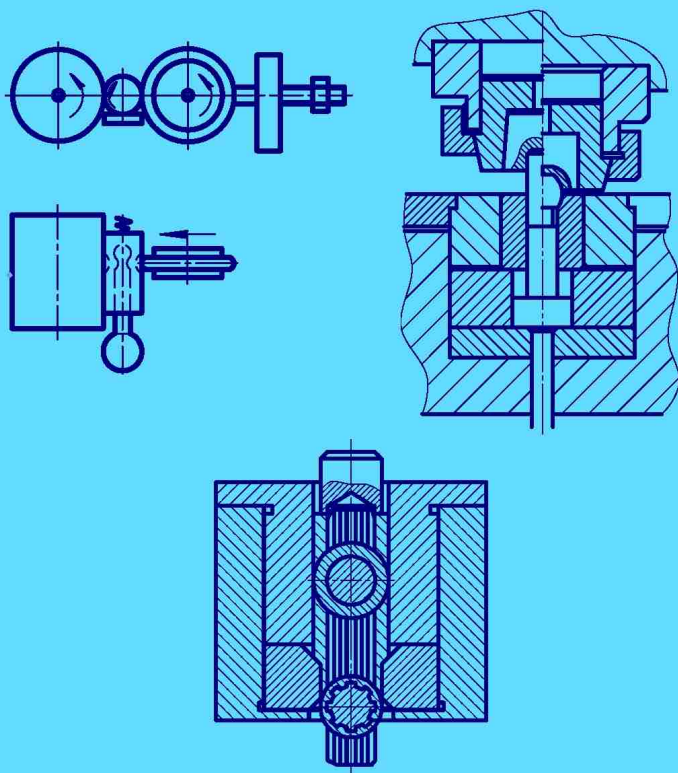


В. А. ОГОРОДНІКОВ, В. І. МУЗИЧУК,  
О. В. НАХАЙЧУК

**МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ  
ХОЛОДНОГО ФОРМОЗМІНЮВАННЯ  
З ОДНОТИПНИМИ СХЕМАМИ  
МЕХАНІЗМУ ДЕФОРМАЦІЇ**



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

В. А. ОГОРОДНІКОВ, В. І. МУЗИЧУК,  
О. В. НАХАЙЧУК

**МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ  
ХОЛОДНОГО ФОРМОЗМІНЮВАННЯ  
З ОДНОТИПНИМИ СХЕМАМИ  
МЕХАНІЗМУ ДЕФОРМАЦІЇ**

Монографія

УНІВЕРСУМ-Вінниця  
2007

УДК 621.774: 621.919

О 39

*Рецензенти:*

**І. С. Алієв**, доктор технічних наук, професор

**І. О. Сивак**, доктор технічних наук, професор

**В. Ф. Анісімов**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 25.01.2007 р.)

**Огородніков В. А., Музичук В. І., Нахайчук О. В.**

О 39 Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 179 с.

ISBN 978-966-641-217-4

Монографія присвячена дослідженню і удосконаленню технологічних процесів: заочування поршня із шатуном аксіально-роторного поршневого насоса, висадження сферичної головки шатуна, формування внутрішніх шліцевих профілів у трубних заготовках методом обтиснення на профільних оправках (метод “охоплюючого” протягування), які поєднують однотипні схеми механізму деформації (деформації стиску і деформації розтягу), а також спосіб формоутворення – холодне пластичне деформування.

Для інженерно-технічних і наукових працівників, що займаються обробкою металів тиском, викладачів, аспірантів і студентів.

