

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

СЕРДЮК ОЛЬГА ВАЛЕНТИНІВНА

УДК 621.735.34

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОБКОЧУВАННЯ
РОЛИКОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ
ДЕФОРМОВНОСТІ**

05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана в Вінницькому національному технічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Сивак Іван Онуфрійович,

Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри технології та автоматизації
машинобудування.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Матвійчук Віктор Андрійович,

Вінницький національний аграрний університет,
завідувач кафедри електротехнічні системи,
технології та автоматизація в АПК

кандидат технічних наук, доцент

Тітов Андрій Вячеславович,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», доцент кафедри прикладної
механіки.

Захист відбудеться «21» лютого 2019 р. об 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.03 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК

Автореферат розісланий «18_» січня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

С. І. Сухоруков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом в Україні та в інших країнах особлива увага приділяється якості і технологічній спадковості готових виробів, які отримують обробкою металів тиском. 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.

В даний час при поверхневій пластичній деформації граничні значення параметрів процесу визначають експериментально, в основному, шляхом вимірювання твердості. Основний недолік такого підходу полягає в тому, що при вимірюванні твердості залишається невідомою величина використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі металу. Однак відомо, що якісні експлуатаційні характеристики деталі можна гарантувати при значеннях використаного ресурсу менших 0,4...0,6.

При використанні методів теорії деформовності 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 провести експериментальні дослідження та установити залежність пластичності металу від схеми напруженого стану. Такий підхід дозволяє отримати кількісну оцінку впливу параметрів процесу на пластичність металу в поверхневому пластично деформованому шарі заготовки.

На даний час такий підхід для визначення ефективності процесів ППД практично не застосовується. Тому в даній роботі розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану в осередку деформації методом ліній ковзання та методом скінченних елементів (МСЕ), а також методику оцінки використаного ресурсу пластичності.

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача удосконалення процесу обкочування деталей на основі використання нової конструкції інструменту і технології обробки.

Основною ідеєю при розв'язанні поставленої задачі є забезпечення якості поверхневого шару (механічних характеристик, використаного ресурсу пластичності) шляхом застосування процесу обкочування у прямому і зворотньому напрямі роликком із гвинтовою робочою поверхнею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконані у відповідності з науковим напрямом однієї з провідних наукових шкіл Вінницького національного технічного університету "Розвиток феноменологічної теорії руйнування матеріалів при великих пластичних

деформаціях та розробка на цій основі нових та удосконалення існуючих технологій обробки металів тиском". Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, передбачених планами Міністерством освіти і науки України (номер державної реєстрації тем 0111U003458, 0112U001366, 0110U002171), автор брав участь у виконанні тем як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Підвищення якості та технологічної спадковості поверхневого шару металу заготовки пластично зміцненого обкочуванням роликком на основі розвитку методів розрахунку напружено-деформованого стану і ресурсу пластичності матеріалу при немонотонній деформації та розробки рекомендацій по удосконаленню технології процесу.

Для досягнення вказаної мети в роботі були поставлені і вирішені наступні **завдання:**

1. На основі аналізу сучасного стану і перспектив розвитку процесів обкочування деталей сформулювати їх недоліки та визначити основні задачі дослідження, які забезпечать високі параметри якості поверхневого шару деталей та підвищення технологічної спадковості виробів;

2. Виконати чисельне моделювання процесу деформування поверхневого шару матеріалу деталей при обкочуванні з використанням МСЕ;

3. Розробити математичну модель контактної взаємодії деталі та інструмента при обкочуванні роликком та визначити вплив технологічних факторів на використаний ресурс пластичності;

4. Розробити методику теоретичного та експериментального дослідження впливу використаного ресурсу пластичності на службові характеристики виробів;

5. Запропонувати та реалізувати нові технічні рішення, що забезпечують підвищення ефективності обкочування;

6. Експериментально визначити показники якості поверхневого шару заготовки при обкочуванні та оцінити вплив на них технологічних параметрів процесу обкочування;

7. Виконати узагальнення технічних рішень та розробити рекомендації щодо їх впровадження. Впровадити технологічні процеси на підприємствах машинобудівної галузі.

Об'єкт дослідження – процес поверхневого пластичного деформування при обкочуванні роликком

Предмет дослідження – закономірності пластичного деформування та зміни величини використаного ресурсу пластичності матеріалу деталей при обкочуванні роликком, та їх вплив на технологічну спадковість виробів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження пластичності металів базуються на законах і методах механіки суцільного середовища, математичної та прикладної теорії пластичності, прикладної теорії деформовності. Для дослідження процесів пластичної деформації використані числові та експериментально-розрахункові методи із застосуванням ЕОМ.

Експериментальні дослідження виконувались як в лабораторних, так і у виробничних умовах з використанням лабораторного і заводського обладнання.

Обробка експериментальних даних проводилась методами математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. *Вперше* розроблений метод поверхневого пластичного деформування заготовки з використанням гвинтового ролика;
2. *Вперше* досліджено вплив залишкового ресурсу пластичності при обкочуванні деталі роликом на підвищення витривалості виробів;
3. *Отримало подальший розвиток* імітаційне моделювання процесу поверхневого обкочування заготовки з визначенням напружено-деформованого стану і використаного ресурсу пластичності;
4. *Отримала подальший розвиток* оцінка впливу немонотонного деформування на величину використаного ресурсу пластичності при використанні ролика із гвинтовою робочою поверхнею.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Запропоновано конструкцію ролика із гвинтовою робочою поверхнею, що дозволило значно підвищити якість поверхневого шару металу і ступінь зміцнення за рахунок використання немонотонного поверхневого пластичного деформування;
2. Розроблено рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів ролика в залежності від механічних характеристик матеріалу обкочуваних деталей, для забезпечення необхідного рівня зміцнення при мінімальному значенні використаного ресурсу пластичності;
3. Запропоновано практичні рекомендації щодо використання методів прикладної теорії деформовності для підвищення ступеня зміцнення при мінімальному накопиченні пошкоджень металу поверхневого шару;
4. Оцінено вплив обкочування на ступінь зміцнення при обкочуванні за напрямком, в якому здійснювалась подача попередньої механічної обробки і в протилежному напрямі;
5. Запропоновано режими ППД, при яких залишкові напруження в поверхневому шарі і шорсткість поверхні сприяють суттєвому підвищенню витривалості і зниженню інтенсивності зношування поверхневого шару деталі;
6. Результати роботи впроваджено на Барському машинобудівному заводі

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень отримані автором самостійно.

В роботах, що опубліковані у співавторстві, автору належать: моделювання процесу і побудова траєкторій навантаження при обкочуванні [2]; розрахунок НДС та математичне моделювання процесу за допомогою МСЕ [3]; розрахунок НДС з врахуванням немонотонності і ефекту Баушингера [4]; розробка конструктивної схеми електрогідравлічного стежного приводу обкатника [5]; отримання розв'язку кінетичного рівняння, що описує процес накопичення пошкоджень при поверхневій пластичній деформації, розробка методу оцінки ймовірності появи макротріщини в поверхневому шарі при немонотонній пластичній деформації [6,8,9]; теоретичне обґрунтування нового пристрою для обкочування металевих деталей [10].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на наукових конференціях, серед них:

4-та Міжнародна науково-технічна конференція «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 2014 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (м. Вінниця, 2011 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах (м. Вінниця, 2006 р.); 49-я Міжнародна науково-технічна конференція ААИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» (м. Москва, 2005 р.); III Міжнародна науково-технічна конференція «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» (м. Вінниця, 2016 р.); XVIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ППІ «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Вінниця, 2017 р.)

