

УДК 621.73.011

Сивак І. О.
Ярошенко Т. В.**ОЦІНКА СТУПЕНЯ ЗМІЦНЕННЯ І ПОШКОДЖУВАНOSTІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕТАЛУ ПРИ ВДАВЛЮВАННІ КУЛЬКИ**

У більшості випадків втрата працездатності та прискорений вихід з ладу під час експлуатації деталей машин є наслідком процесів, які відбуваються у приповерхневих шарах деталей [1]. Покращити якісні показники поверхневого шару, можна поверхневим пластичним деформуванням. Цей вид обробки дозволяє отримати зміцнену поверхню, з низькою шорсткістю при порівняно незначних затратах. При ППД утворюються залишкові напруження стиску, що позитивно впливають на роботу деталі при знакозмінних навантаженнях. Для досягнення потрібних показників якості поверхні в даний час запропоновано ряд методик [2], з їх перевагами та недоліками [3]. Однак залишається питання вибору оптимальних режимів обробки, необхідних для досягнення необхідної величини зміцнення поверхневого шару металу при допустимому рівні величини використаного ресурсу пластичності.

При поверхневій пластичній деформації граничні значення параметрів процесу визначають експериментально [1, 2, 4]. В більшості випадків, поверхневий шар металу деформують до появи тріщин на поверхні деталі. Потім наближено призначають параметри процесу. Однак відомо, що якісні експлуатаційні характеристики деталі можна гарантувати при значеннях використаного ресурсу менших 0,4...0,6. При експериментальному підході величина використаного ресурсу в поверхневому шарі залишається невідомою. Тому якщо ресурс близький 0,9, руйнування поверхні не буде, але робочий ресурс такої деталі обмежений, так як при використаному ресурсі більшому чи рівному 0,6, в металі виникають макротріщини, наявність яких значно зменшує ресурс деталі, особливо при знакозмінних навантаженнях. При використанні методів теорії деформуемості величина використаного ресурсу та її залежність від параметрів процесу поверхневої пластичної деформації визначається на стадії проектування. При цьому необхідно мати інформацію про напружено-деформований стан в осередку деформації та закони його зміни в залежності від параметрів процесу поверхневої пластичної деформації. Крім того, потрібно виконати експериментальні дослідження та установити залежність пластичності металу від схеми напруженого стану. Такий підхід дозволяє отримати кількісну оцінку впливу параметрів процесу пластичної деформації поверхневого шару металу на використаний ресурс пластичності.

Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану в осередку деформації при вдавлюванні кульки в циліндричну поверхню та оцінка на цій основі ступеня зміцнення і пошкодженості поверхневого шару металу в залежності від параметрів процесу вдавлювання.

Розрахунок НДС виконували методом скінченних елементів з використанням комп'ютерних програм. Розглядалась сталь 40Х. Отримані поля розподілення інтенсивності напружень σ_u та ступеня деформацій e_u для вдавлювання кульки в циліндричну поверхню приведено в табл. 1. Інтенсивність напружень із ростом діаметра кульки зменшується від $\sigma_u = 1130 \text{ Н/мм}^2$ при $d_1 = 12,7 \text{ мм}$ до $\sigma_u = 980 \text{ Н/мм}^2$ при $d_3 = 18,26 \text{ мм}$. Тобто величина зміцнення, при інших рівних умовах, зростає зі зменшенням діаметра кульки.

Під пластичністю будемо розуміти здатність металу змінювати свою форму без руйнування в вигляді макроскопічного порушення суцільності. В якості міри пластичності будемо використовувати накопичену до моменту руйнування пластичну деформацію:

$$e_p = \int_0^t \dot{\epsilon}_u d\tau, \tag{1}$$

де $\dot{\epsilon}_u$ – інтенсивність швидкостей деформацій;
 t_p – час деформування до руйнування.

