

**Сердюк О.В., Сивак І.О., Сухоруков С.І., Сивак Р.І.**  
**ОЦІНКА ПЛАСТИЧНОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕТАЛУ ПРИ**  
**НЕМОНОТОННОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

*Виконано аналіз напружено-деформованого стану в осередку деформації при обкочуванні циліндричної поверхні. Встановлено вплив різних способів обкочування на використаний ресурс пластичності з врахуванням немонотонності навантаження. Проведено експериментальну перевірку отриманих результатів методом мікротвердості.*

*Ключові слова:* напружено-деформований стан, обкочування, ресурс пластичності, поверхневий шар металу, немонотонне навантаження.

*Форм.10. Рис. 6. Літ. 5.*

**Сердюк О.В., Сивак І.О., Сухоруков С.І., Сивак Р.І.**  
**ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ШАРА МЕТАЛА ПРИ**  
**НЕМОНОТОННОМ НАГРУЖЕНИИ**

*Выполнен анализ напряженно-деформированого состояния в очаге деформации при обкатывании цилиндрической поверхности. Определено влияние разных способов обкатки на использованный ресурс пластичности с учетом влияния немонотонности нагружения. Проведено экспериментальную проверку полученных результатов метод микротвердости.*

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, обкатывание, ресурс пластичности, поверхностный слой металла, немонотонное нагружение.

*Форм. 16. Рис.5. Лит.10*

**Serduk O.V., Sivak I.O., Syhorykov S.I., Sivak R.I.**  
**ASSESSMENT OF PLASTIC BALL SURFACE METHANE AT NON-MONOTONOUS**  
**LOADINGTHE**

*Analysis of the stress-deformation state in the deformation zone during obkatyvanii cylindrical surface. The effect of different methods used to break-plasticity resource for the effects of non-monotonous loading. An experimental verification of the results of the microhardness method.*

*Keywords:* stress-deformation state obkatyvanii, plasticity resource, the surface layer of metal, non-monotonic loading.

*Form. 16. Figure 5. Lit.10*

Однією із важливих задач при виготовленні деталей є забезпечення високої якості робочих поверхонь і покращення фізико-механічних характеристик поверхневого шару їх матеріалу. Одним із найбільш економічних та ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД), яке дозволяє повніше реалізувати потенційні властивості конструкційних матеріалів в реальних деталях складної будови та в деталях з концентраторами напружень [1, 2]. Найбільш поширеним способом ППД є обкочуванням роликком. При цьому можливі різні режими обробки, конструкція ролика та побудова самого процесу обкочування. Зокрема можливе обкочування за один прохід, за кілька проходів в одному напрямі, та за два або кілька проходів в різних напрямках переміщення ролика. При останньому способі виникає немонотонність навантаження при деформуванні поверхневого шару, внаслідок змінного напрямку переміщення ролика і зміни знаків напружень.

При пластичній деформації одночасно з процесами зміцнення ідуть процеси пластичного розрихлення. Установлено, що при значеннях величини використаного ресурсу пластичності  $\psi > 0,6$  інтенсивність процесів накопичення пошкоджень значно перевищує інтенсивність зміцнення [3, 4]. Тому величина  $\psi$  при поверхневому пластичному деформуванні не повинна перевищувати цього значення.

В даній роботі поставлена задача досягти максимального зміцнення поверхневого шару металу при допустимому значенні величини  $\psi$ . Для досягнення поставленої мети в роботі використані переваги немонотонного навантаження, які полягають в тому, що при такому навантаженні зменшується інтенсивність накопичення пошкоджень, так як крім процесів пластичного розрихлення ідуть процеси заліковування [4].

Дана задача розв'язувалася за допомогою математичного моделювання методом скінченних елементів. В даній моделі розглядалося обкочування роликом діаметром 30 мм з профільним радіусом 5 мм сталюого валу (Сталь 45) діаметром 50 мм. Із отриманих результатів видно, що при вдавлюванні та обкочуванні напруження  $\sigma_x$ ,  $\sigma_\phi$  стискуючі, а напруження  $\sigma_z$  стискуюче під

роликом, але розтягуюче перед та після нього на поверхні деталі. Це підтверджує складний напружений стан в поверхневому шарі при вдавлуванні та обкочуванні деталі роликом.

У якості кількісної характеристики пластичності металу прийнята гранична деформація  $\epsilon_p$ .