Публікації. Матеріали та основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 17 наукових роботах, з них 6 статей у спеціалізованих фахових виданнях згідно переліку МОН України, 1 публікація у закордонному виданні, 7 тез у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій. За результатами досліджень отримано патент України.

Обсяг і структура дисертаційної роботи. Робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, який нараховує 113 найменувань, 3 додатки на 20 сторінках. Повний обсяг дисертації становить 153 сторінки (з них 133 сторінки основної частини, 46 рисунків, 3 таблиці).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та задачі дослідження, дана характеристика об'єкта, предмета і методів дослідження. Викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, апробацію результатів та структуру дисертації, відзначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі розглянуто сучасний стан процесів ППД, наведено результати аналізу літературних джерел та сформульовані задачі дослідження.

Розглянуті відомі експериментально-розрахункові і інженерні методи визначення напружено-деформованого стану ППД та можливість їх застосування для розв'язання поставлених задач.

Проведено аналіз критеріїв деформовності Г.Д. Деля, В.А. Огороднікова та В.М. Михалевича з точки зору можливості їх використання для оцінювання граничного формозмінення в процесах немонотонного деформування при обкочуванні.

Встановлено, що відомі методи теоретичних та експериментальних досліджень процесу обкочування неповною мірою забезпечують визначення параметрів напружено-деформованого стану на всіх етапах обкочування, а використаний ресурс пластичності визначався без врахування немонотонності процесу.

Проведено аналіз методів моделювання взаємодії заготовки з роликком. На основі проведеного аналізу сформульовані завдання дослідження.

У другому розділі проведено вибір та обґрунтування напрямку і методів дослідження. Найбільш ефективним напрямом удосконалення технології обкочування роликком є вибір раціональних параметрів геометрії інструменту та технології процесу. Враховуючи складний характер пластичної течії металу поставлене завдання розв'язувалось з використанням різних методів: метода ліній ковзання, інженерного метода, метода скінченних елементів.

При використанні інженерного методу розглядалася схема пружно-пластичного контакту тіл довільної кривизни (рис.1). Контур залишкової вм'ятини на поверхні деталі в загальному випадку обмежений залишковою просторовою кривою, яка має в плані еліптичну форму з великою a , і малою b , піввісями. Геометричні параметри залишкової вм'ятини є важливими характеристиками деформованого стану матеріалу в контакті. При обкочуванні деталей роликками один із розмірів «відбитку» практично дорівнює ширині бігової доріжки робочого інструменту і визначає протікання процесу хвилеутворення на оброблюваній поверхні і практично визначає її мікрорельєф.

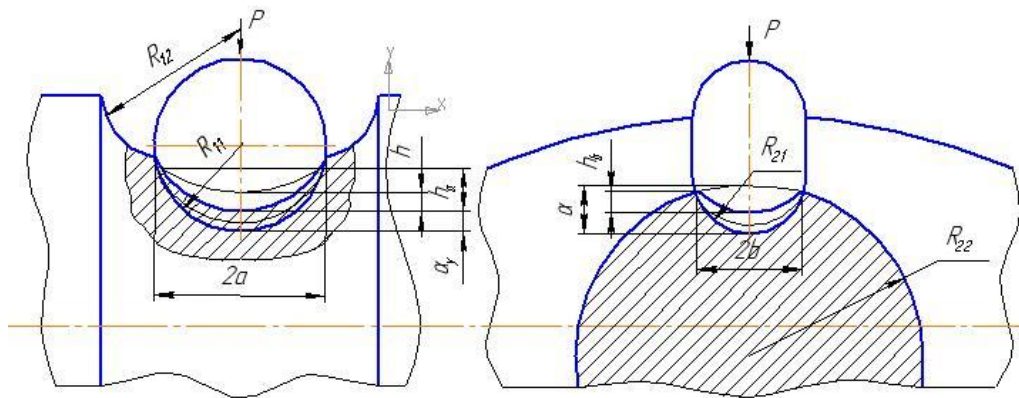


Рисунок 1 - Схема пружнопластичного контакту тіл довільної кривизни

Головні напруження $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (початок координат в центрі контакту ролика з заготовкою) визначалися за формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{2}{\pi} \cdot P_{сер} \cdot \int_0^{\pi/2} \left(2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right) \cdot \cos^2(\varphi) - \\ &- (1-2\mu) \left(L + \ln \frac{L+1}{2L} \right) d\varphi - \frac{1+2\mu}{2} \cdot P_{сер}, \\ \sigma_x &= \frac{2}{\pi} \cdot P_{сер} \cdot \int_0^{\pi/2} \left(2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right) \cdot \cos^2(\varphi) - \\ &- (1-2\mu) \left(L + \ln \frac{L+1}{2L} \right) d\varphi - \frac{1+2\mu}{2} \cdot P_{сер}, \\ \sigma_z &= \frac{2}{\pi} \cdot P_{сер} \cdot \int_0^{\pi/2} L^3 d\varphi - P_{сер}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $L = \frac{z}{b} \left(\frac{1}{1 - e^2 \sin^2 \varphi} - \frac{z^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}}$, $e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2}$ - ексцентриситет контуру еліптичної площадки, по поверхні якої розподілений тиск p .

Для визначення використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі розглядався пластичний контакт при коченні з ковзанням жорсткого ролика задача вирішувалася методом ліній ковзання.

Побудовано поле ліній ковзання (рис.2), де АВ- область відставання; ВС- безпосереднього контакту деталі і інструменту, CD – область випередження; DC₃B₅A₇ – пластична хвиля, яка виникає перед роликком

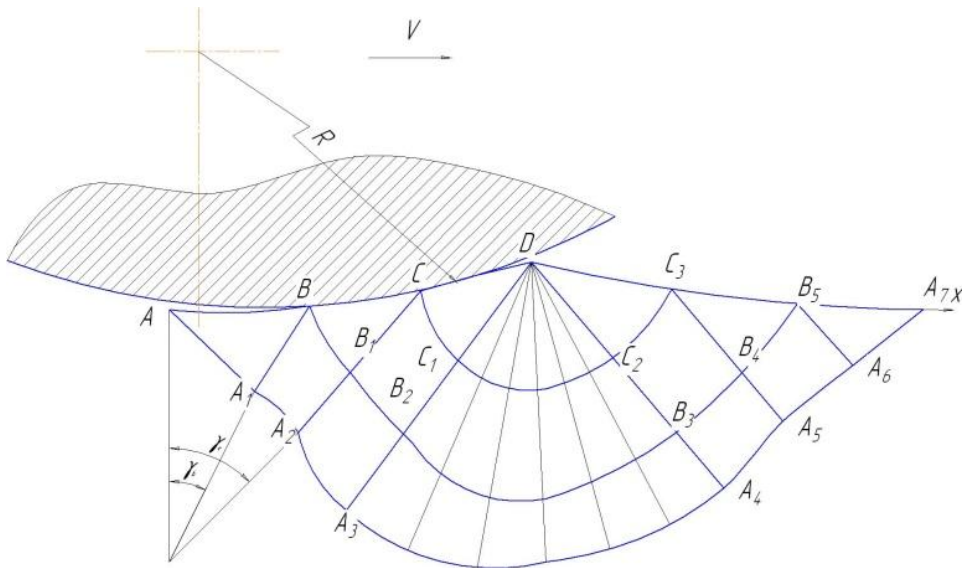


Рисунок 2 - Поле ліній ковзання для кочення циліндра

Поле ліній ковзання задовольняє всім статичним і кінематичним умовам для початкового рішення.