**УДК 621.774: 621.919**

ISBN 978-966-641-217-4

© В. Огородніков, В. Музичук, О. Нахайчук, 2007

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ З ОДНОТИПНИМИ СХЕМАМИ МЕХАНІЗМУ ДЕФОРМАЦІЇ... 9	9
1.1. Процеси обкочування труб холодного розкочування прецизійних заготовок і кільцевих деталей.....	9
1.2. Деформуємість заготовок в процесах обробки металів тиском.....	12
1.2.1. Діаграми пластичності.....	13
1.2.2. Критерії деформуємість.....	17
1.2.3. Оцінка деформуємість заготовок за допомогою критеріїв деформуємість.....	19
1.3. Технологічний процес заковування поршня із шатуном аксіально-роторного поршневого насоса.....	20
1.3.1. Технологічний процес заковування пари поршень- шатуни.....	20
1.3.2. Напружено-деформований стан при заковуванні пари поршень-шатуни аксіально-роторного поршневого насоса.....	25
1.4. Холодне об'ємне висадження сферичних заготовок.....	29
1.5. Нові процеси обробки тиском з механізмом деформацій: деформації стиску і деформація розтягу.....	30
1.6. Відновлення пластичності відпалом після холодної деформації.....	34
2. ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПАСПОРТА МАТЕРІАЛУ ПРИ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ТИСКОМ.....	37
2.1. Експериментальна механіка машин.....	37
2.1.1. Побудова кривих течії досліджуваних сталей.....	38
2.1.2. Побудова діаграм пластичності досліджуваних сталей.....	56
2.1.3. Градувальні графіки: твердість – інтенсивність напружень – інтенсивність деформацій.....	67
2.2. Криві Баушингера.....	74
2.2.1. Фізична сутність ефекту Баушингера.....	74
2.2.2. Побудова кривих течії матеріалів.....	77
2.2.3. Визначення параметра $\beta$ , що характеризує ефект Баушингера.....	79
2.3. Метод твердості.....	82
2.4. Технологічні функції матеріалу.....	90

3. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН У ПРОЦЕСАХ ЗАКОЧУВАННЯ ПОРШНЯ ІЗ ШАТУНОМ І ВИСАДЖЕННЯ СФЕРИЧНОЇ ГОЛОВКИ ШАТУНА.....	92
3.1. Напружений стан при закочуванні поршня із шатуном аксіально-роторного поршневого насоса.....	92
3.1.1. Механіка обкочування труб.....	92
3.1.2. Аналітична методика оцінки напружено-деформованого стану в процесі закочування поршня із шатуном у припущенні про плоский напружений стан.....	93
3.1.3. Аналіз результатів розрахунку напружено-деформованого стану та дослідження деформуємості заготовки.....	97
3.2. Кінематика деформування при закочуванні поршня із шатуном аксіально-роторного поршневого насоса.....	106
3.2.1. Методики розрахунку деформованого стану і результати вимірювання елементів подільної сітки на внутрішніх поверхнях поршнів з різними параметрами закочування.....	106
3.2.2. Аналіз деформованого стану на різних стадіях закочування поршня із шатуном.....	117
3.2.3. Вплив властивостей матеріалу на кінематику течії... ..	118
3.3. Напружено-деформований стан при холодному висадженні сферичної головки шатуна.....	123
3.3.1. Постановка задачі.....	123
3.3.2. Експериментальні дослідження.....	125
3.3.3. Напружено-деформований стан при холодному висадженні сферичної головки шатуна.....	127
3.4. Деформуємість заготовки шатуна при висадженні.....	132
3.5. Питомі навантаження на штампове оснащення при холодному висадженні головки шатуна.....	137
4. МЕХАНІКА ФОРМУВАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ШЛІЦЬОВОГО ПРОФІЛЮ НА ОПРАВЦІ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ.....	140
4.1. Поетапне формування заготовки.....	140
4.2. Дослідження впливу проміжних відпалів на відновлення запасу пластичності.....	148
4.3. Математична модель процесу з застосуванням теорії пластичності і теорії деформуємості.....	152
4.3.1. Метод розрахунку напружено-деформованого стану на стадіях формування шліцьового профілю.....	152
4.3.2. Ресурс пластичності металу при формуванні внутрішнього шліцьового профілю.....	158

5. ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	161
5.1. Рекомендації з усунення бракувальних ознак процесу заочування пари поршень-шатун аксіально-роторного поршневого насоса.....	161
5.2. Технологічна операція холодного об'ємного висадження сферичної головки шатуна аксіально-роторного поршневого насоса.....	164
5.3. Рекомендації з удосконалення технологічного процесу формування внутрішнього шліцьового профілю.....	165
5.4. Промислове впровадження результатів досліджень.....	166
ВИСНОВОК.....	167
ЛІТЕРАТУРА.....	168