При холодній пластичній деформації значення  $\epsilon_p$  залежать, в основному, від напруженого стану і його зміни в процесі пластичної деформації. Для кількісної оцінки впливу історії навантаження на величину граничної деформації  $\epsilon_p$  при об'ємному напруженому стані нами використано три інваріантні характеристики напружено-деформованого стану в якості координат простору, в якому даний напружено-деформований стан досліджується. В даній роботі в якості таких характеристик прийняті наступні інваріантні величини: показник напруженого стану

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \tag{1}$$

де  $\sigma_u$  - інтенсивність напружень, яку визначали за формулою

$$\sigma_u = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2)}, \tag{2}$$

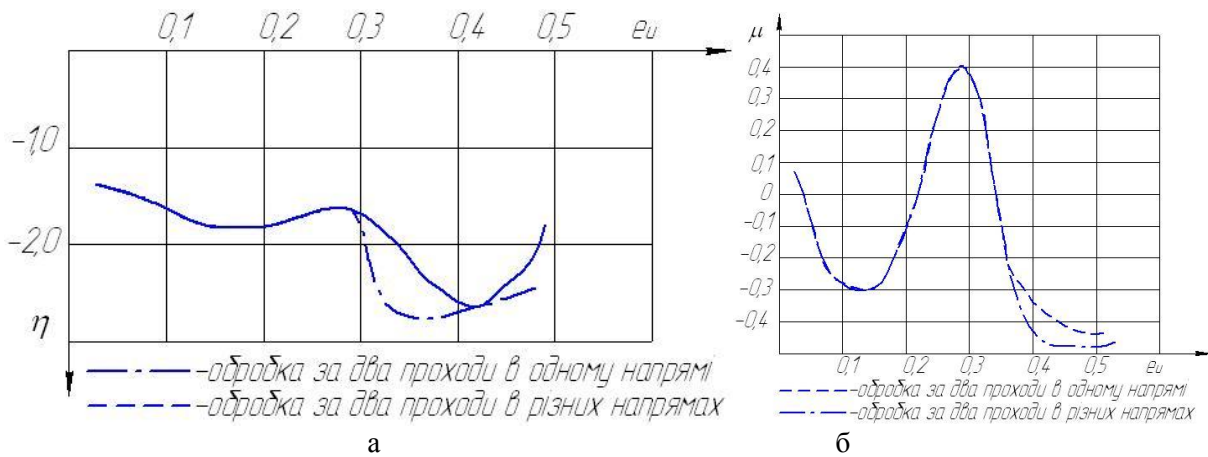


Рис.1. Залежність показника напруженого стану  $\eta$  (а) та параметр Надаї-Лоде  $\mu$  (б) від ступеня деформації  $\epsilon_u$

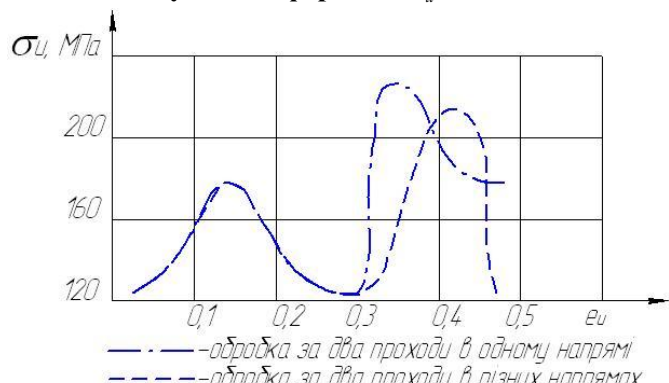


Рис.2. Залежність інтенсивності напружень від ступеня деформації  $\epsilon_u$

параметр Надаї-Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \tag{3}$$

і ступінь деформації

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (4)$$

де  $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$  – середнє напруження;  $t$  – час деформування,  $\dot{\varepsilon}_u$  – інтенсивність швидкостей деформацій.

Отримані в результаті розрахунків за формулами (1), (3), (4) залежності показників напруженого стану  $\eta$  і  $\mu_\sigma$  від ступеня деформації  $e_u$  для випадків, коли обкочування проводиться за два проходи в одну сторону та коли обкочування проводиться за два проходи в протилежних напрямках приведені на рис. 1. Аналогічні залежності для інтенсивності напружень  $\sigma_u$  приведені на рис. 2. Як видно із приведених результатів в обох випадках обкочування має місце немонотонність навантаження. Тому величину використаного ресурсу пластичності  $\psi$  в поверхневому шарі металу після обкочування розраховували за критерієм [4]:

$$\psi = \sqrt{\psi_{ij} \psi_{ij}}, \quad (5)$$

де  $\psi_{ij}$  – компоненти тензора пошкоджень.