Швидкість лінійної деформації визначалася за формулою:

$$\begin{aligned}
 \dot{\varepsilon}_x = & -2V - \frac{2\rho_0}{(x - \rho_0)^2} \cdot \left(4V \cos \varphi \frac{-\rho_0}{(x - \rho_0)^2} + 4V^2 \left(\frac{-\rho_0}{(x - \rho_0)^2} \left(1 - \frac{\rho_0^2 + x}{(R - \rho_0)^2} \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{2x}{(R - \rho_0)^2} \cdot \frac{\rho_0 + x}{x - \rho_0} \right) \right) \left(2\sqrt{2} \frac{\rho_0 + x}{x - V} + (-2V \left(\frac{\rho_0 + x}{\rho_0 - x} \cos \varphi + \sin \varphi \right) - \right. \\
 & \left. - \sqrt{2V \left(\frac{\rho_0 + x}{\rho_0 - x} \cos \varphi + \sin \varphi \right)^2 + 4V^2 \frac{\rho_0 + x}{x - \rho_0} \left(1 - \frac{\rho_0^2}{(R - \rho_0)^2} \right)} \cdot 2\sqrt{2} \frac{\rho_0}{(x - \rho_0)^2} \right) \times \\
 & \times \left(1 - \frac{\rho_0 - x}{x - \rho_0} \right) / 2 \sqrt{2V \left(\frac{\rho_0 + x}{\rho_0 - x} \cos \varphi + \sin \varphi \right)^2 + 4V^2 \frac{\rho_0 + x}{x - \rho_0} \left(1 - \frac{\rho_0^2}{(R - \rho_0)^2} \right) +} \\
 & \left. + \frac{2\rho_0}{(x - \rho_0)^2} \cdot \left(-2V \left(\frac{\rho_0 + x}{\rho_0 - x} \cos \varphi + \sin \varphi \right) - \right. \right.
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$-\sqrt{2V\left(\frac{\rho_0 + x}{\rho_0 - x} \cos \varphi + \sin \varphi\right)^2 + 4V^2 \frac{\rho_0 + x}{x - \rho_0} \left(1 - \frac{\rho_0^2}{(R - \rho_0)^2}\right)} / 2\sqrt{2} \frac{\rho_0 + x}{x - \rho_0}.$$

Інтенсивність швидкостей деформацій за формулою:

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{2\varepsilon_x^2 + \frac{3}{2}\gamma_{xy}^2} \quad (3)$$

На основі отриманих результатів побудовано залежність накопиченої деформації від часу. Накопичену деформацію визначали по формулі:

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

Із врахуванням отриманих формул визначені нормальні і дотичні напруження в кожній області, при обробці латуні Л58.

На підставі експериментальних досліджень нами отримана залежність між твердістю HV, інтенсивністю напружень σ_u і накопиченої деформації e_u , що дозволило, із врахуванням отриманих вище результатів, розрахувати показник напруженого стану та Надаї-Лоде.

Компоненти тензора напружень в даному випадку рівні:

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (5)$$

Отримані значення η , μ_σ , e_u використовували для оцінки величини використаного ресурсу пластичності, який розраховується за критерієм:

$$\psi = \int_0^{e_u} de_u / e_p(\eta, \mu_\sigma). \quad (6)$$

Поверхня граничних деформацій для латуні Л58 апроксимована залежністю:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,60 \exp(0,48\mu_\sigma - 0,59\eta). \quad (7)$$

Оцінку достовірності розроблених математичних моделей здійснено визначенням напружено-деформованого стану методом твердості та величини використаного ресурсу пластичності методом планування експерименту.

У третьому розділі для визначення основних механічних характеристик матеріалу заготовки в даній роботі отримані тарувальний графік HV- σ_u - e_u , діаграма пластичності $e_p(\eta)$ та крива течії $\sigma_u(e_u)$ для сталі 45, X17H13M2T, Л58, АД1.

Для побудови діаграми пластичності при $\eta = 1$ проводили дослідження суцільних циліндричних зразків на розтяг. Для визначення величини граничної деформації при $\eta = 0$ проводили дослідження на кручення. Величину граничної деформації при $\eta = -1$ визначали шляхом осадки суцільних циліндричних зразків.

Отримані діаграми пластичності апроксимували залежністю, запропонованою В. А. Огородніковим

$$e_p(\eta) = e_p(0) \exp(-\lambda \eta), \quad (8)$$

де $\lambda = \ln \frac{e_p(-1)}{e_p(0)}$, $e_p(-1)$, $e_p(0)$ - граничні деформації при $\eta = -1$ і $\eta = 0$, відповідно.

Для сталі 45 $\lambda = \ln \frac{1,1}{0,4} = 1,04$, тому залежність e_p від η буде мати вигляд:

$$e_p(\eta) = 0,4 \exp(-1,01\eta). \quad (9)$$

Отримана крива течії та градувальник графік приведені на рис.3 та 4

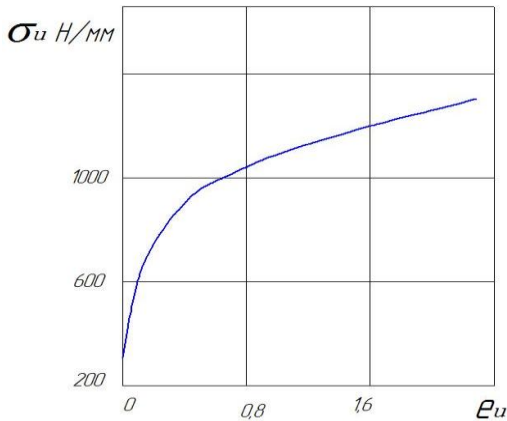


Рисунок 3 - Крива течії для сталі 45

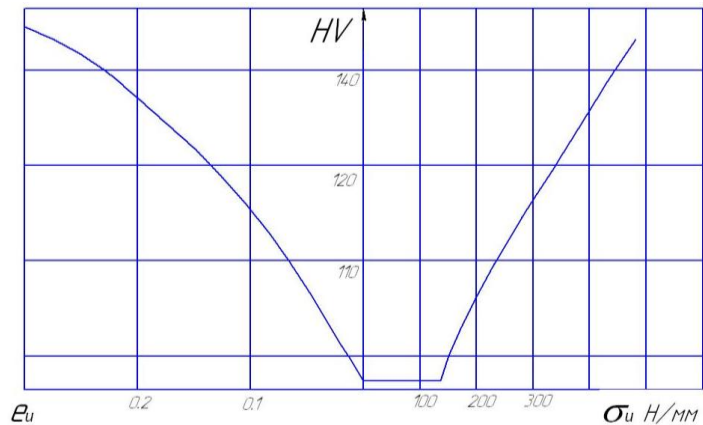


Рисунок 4 - Градувальний графік латуні Л58

При холодній пластичній деформації значення e_p залежать, в основному, від напруженого стану і його зміни в процесі пластичної деформації. Для кількісної оцінки впливу силового поля на e_p при об'ємному напруженому стані необхідно використовувати не менше трьох інваріантних характеристик напруженого стану в якості координат простору, в якому дане поле досліджується. При практичному використанні такого підходу вид траєкторії навантаження залежить не лише від умов формозмінення, а і від механічних характеристик металу, який деформується. Тому нами для дослідження пластичності металів при об'ємному напруженому стані пропонується простір з координатами: показник напруженого стану, параметр Надаї-Лоде і ступінь деформації.