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $\sigma$  – гідростатичний тиск  
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні напруження  
 $\sigma_{0,2}$  – границя текучості  
 $\sigma_{пр}$  – границя пружності  
 $\sigma_{пц}$  – границя пропорційності  
 $\sigma_{мц}$  – границя міцності  
 $\sigma_u$  – інтенсивність напружень  
 $\sigma_n, \tau_n$  – контактні напруження  
 $\sigma_p, \sigma_m, \sigma_\theta$  – головні напруження в меридіональній площині  
 $e_u$  – інтенсивність деформації  
 $e_p$  – накопичена інтенсивність деформації до моменту руйнування (гранична деформація)  
 $e_1, e_2, e_3$  – головні логарифмічні деформації  
 $e_\phi, e_m, e_r$  – тангенціальна, меридіональна і радіальна деформації  
 $e_p, e_m, e_\theta$  – головні деформації в меридіональній площині  
 $\bar{e}_u$  – накопичена інтенсивність деформації  
 $I_1(T_\sigma), I_2(T_\sigma), I_3(T_\sigma)$  – інваріанти тензора напружень  
 $I_1(D_\sigma), I_2(D_\sigma), I_3(D_\sigma)$  – інваріанти девіатора напружень  
 $\Psi$  – використаний ресурс пластичності  
 $\psi_{ш}$  – відносне залишкове звуження  
 $\delta$  – відносне залишкове подовження  
 $\eta$  – показник напруженого стану  
 $\mu_\sigma$  – параметр Надаї-Лоде  
 $\beta$  – параметр, який характеризує ефект Баушингера  
 $W$  – параметр функції Гауса  
 $G$  – січний модуль пластичності  
 $\&_{ii}$  – інтенсивність швидкостей деформації  
 $\lambda$  – коефіцієнт чутливості пластичності до зміни схеми напруженого стану  
 $m$  – параметр заочування  
 $P$  – тиск інструмента на заготовку  
 $S_1, S_2, S_3$  – компоненти девіатора напружень  
 $\mathcal{E}_k, I_k$  – головні компоненти тензора деформацій Сйлерова і Логранжева

## ВСТУП

Тенденції розвитку сучасного машинобудування спрямовані головним чином на ресурсозбереження і підвищення якості одержуваних виробів.

Процеси холодного об'ємного штампування заготовок складного профілю відповідають зазначеним тенденціям, однак у теперішній час більше уваги приділяється енергосиловим параметрам процесу, а питанням забезпечення якості виробів і пов'язаних з нею параметрам деформуємі і технологічній спадковості заготовок приділяється недостатньо уваги. Тому поряд з відомими теоріями і розрахунково-експериментальними методами є необхідність застосовувати нові підходи для розв'язання різних прикладних задач, та досліджень на якісно новому рівні процесів течії металів в умовах складного навантаження.

Формоутворення заготовок різних профілів супроводжується накопиченням макропошкоджень металу в процесі його деформування, несприятливою технологічною спадковістю, втратою точності геометричних розмірів, втратою стійкості пластичного деформування. Втрата стійкості пластичного деформування більш характерна для обробки листових матеріалів. Руйнування при обробці масивних тіл найчастіше відбувається внаслідок недостатньої для реалізації цієї технологічної операції пластичності. Надалі розглядається саме цей випадок.

З метою зменшення зазначених вище бракувальних ознак необхідне глибоке вивчення процесів холодного пластичного формозмінування з залученням методів механіки твердого деформуємого тіла, математичної і прикладної теорій пластичності, а також феноменологічної теорії деформуємі що розвивається в останні роки.

Застосування теорії деформуємі для процесів обробки металів тиском дозволяє розв'язувати задачі формування якості виробів. Оцінка використаного ресурсу пластичності, реалізованого за операцію, важлива для з'ясування можливості виконання подальших операцій, оскільки властивості матеріалу залежать від величини накопиченої деформації.