Таблиця 1

Розподіл σ_u , e_u при вдавлюванні кульки діаметром d в циліндричну поверхню ($P = 1,2$ кН)

d , мм	Інтенсивність напружень, σ_u	Ступінь деформації, e_u
$d_1 = 12,7$		
$d_2 = 15,88$		
$d_3 = 18,26$		

Величину e_p можна розглядати також як довжину траєкторії деформації в просторі вектора деформації.

В феноменологічній теорії пластичності в якості характеристики, яка описує залежність пластичності від схеми напруженого стану використовують діаграму пластичності. Діаграма пластичності будується на основі експериментальних досліджень і описує залежність пластичності металу від схеми напруженого стану. Схема напруженого стану визначається показником напруженого стану η [5, 6], який визначається за формулою:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \quad (2)$$

де $I_1(T_\sigma)$ – перший інваріант тензора напружень;

$I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант девіатора напружень;

$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ – середнє напруження;

σ_u – інтенсивність напружень.

В даній роботі виконані дослідження поверхневої пластичної деформації циліндричних зразків із сталі 40X. Тому діаграму пластичності будували саме для цієї сталі.

Для цього проводили експериментальні дослідження на розтяг, кручення і стиск, результати яких приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень на розтяг, кручення і стиск

Розтяг $\eta = 1$	Кручення $\eta = 0$	Стиск $\eta = -1$
$e_p = 2 \ln \frac{d_0}{d} = 2 \ln \frac{10}{9,6} = 0,08$	$e_p(0) = \frac{tg \gamma}{\sqrt{3}} = \frac{tg 33,5^\circ}{\sqrt{3}} = 0,38$	$e_p(-1) = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{15}{4,8} = 1,14$

Діаграму пластичності для сталі 40X апроксимували залежністю [6]:

$$e_p(\eta) = e_p(0) \exp(-\lambda \eta), \quad (3)$$

де

$$\lambda = \ln \frac{e_p(-1)}{e_p(0)} = \ln \frac{1,14}{0,38} = 1,1; \quad e_p(0) = 0,38. \quad (4)$$

Тоді:

$$e_p(\eta) = 0,38 \exp(-1,1\eta). \quad (5)$$

Так як при вдавлюванні кульки в циліндричну заготовку в області контакту кульки з заготовкою має місце об'ємний напружений стан, то для описання залежності пластичності від схеми напруженого стану необхідно використовувати не менше двох показників напруженого стану. В даній роботі в якості другого показника напруженого стану прийнято параметр Надаї-Лоде:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (6)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

Поверхня граничних деформацій описує залежність граничної деформації e_p від показника жорсткості напруженого стану η і параметра Надаї-Лоде μ_σ . Для побудови поверхні граничних деформацій $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ нами використано методику [7, 8]. При цьому поверхню граничних деформацій апроксимували залежністю:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = e_p(0, 0) \exp(\lambda_2 \mu_\sigma - \lambda_1 \eta), \quad (7)$$

де

$$\lambda_1 = \ln \frac{e_p(-1, 0)}{e_p(0, 0)}, \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \ln \frac{e_p(0, 1)}{e_p(0, 0)}, \quad (9)$$

$e_p(0, 0)$, $e_p(-1, 0)$, $e_p(0, 1)$ – граничні деформації при $\eta = 0$, $\mu_\sigma = 0$; $\eta = -1$, $\mu_\sigma = 0$; $\eta = 0$, $\mu_\sigma = 1$ відповідно.

Значення коефіцієнтів апроксимації λ_1 і λ_2 знаходили по залежностях $\lambda_1(\lambda)$ і $\lambda_2(\lambda)$, приведених в роботі [7, 8]. При цьому були отримані наступні значення: $\lambda_1 = 0,58$; $\lambda_2 = 0,48$.

В результаті для сталі 40Х залежність пластичності від схеми напруженого стану при об'ємному напруженому стані описували виразом:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,38 \exp(0,48 \mu_\sigma - 0,58 \eta). \quad (10)$$

Величину накопиченої деформації визначали як довжину траєкторії в просторі вектора пластичних деформацій:

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (11)$$

де $\dot{\varepsilon}_u$ – інтенсивність швидкостей деформацій;

t – час деформування.