Основна перевага вибору таких координат полягає в тому, що у вибраному трьохмірному просторі вид траєкторії навантаження залежить лише від умов формозмінення і не залежить від фізико-механічних характеристик металу, який деформується. Залежність пластичності даного металу від схеми напруженого стану визначається поверхнею граничних деформацій $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ (рис. 5).

При побудові поверхні $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ необхідно забезпечити умови $\eta = const$, $\mu_\sigma = const$ протягом всього процесу пластичної деформації аж до руйнування. Точки поверхні граничних деформацій, які відповідають значенням $\eta = -1, \mu_\sigma = 1$; $\eta = 0, \mu_\sigma = 0$; $\eta = 1, \mu_\sigma = -1$ отримували в результаті дослідів на

стиск, кручення і розтяг за відомими методиками.

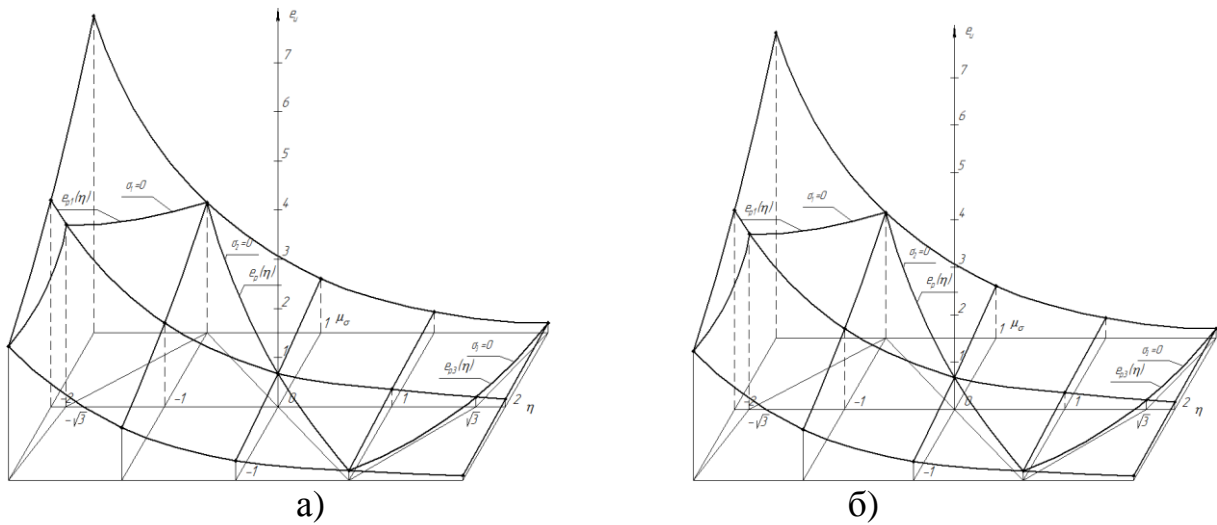


Рисунок 5 - Поверхня граничних деформації для сталі X17H13M2T (а) та АД1 (б)

Для дослідження процесу обкочування виконано ряд експериментів, що дозволили визначити розподіл твердості (рис. 6) по глибині обробленої заготовки та оцінити вплив інших технологічних факторів на процес обкочування.

Із результатів проведених досліджень випливає що, на якість отримуваної заготовки, її характеристики довговічності і зносостійкості впливає цілий ряд параметрів. При збільшенні сили обкочування значно підвищується твердість обробленої поверхні.

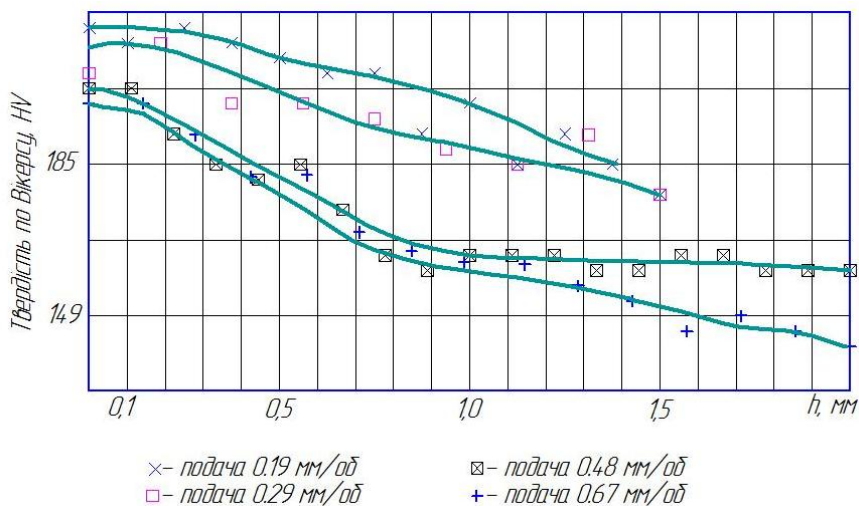


Рисунок 6 - Залежність твердості від відстані від поверхні (Л 58)

При збільшенні поздовжньої подачі зменшується твердість поверхні і дещо збільшується її шорсткість. При збільшенні кількості проходів збільшується твердість, висота мікронерівностей значно знижується після першого проходу, і залишається майже незмінною після декількох наступних ,

а потім знову зменшується. При збільшенні вихідної висоти мікронерівностей зменшується твердість поверхні, але значно знижується отримувана шорсткість. Тобто, на параметри отримуваної поверхні впливає цілий ряд параметрів, які необхідно враховувати в математичній моделі.

У четвертому розділі виконано математичне моделювання, моделювання за допомогою ліній ковзання та МСЕ.

Математичне моделювання показало (рис. 7), що найбільш небезпечною є вершина хвилі, в якій може відбуватися руйнування поверхневого шару. Цей дефект небезпечний тим, що не завжди може бути візуально помічений оскільки ролик при обкочуванні закручує частково дефекти, які можуть проявитися при експлуатації деталі.

Аналіз отриманих методом ліній ковзання результатів показує, що мають місце три зони деформування: у зоні пластичної хвилі відбуваються деформації при несприятливій схемі напруженого стану. В зоні контакту деталі та інструменту ВД відбуваються основні деформації, проте в умовах всестороннього гідростатичного стиску.