Використання критерію (5) дозволяє врахувати вплив немонотонності навантаження на пластичність. Якщо використовувати головні компоненти тензора пошкоджень  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ , то величина використаного ресурсу пластичності буде дорівнювати [5]:

$$\psi = \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2}. \quad (6)$$

Компоненти тензора пошкоджень  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  розраховували за формулами [5]:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \int_0^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_1 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \\ \psi_2 &= \int_0^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_2 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \\ \psi_3 &= \int_0^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_3 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \end{aligned} \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \\ \beta_2 &= \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \\ \beta_3 &= -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Поверхню граничних деформацій  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  яка входить в (7), (8) апроксимували для сталі 45 залежністю [5]

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0.42 \exp(0.51\mu_\sigma - 0.71\eta), \quad (9)$$

а історію навантаження, яка в (7) і (8) визначається характером залежності  $e_u$  від показників напруженого стану  $\eta$  і  $\mu_\sigma$  задавали параметрично  $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u), e_u$ .

Отримані траєкторії навантаження для точки, в якій величина  $\psi$  приймає найбільші значення та поверхня граничних деформацій сталі 45 приведені на рис. 3, 4. Аналіз характеру отриманих траєкторій навантаження показує, що немонотонність має місце в обох випадках обкочування, однак при обкочуванні за два проходи в протилежних напрямках, немонотонність виражена значно сильніше.

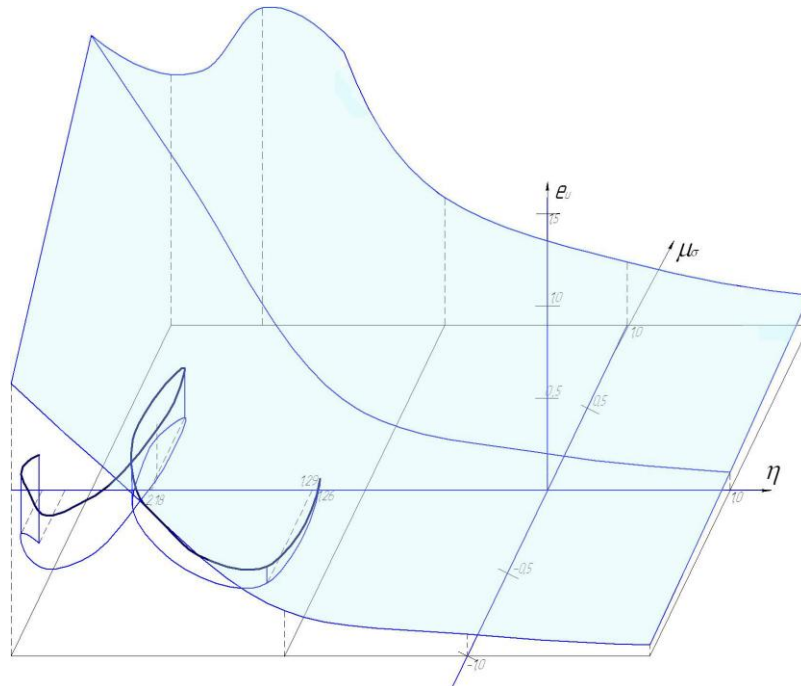


Рис.3. – Траєкторія навантаження при обкочуванні двічі в одному напрямі

Для обох випадків траєкторії, обумовлених різними умовами обкочування розраховано використаний ресурс пластичності  $\psi$  за формулою (6). При обкочуванні двічі в одному напрямкові (рис. 3) він складає 0,37, при обкочуванні в різних напрямках (рис. 4)— 0,25, і за таких же умов за один прохід —0,57. Отримані результати свідчать про те, що при немонотонному навантаженні інтенсивність накопичення пошкоджень зменшується.