Величину пластичного розриву металу та обумовлений ним ступінь пошкодженості металу буде визначати величиною використаного ресурсу пластичності ψ . Ввихідному стані $\psi = 0$, а при появі макротріщини – $\psi = 1$.

Величину використаного ресурсу пластичності в небезпечній точці осередку деформації розраховували за критерієм [6, 7]:

$$\psi = \int_0^{e_u^*} n \frac{e_u^{n-1}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)^n} de_u, \quad (12)$$

де $\eta = \eta(e_u)$; $\mu_\sigma = \mu_\sigma(e_u)$; $n = 1 + 0,05 \frac{d\eta}{de_u} - 0,03 \frac{d\mu_\sigma}{de_u}$.

Результати розрахунків зведено до табл. 3.

Таблиця 3

Значення σ_u , η , μ_σ , e_u , ψ при вдавлюванні кульок різних діаметрів в циліндричну поверхню

Значення показників при діаметрах кульки d_i		Контактне навантаження P , кН				
		$P_1 = 1,2$	$P_2 = 2,4$	$P_3 = 4,6$	Діаметр деталі, D , мм	ψ
$d_1 = 12,7$ мм	σ_u , МПа	1130	1210	1270	20	0,143
	e_u	0,085	0,107	0,132		
	η	-2,30	-2,47	-2,73		
	μ_σ	0,408	0,393	0,379		
$d_2 = 15,88$ мм	σ_u , МПа	1060	1170	1250	20	0,198
	e_u	0,071	0,094	0,121		
	η	-2,40	-2,47	-3		
	μ_σ	0,41	0,393	0,379		
$d_3 = 18,26$ мм	σ_u , МПа	980	1120	1220	20	0,137
	e_u	0,058	0,082	0,11		
	η	-2,47	-2,75	-3,02		
	μ_σ	0,427	0,406	0,397		

ВИСНОВКИ

З аналізу отриманих результатів видно, що для дослідженого інтервалу навантажень та діаметрів кульок із збільшенням діаметра кульки величина використаного ресурсу пластичності спочатку зростає, а потім зменшується. Ступінь зміцнення зростає із зменшенням діаметра кульки. Тому при виборі діаметра кульки і зусилля необхідно виходити із умови поставленої задачі і враховувати особливості залежності використаного ресурсу пластичності і ступеня зміцнення від розмірів кульки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Деревінка І. С. Стан і аналіз сучасних методів підвищення надійності деталей машин поверхневим зміцненням / І. С. Деревінка; відп. ред. З. А. Стоцько // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні : [зб. наук. пр.]. – Л. : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – № 583. – С. 18–24.
2. Саушкин М. Н. Феноменологический подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия / М. Н. Саушкин, В. А. Кирпичёв, В. А. Смыслов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 1 (18). – С. 159–168. – (Серия «Физ.-мат. науки»).
3. Иоргачев В. Д. Определение уровня остаточных напряжений в деталях машин при их поверхностном пластическом деформировании / В. Д. Иоргачев, П. А. Линчевский // Труды Одесского политехнического университета. – 2003. – Вып. 1 (19). – С. 18–21.
4. Сивак І. О. Поверхність предельной пластичности / І. О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 272–274.
5. Колмогоров В. Л. Напряжение, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 230 с. : ил.
6. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак // Винница : УНІВЕРСУМ, 2005. – 204 с.
7. Сивак І. О. Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак, Е. И. Сивак, С. И. Сухоруков // Изв. Тул. ГУ. – Тула : Тул. ГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 114–121. – (Серия «Механика твёрдого деформируемого тела и обработка металлов давлением»).
8. Сивак І. О. Поверхність предельной пластичности / І. О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 272–274.

Сивак І. О. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ВНТУ;

Ярошенко Т. В. – аспірант ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

E-mail: sivak_i_o@mail.ru; yarochenko_tania@mail.ru

Стаття надійшла до редакції 13.03.2012 р.