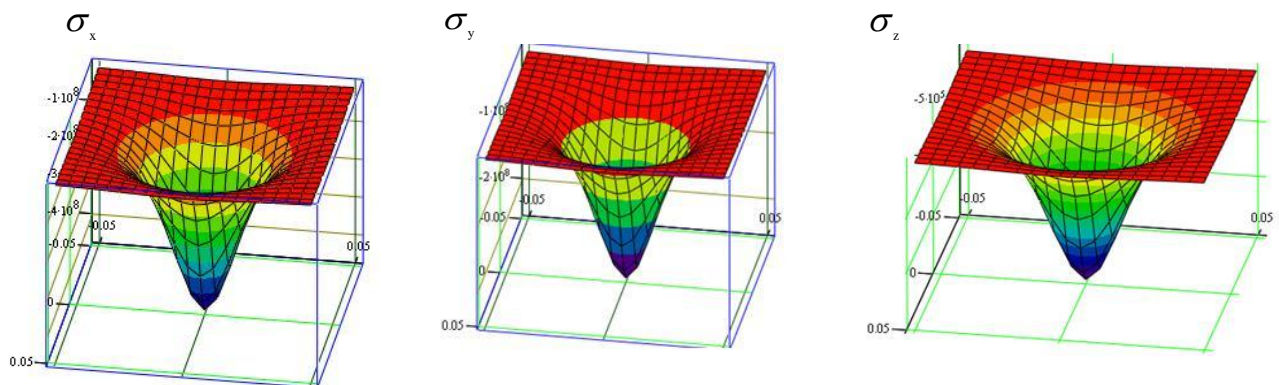


Рисунок 7 - Розподіл σ_x , σ_y , σ_z в зоні контакту ролика при глибині вдавлювання $h = 0,028$ мм

При використанні математичного методу та методу ліній ковзання складно описати процес обкочування тороїдальним роликом. Тому було виконано моделювання процесу обкочування за допомогою МСЕ (рис. 8)

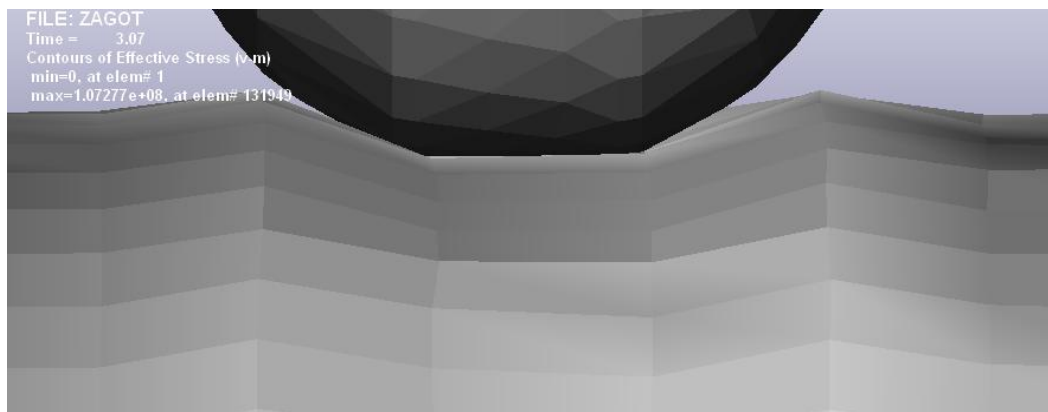


Рисунок 8 - Утворення пластичної хвилі перед роликом та після нього

Побудована геометрична модель та розбита на кінцеві елементи. Змодельовано декілька типів обкочування, та визначено ряд показників, зокрема пластичну деформацію, головні напруження, пластичну деформацію і інші.

У зоні пластичної хвилі показник напруженого стану η в цій зоні змінюється від $\eta = 0,71$ до $\eta = 1,6$, а параметра Надаї – Лоде μ_σ змінюється від $\mu_\sigma = -0,3$ до $\mu_\sigma = -0,4$.

В зоні контакту деталі та інструменту відбувається формування максимальних деформацій. У цій зоні має місце схема всебічного стиснення. При переході частки з першої в другу зону внаслідок інтенсивних деформацій в умовах гідростатичного стиску та немонотонної деформації (рис. 9) можливо заліковування деяких дефектів. Тут має місце відносно значний рівень приросту деформацій, проте зростання пошкодження незначне.

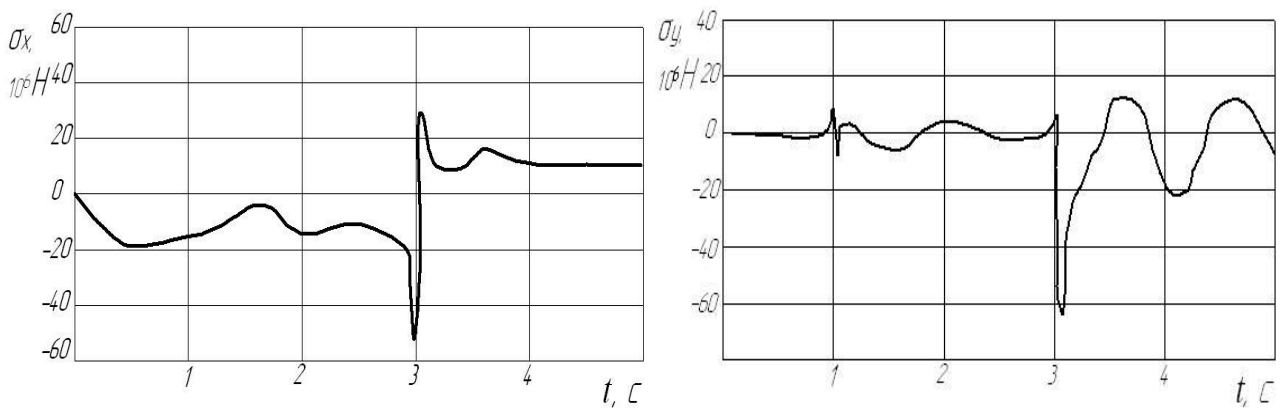


Рисунок 9 - Напруження в процесі обкочування

У якості кількісної характеристики пластичності металу прийнята гранична деформація e_p . При холодній пластичній деформації значення e_p залежить, в основному, від напруженого стану і його зміни в процесі пластичної деформації. Для кількісної оцінки впливу історії навантаження на величину граничної деформації e_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

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \quad (10)$$

де σ_u - інтенсивність напружень, яку визначали за формулою

$$\sigma_u = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2)}, \quad (11)$$

параметр Надаї-Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (12)$$

і ступінь деформації

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (13)$$

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

Отримані в результаті розрахунків залежності показників напруженого стану η і μ_σ 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 підтвердили немонотонність навантаження. Тому величину використаного ресурсу пластичності ψ в поверхневому шарі металу після обкочування розраховували за критерієм [1]:

$$\psi = \sqrt{\psi_{ij} \cdot \psi_{ij}}, \quad (14)$$

де ψ_{ij} - компоненти тензора пошкоджень.