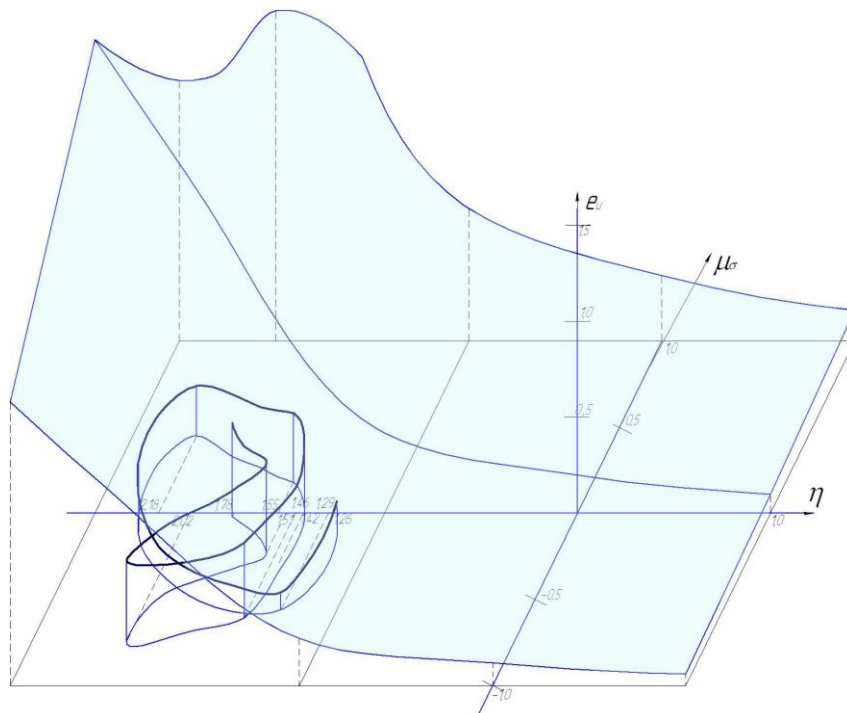


Рис.4. – Траєкторія навантаження при обкочуванні двічі в різних напрямках

Для перевірки отриманих результатів після обкочування тороїдальним роликом (рис.5) виконано експериментальне дослідження твердості поверхневого шару металу, які приведені в таблиці 1. Стан поверхні після ППД показано на рисунку 6.

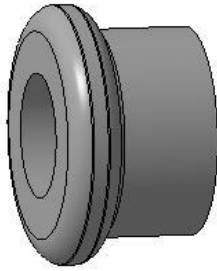


Рис.5. Інструменти для ППД

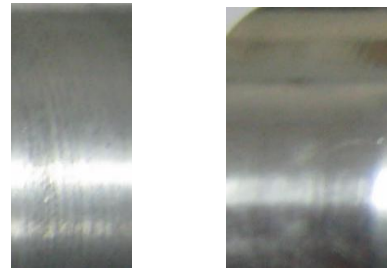


Рис.6. Поверхні після ППД

Таблиця 1

### Твердість поверхневого шару

Вид обробки	Твердість, НВ
Вихідна	92,3
Обкатка інструментом тороїдальної форми за один прохід (рис. 6а)	125,4
Обкатка інструментом тороїдальної форми за два прохода в одному напрямку (рис. 6б)	132,6

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що немонотонність навантаження обумовлена тим, що перед роликом та після нього виникає хвиля, в якій мають місце напруження розтягу, тоді як під роликом виникає напружений стан всестороннього стиску. Крім того, при зміні напрямку обкочування змінюється знак дотичних напружень, що сприяє частковому заліковуванню мікротріщин і, відповідно, зменшенню величини використаного ресурсу пластичності.

**Висновки.** В статті виконано дослідження впливу різних способів обкочування на величину використаного ресурсу пластичності  $\psi$  в поверхневому шарі металу. Установлено, що при немонотонній пластичній деформації величина  $\psi$ , в порівнянні з монотонним деформуванням, зменшується на 35%, при інших рівних умовах. Отримані результати практично співпадають з результатами експериментальних досліджень.

### Список використаних джерел:

1. Смелянский В.М. Исчерпание запаса пластичности металла в поверхностном слое деталей при обработке обкатыванием / В.М. Смелянский, Калпин Ю.Г., Баринов В.В. // Вестник машиностроения. -1990.-№8-С.34-38
2. Сердюк О.В. Моделирование процесса деформирования поверхностного слоя при обкатке цилиндрическим роликом / О.В. Сердюк // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – 2012. - №3(32). – С.15-18.
3. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)/ В.А. Огородников, В.Б. Киселев, И.О. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ - Винниця, 2005. – 204 с.
4. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла / Г.Д. Дель // Физика и техника высоких давлений.- 1982.- №11.- С.28-32.
4. Сивак Р.И. Условие разрушения металлов при немонотонном деформировании / Р.И. Сивак // Металлургическая и горнорудная промышленность.-Днепропетровск.-2011.-№7(272).-2011.-С.49-52
5. Сердюк О.В. Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика / О.В. Сердюк, І.О. Сивак, М.А. Карватко // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. – Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2013. – Вип. 40. – С.251-256. – (За галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»).

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016.