалу  $\Delta\psi_1$  [8]

$$\Delta\psi_1 = \psi_1 + \psi_2 - 1. \tag{6}$$

На рис. 3 показані зразки з різним ступенем деформації після проведення відпалу, на рис. 4 — зруйновані зразки для визначення  $e_{i2}$  на  $i$ -му етапі. На рис. 5 показана залежність, що характеризує стадії накопичень пошкодження під час деформування і можливості їх зменшення із застосуванням термічної обробки. Аналіз показує, що дефекти, які не заліковуються відпалом, виникають з  $\psi \geq 0,2 \dots 0,25$ . Таким чином, відновлення пластичності в небезпечних областях із застосуванням відпалу може скласти близько 40 %, що для даного процесу є бажаним, тому що виріб буде мати більшу міцність і зносостійкість.

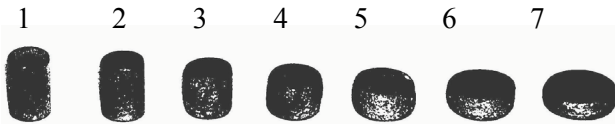


Рис. 3. Зразки з різним ступенем деформації після проведення відпалу

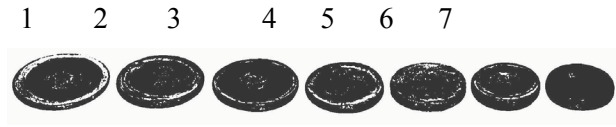


Рис. 4. Зруйновані зразки для визначення  $e_{i2}$  на  $i$ -му етапі

З точки зору вивчення впливу термообробки і вибору матеріалів для виготовлення шліцьової втулки можна також відзначити таке. Відповідно до рекомендацій А. П. Гуляєва [7], для виробів, на які діють ударні навантаження, варто застосовувати хромонікелеві високоміцні сталі, а для виробів складної конфігурації, для яких деформація після гартування небажана (наприклад, шестерні) – леговані сталі, що гартуються в маслі. Після гартування і низького відпуску ці сталі мають високу міцність (межа міцності до 130 – 140 МПа), це обумовлює їх застосування не тільки в цементованому вигляді, але і без цементації (коли потрібна висока міцність без вимоги високої зносостійкості).

Встановлено, що термообробка хромонікелевих сталей забезпечує знаходження межі мартенситного перетворення (точка  $M_c$ ) для насиченого вуглецем цементованого шару нижче  $0^\circ\text{C}$  [7]. Отже, після звичайного гартування і низького відпуску в такому шарі буде зберігатися велика кількість залишкового аустеніту, що часто знижує твердість металу нижче допустимої межі (HRC 58—62). Радикальним ходом для усунення зайвого залишкового аустеніту в цементованому шарі є обробка холодом [7], яка полягає в тому, що деталі після гартування охолоджують до низьких температур. Це забезпечує перетворення майже всього аустеніту в мартенсит в поверхневому шарі і підвищує твердість. До таких сталей відносяться цементовані низьковуглецеві сталі X18N9T і 12X18N9T. Сталі 40X та 40XH2MA є поліпшеними (середньовуглецевими). Поширена термічна обробка таких сталей — гартування в маслі з подальшим високим відпуском. Важливою характеристикою цих сталей є їхня здатність до наскрізного загартовування. Оскільки товщина стінок втулки після пластичного деформування складає менше 20 мм, (сталь 40X легована 1 % Cr), то це дозволяє одержати (з охолодженням в маслі) наскрізну загартованість. Легування хромистої сталі іншими елементами також підвищує загартовуваність (сталь 40XH2MA).

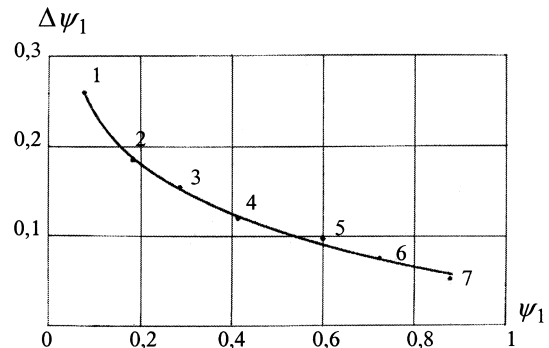


Рис. 5. Відновлення пластичності при проведенні відпалу деформованих зразків.

### Висновки

1. Відновлення пластичності за рахунок відпалу деталей зі сталі 20X є ефективним після пластичної формозміни виробу зі значеннями  $\psi < 0,2 \dots 0,25$ . Дефекти, які не заліковуються відпалом виникають зі значеннями ресурсу пластичності  $\psi \geq 0,2 \dots 0,25$ . Відновлення пластичності з використанням відпалу в небезпечних областях досягає 45–50 %.

2. Представлений аналіз доцільності вибору термообробки сталей з урахуванням умов роботи виробів.

Наведенні результати досліджень показують доцільність розвитку комплексних та системних підходів до розв’язання різних прикладних задач теорії пластичності; такий науковий на-

прямою розвивається на кафедрі опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дель Г. Д. Технологическая механика. — М.: Машиностроение, 1978. — 174 с.
2. Бочвар А. А. Металловедение. М.: Metallurgizdat, 1956. — 494 с.
3. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М.: Metallurgiya, 1974. — 400 с.
4. Розенберг О. А., Траченко Б. П. Формообразования шлицевых отверстий в трубных заготовках методом холодного пластического деформирования // Технология и организация производства. — 1991. — № 2. — С. 20—23.
5. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Музычук В. И. Приложение теории деформируемости к решению задач механики деформирования внутреннего шлицевого профиля обжатим на оправке. Сборник научных трудов международной НТК «Прогрессивные технологии и оборудование кузнечно-штамповочного производства», МГТУ «МАМИ», Москва, 2003. С. 66—75.
6. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. — К.: Вища школа, 1983. — 175 с.
7. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. 3 – е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1978. — 368 с.
8. В. Л. Колмогоров. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. М.: Metallurgiya, 1986. — 688 с.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки

Надійшла до редакції 29.06.2004  
Рекомендована до опублікування 14.09.2004

**Огородніков Віталій Антонович** — завідувач кафедри опору матеріалів та прикладної механіки.  
Вінницький національний технічний університет;

**Нахайчук Олег Вікторович** — доцент кафедри сільськогосподарських машин; **Музычук Василь Іванович** — асистент кафедри тракторів, автомобілів та технічного сервісу машин.  
Вінницький державний аграрний університет