Використання критерію (14) дозволяє врахувати вплив немонотонності деформування на пластичність. Якщо використовувати головні компоненти тензора пошкоджень ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , то величина використаного ресурсу пластичності буде дорівнювати :

$$\psi = \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2}. \quad (15)$$

Компоненти тензора пошкоджень ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 розраховували за формулами:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_1 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \\ \psi_2 &= \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_2 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \\ \psi_3 &= \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_3 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \end{aligned} \quad (16)$$

де

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \\ \beta_2 &= \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\beta_3 = -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}$$

Отримані траєкторії навантаження для точки, в якій величина ψ приймає найбільші значення та поверхня граничних деформацій приведені на рис. 10. Аналіз характеру отриманих траєкторій деформування показує, що немонотонність має місце в обох випадках обкочування, однак при обкочуванні за два проходи в протилежних напрямках, немонотонність виражена значно сильніше.

Для обох випадків траєкторій, що обумовлені різними умовами обкочування розраховано використаний ресурс пластичності ψ за формулою (15). При обкочуванні двічі в одному напрямкові він складає 0,37, при обкочуванні в різних напрямках 0,25, і за таких же умов за один прохід – 0,57. Отримані результати свідчать про те, що при немонотонному деформуванні інтенсивність накопичення пошкоджень зменшується.

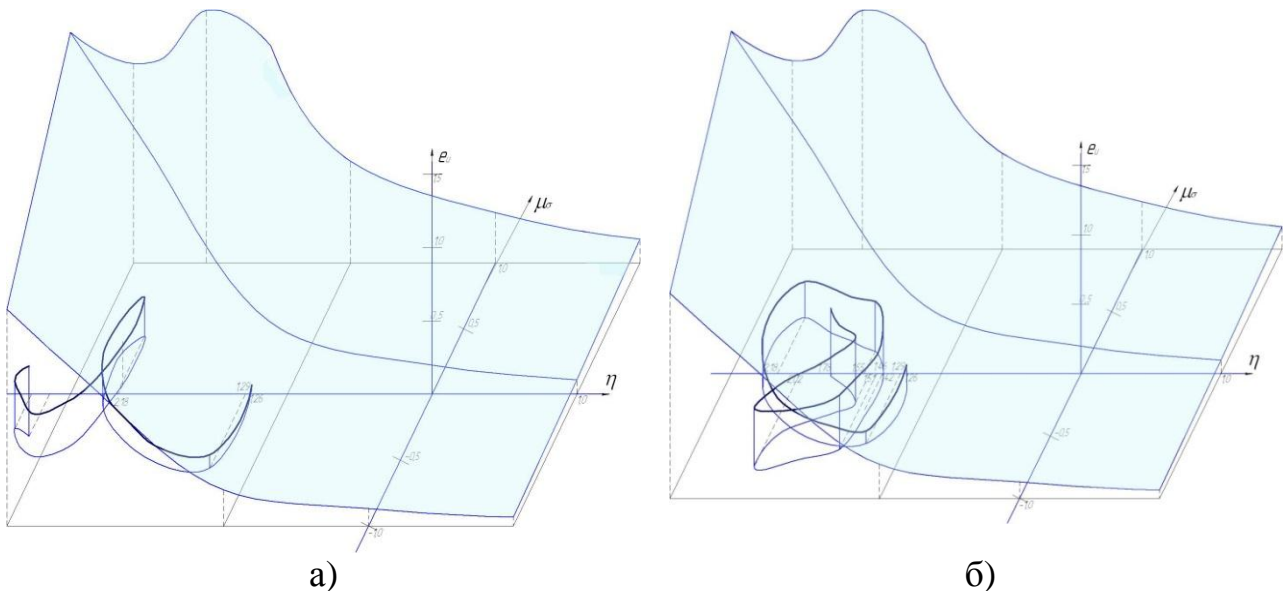


Рисунок 10 - Траєкторія навантаження при обкочуванні двічі в одному напрямі (а) та в різних напрямках (б)

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що немонотонність деформування обумовлена тим, що перед роликом 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.

У п'ятому розділі в результаті виконаних досліджень запропоновано нову конструкцію ролика тороїдальної форми із гвинтовою робочою поверхнею (рис. 11). При обкочуванні таким роликом у двох протилежних напрямках виникає значна немонотонність процесу.

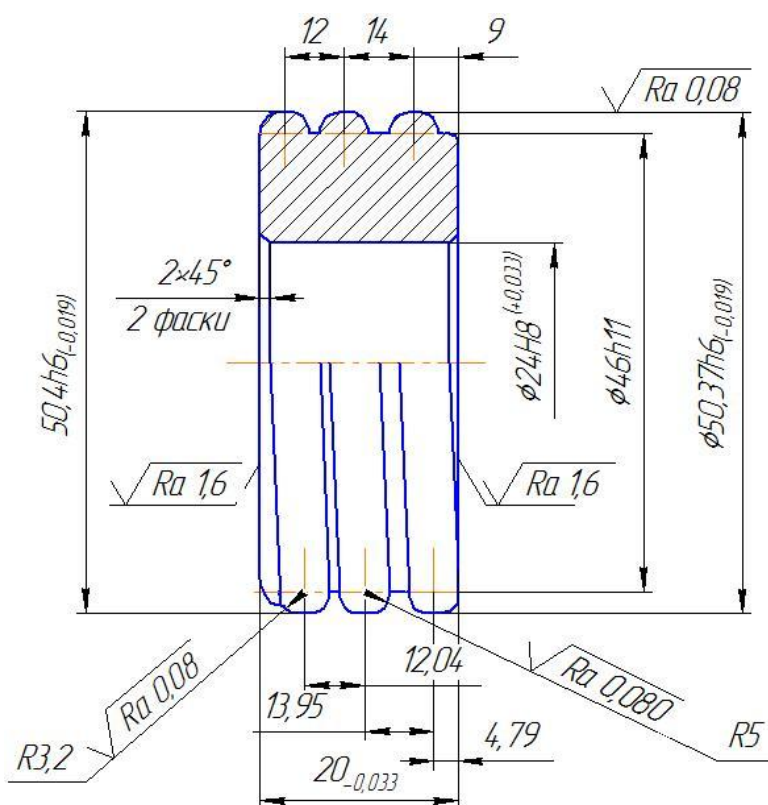


Рисунок 11 - Торіодальний ролик з гвинтовою робочою поверхнею

Для перевірки отриманих результатів після обкочування торіодальним роликом виконано експериментальне дослідження твердості поверхнього шару металу, які приведені в таблиці 1. Стан поверхні після ППД показано на рис. 12.

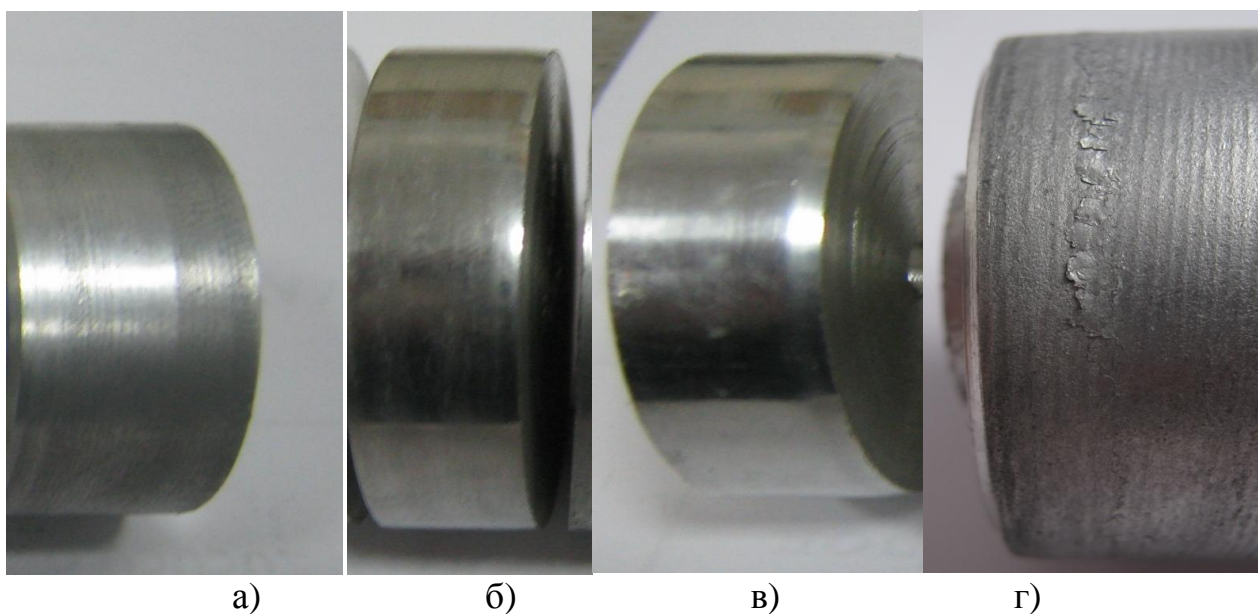


Рисунок 12 – Стан поверхні після різних режимів обкочування

Таблиця 1 – Твердість поверхні після різних режимів обкочування

Вид обробки	Твердість, HV
Вихідна	105
Обкатка інструментом тороїдальної форми за один прохід (рис. 12 а)	125
Обкатка інструментом з гвинтовою робочою поверхнею (рис. 12 б)	148
Обкатка інструментом з гвинтовою робочою за два проходи в протилежних напрямках (рис. 12 в)	180
Обкатка інструментом тороїдальної форми за два проходи в одному напрямку (рис. 12 г)	156

За результатами досліджень було встановлено, що самим оптимальним є режим обробки, при якому використовується інструмент з трьома витками і обкочування виконується одноразово в двох протилежних напрямках. Це тороїдальної форми в два проходи, але в одному напрямі, при досягненні тих же ступеней деформації, на поверхні деталі мало місце руйнування її поверхневого шару. Отримані результати показують перевагу немонотонного деформування, так як в даних випадках, при однаковій ступені деформації поверхневого шару металу, використаний ресурс пластичності в першому випадкові значно менший.

Висновки

У дисертаційній роботі отримано новий розв'язок актуальної науково-технічної задачі: удосконалення технології обкочування роликком на основі розвитку методів розрахунку напружено-деформованого стану і ресурсу пластичності матеріалу при немонотонній деформації та розробки рекомендацій по удосконаленню технології процесу.

Основні наукові положення та практичні результати, отримані в роботі, такі:

1. Розширено та уточнено методики розрахунку напружено-деформованого стану при обкочуванні. Отримані результати можуть бути використані для попереднього вибору діапазону значень геометричних параметрів інструмента.

2. Виконано чисельне моделювання процесу деформування поверхневого шару матеріалу деталей при обкочуванні з використанням МСЕ, в результаті якого встановлено напружено-деформований стан матеріалу в залежності від параметрів обкочування.

3. Визначено напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика з довільною кривизною робочої поверхні в поверхню довільної кривизни. Установлено, що в загальному випадку, коли контур вм'ятини має еліптичну форму, розподіл тиску по поверхні контактної

площини трансформується від еліптичного на пружній стадії деформації до близького рівномірному при розвинутій пластичній деформації в зоні контакту.

4. Вперше запропоновано методику оцінки впливу неоднорідності розподілу пластичних деформацій на пластичність металу з урахуванням комплексного впливу схеми напруженого стану, що дозволило більш точно оцінити вплив параметрів процесу на пластичність металу поверхневого шару при ППД, для осередку деформації якого характерна значна неоднорідність напружено-деформованого стану.

5. Установлено вплив фізико-механічних характеристик матеріалу деталі та геометричних характеристик поверхонь деталі і інструменту на величину використаного ресурсу пластичності і ступінь зміцнення. Отримані залежності можна використати для призначення параметрів процесу зміцнення циліндричних та плоских поверхонь деталей.

6. Показано, що великих пластичних деформацій можна досягти при певних умовах немонотонної поверхневої пластичної деформації. При цьому сильно деформований поверхневий шар металу набуває якісно нових властивостей, більшість із яких мають практичне значення. Завдяки немонотонності пластичної деформації, метал поверхневого шару набуває високої пластичності в поєднанні з великою міцністю. Установлено, що при немонотонній пластичній деформації величина накопиченого ресурсу пластичності, в порівнянні з монотонним деформуванням, зменшується на 35%, при інших рівних умовах.

7. Отримані в роботі результати у вигляді програмних продуктів, конструкції інструмента та технологічних рекомендацій побудови процесу обкочування прийняті до впровадження Барським машинобудівним заводом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. О. В. Сердюк, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков, та Р. І. Сивак, «Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні», *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 54, с. 277 - 281, 2016.

2. О. В. Сердюк, І. О. Сивак і М. А. Карватко, «Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавленні тороїдального ролика», *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 40, с. 251 - 256, 2013.

3. О. В. Сердюк «Моделирование процесса деформирования поверхностного слоя при обкатке цилиндрическим роликом», *Обработка материалов давлением*, №3 (32), с. 15 - 18, 2012.

4. Р. И. Сивак, О. В. Сердюк, и И. О. Сивак, «Влияние немонотонности пластической деформации на напряжённое состояние», *Обработка материалов давлением*, №2 (23), с. 3 - 7, 2010.

5. О. В. Дерібо, О. В. Сердюк, і І. О. Сивак, «Електрогідравлічний стежний привод пристрою для обробки поверхневим пластичним деформуванням», *Вісник ВПІ*, №6, с. 76 - 79, 2010.

6. R. I. Sivak, O. V. Serdiuk, and S. Z. Yablonska, "Evaluation of the metal surface layer plasticity in the process of surface plastic deformation", *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi. Sectia: Stiinta si ingineria materialelor*, Tomul LV (LIX), Fasc. 3, p. 201 - 204, 2009.

7. О. В. Карватко, О. В. Дерибо и В. Т. Ивацко, «Экспериментально-расчетное определение использованного ресурса пластичности в поверхностном слое при обкатке цилиндрическими роликами», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №1 (19), с.211 - 214, 2008.

8. Р. И. Сивак, и О. В. Карватко, «Особенности оценки пластичности металлов при поверхностной пластической деформации», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 93 - 95, 2007.

9. Р. И. Сивак, О. В. Карватко, и В. Т. Ивацко, «Накопление повреждений при поверхностной пластической деформации», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*, №1 (3), с. 18 - 20, 2006.

10. О. В. Сердюк та Т. В. Ярошенко «Ролик для обкочування металевих деталей», Пат. 76462 Україна, МПК В 24 В 39/00 № u 2012 05857, Бюл. №1, заявл. 14.05.2012, опубл. 10.01.2013.

11. О. В. Карватко, И. О. Сивак и И. Г. Савчинский, «Пластичность пористых материалов при поверхностной пластической деформации», на *49-ой МНТК. Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров*, Москва, МГТУ «МАМИ», 23 – 24 марта 2005, с. 42-44.

12. О. В. Сердюк та Л. Г. Козлов, «Система керування пневмоприводом обкочувальної головки», на *XVIII Міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика»*, Вінниця, ВНТУ, 3-6 жовтня 2017, с. 97 - 98.

13. І. О. Сивак, О. В. Сердюк та В. Г. Шевчук, «Дослідження напружено-деформованого стану при поверхневій пластичній деформації», на *II Міжнародній науково-технічній конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування»*, Вінниця, ВНТУ, 15 - 16 листопада 2016, с. 218-220

14. О. В. Сердюк, І. О. Сивак та В. В. Савуляк, «Напружено-деформований стан в осередку деформації при втисканні тороїдального ролика», на *4-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій»*, Львів, НУ «Львівська політехніка», 30 - 31 жовтня 2014, с. 48-49.

15. О. В. Сердюк, «Поверхностное пластическое деформирование инструментом с рабочей поверхностью наклоненной к оси вращения инструмента», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском та авто технічних експертиз»*, Вінниця, ВНТУ, 30 травня - 2 червня 2011, с.214-215.

16. О. В. Карватко, «Експериментальне дослідження процесу обкатки роликом», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Застосування*

теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах», Вінниця, ВНТУ, 29 травня-1 червня 2006, с. 126 - 128.

17. В. Т. Ивацко, О. В. Карватко, Р. С. Драганюк та В. А. Пересунько, «Определение накопленной деформации поверхностного слоя при поверхностном пластическом деформировании», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах»,* Вінниця, ВНТУ, 29 травня-1 червня 2006, с. 104 - 106.

АНОТАЦІЯ

Сердюк О.В. Удосконалення технології обкочування роликом із застосуванням теорії деформовності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 - процеси та машини обробки тиском. – Вінницький національний технічний університет, Міністерство освіти і науки України, Вінниця, 2019.

Дисертацію присвячено науковій задачі дослідження особливостей формоутворення при обкочуванні заготовки роликом і розробці рекомендацій з вибору раціональних технологічних параметрів процесу.

На основі методів прикладної теорії деформовності одержали подальший розвиток математичні моделі напружено-деформованого стану процесів обкочування роликом. Комп'ютерне моделювання за допомогою методу скінченних елементів дало можливість виконати аналіз особливостей пластичної деформації при обкочуванні. Установлено залежність величини використаного ресурсу пластичності від геометричних параметрів інструменту та особливостей процесу обкочування.

Отримано методику розрахунку використаного ресурсу пластичності при обкочуванні роликом із врахуванням немонотонного навантаження. Установлено, що при немонотонній пластичній деформації величина накопиченого ресурсу пластичності, в порівнянні з монотонним деформуванням, зменшується на 35%, при інших рівних умовах.

Достовірність отриманих теоретичних рішень підтверджена результатами експериментальних досліджень.

Розроблена конструкція інструменту для обкочування роликом та рекомендації із побудови технологічного процесу обкочування.

Ключові слова: напруження, деформації, пластичність, обкочування роликом, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

ABSTRACT

Serduk O.V. Improvement of technology of the rolling of rolls with the application of the theory of plasticity. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of Science in Technical Science in the Specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Vinnitsa National Technical University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnitsa, 2019.

Dissertation is devoted to the scientific study of the problem of forming when deformation workpiece of roller and develop recommendations for the rational process parameters.

On the basis of methods of the applied theory of plasticity the mathematical models of the tensely deformed state of processes of the deformation of roller. A computer design by the method of complete elements enabled to execute the analysis of features of deformation of roller. Dependence of size of the utilized resource of plasticity is set on the geometrical parameters of instrument and features of the grinding process.

The method of calculation of the used plasticity resource during rolling with a roller taking into account the nonmonotonic load. It was established that when nonmonotonic plastic deformation the value of the accumulated resource of plasticity, in comparison with monotonic deformation, is reduced by 35%, under other equal conditions

The reliability of the theoretical solutions obtained confirmed the results of experimental studies.

The design of the tool for rolled up the roller and recommendations for the construction of the process of landslide are developed.

Keywords: stress, deformations, plasticity, deformation of roller, the stress-strain state, the finite element method.

АННОТАЦИЯ

Сердюк О.В. Усовершенствование технологи обкатки роликом с применением теории деформируемости. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 - процессы и машины обработки давлением. – Винницкий национальный технический университет, Министерство образования и науки Украины, Винница, 2019.

Диссертационная работа посвящена научной задаче исследования особенностей формообразования при обкатке заготовки роликом и разработке рекомендаций по выбору рациональных технологических параметров процесса.

Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния обкатки заготовки роликом, с использованием методов линий скольжения и учетом немонотонности процесса.

Выполнено численное моделирование процесса деформирования поверхностного слоя материала деталей при обкатывании с использованием МКЭ, в результате которого установлено напряженно-деформированное состояние материала в зависимости от параметров обкочувания

Впервые предложена методика оценки влияния неоднородности

распределения пластических деформаций на пластичность металла с учетом комплексного воздействия схемы напряженного состояния, что позволило более точно оценить влияние параметров процесса на пластичность металла поверхностного слоя при ППД, при деформации которого характерна значительная неоднородность напряженно-деформированного состояния.

Анализ напряженно-деформированного состояния металла при обкатке винтовым роликом выполнен методами трехмерного математического моделирования с использованием метода конечных элементов, что позволило учесть немонотонность процесса. Установлено, что при немонотонной пластической деформации величина накопленного ресурса пластичности, по сравнению с монотонным деформированием, уменьшается на 35%, при прочих равных условиях.

Установлено влияние физико-механических характеристик материала детали и геометрических характеристик поверхностей детали и инструмента на величину использованного ресурса пластичности и степень укрепления. Полученные зависимости можно использовать для назначения параметров процесса укрепления цилиндрических и плоских поверхностей деталей.

В результате выполненных исследований предложена новая конструкция ролика тороидальной формы с винтовой рабочей поверхностью. При обкатывании таким роликом в двух противоположных направлениях возникает значительная немонотонность процесса. Полученные результаты показывают преимущество немонотонного деформирования, так как при использовании ролика с винтовой рабочей поверхностью и обработке в двух противоположных направлениях, использованный ресурс пластичности значительно меньше, чем при обработке роликом за два прохода (при одинаковой степени деформации поверхностного слоя металла).

Достоверность полученных теоретических решений подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Результаты работы в виде программных средств, а также конструкторских и технологических рекомендаций приняты к внедрению Барским машиностроительным заводом.

Ключевые слова: напряжения, деформации, пластичность, обкатка роликом, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

Підписано до друку 16.01.19 р. Формат 29.7×42¹/₄
Наклад 100 прим. Зам. № 2018-009.
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.