Для оцінки деформуємі заготовок необхідна інформація про напружено-деформований стан на zdeформованій частині заготовки, а також механічні характеристики досліджуваних матеріалів у вигляді певних функцій, що формують "паспорт" матеріалу. При формуванні таких функцій усе ще залишаються невирішеними проблеми надійної



побудови кривої течії матеріалу в області великих пластичних деформацій, побудови діаграм пластичності в області “жорстких” схем напруженого стану.

Задачі вдосконалювання технологій виготовлення деталей способами холодного об’ємного штампування можуть розв’язуватися експериментально-розрахунковими методами, які дозволяють враховувати зміцнення металу, вид напруженого стану, історію деформування.

Сучасні технологічні процеси обробки тиском супроводжуються формоутворенням заготовок, при яких течія металу є нестационарною, відбувається зміна знаків деформації (виявляється ефект Баушингера), деяким технологічним процесам необхідна термообробка.

Оскільки на якість виробу впливають безліч факторів, таких як ступінь деформації, історія деформування, вид напруженого стану, кількість проміжних відпалів і ін., то в нашій роботі, як найбільш вагомий показник, що впливає на якість виробів, був прийнятий використаний ресурс пластичності  $\Psi$ , який на кожен етап операції накладає відповідні обмеження. Такими обмеженнями можуть бути ступінь обтиснення за один робочий хід, для розглянутого в даній роботі процесу одержання внутрішнього шліцьового профілю, поздовжня подача ролика при реалізації процесу заочухування пари поршень-шатун аксіально-роторного поршневого насоса.

Розглянуті в даній монографії технологічні процеси: заочухування пари поршень-шатун аксіально-роторного поршневого насоса, “охоплюючого” протягування, за допомогою якого формують внутрішній шліцьовий профіль карданного вала дизель-потяга, холодне висадження сферичних стовщень шатуна поєднують однотипні схеми механізму деформації (деформації стиску і деформація розтягу).

Однотипність схем механізму деформації зазначених вище процесів дає можливість їх удосконалення на основі феноменологічної теорії деформуємі. В теорії деформуємі використовують критерії деформуємі, в основу яких застосовуються обмеження, що накладаються на деформації, граничні значення яких залежать від показників напруженого стану. Величина цих показників може бути виражена через співвідношення деформацій (швидкостей деформацій), тому однотипність розглянутих процесів полегшує оцінку ресурсу пластичності в небезпечних областях деформування.

# 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ З ОДНОТИПНИМИ СХЕМАМИ МЕХАНІЗМУ ДЕФОРМАЦІЇ

## 1.1. Процеси обкочування труб, холодного розкочування прецизійних заготовок і кільцевих деталей

Технологічні процеси обкочування труб [33, 34], холодного розкочування прецизійних заготовок і кільцевих деталей [5, 6], заковчування пари поршень-шатун аксіально-роторного поршневого насоса являють собою різновид обробки металів тиском і містять зміни форми заготовок відповідно до необхідних обрисів виробу шляхом періодичного обтиснення робочими органами, що здійснюють відносно осі заготовки радіальний обертальний рух. Заготовка при цьому може залишатися нерухомою, або робити обертальний рух.

За допомогою технологічного процесу обкочування труб, розкочування заготовок одержують різні порожні осесиметричні металовироби. Зазначені процеси поєднують механізм деформації, а саме: у них реалізується дві деформації стиску і одна – розтягу. Така механічна схема деформації створює сприятливі умови для пластичної деформації, тому що утруднюються міжкристалічні зсуви, що призводять до порушення механічних зв'язків, і пластична деформація протікає в основному за рахунок внутрішньокристалічних зсувів.

Обкочування – це швидкісний високоточний метод виготовлення деталей постійного і змінного поперечного перерізу з простих вихідних заготовок.

Процес обкочування зводиться до пластичної зміни форми шляхом переміщення часток металу. При цьому відбувається зменшення поперечного перерізу і відповідного йому подовження заготовки за рахунок переміщення металу вздовж осі в двох протилежних напрямках. Застосування обкочування в якості методу обробки можливе для матеріалів, що піддаються не тільки значній пластичній деформації, але і мають крихкість. В якості заготовок застосовують холоднотягнуту чи калібровану сталь. При обкочуванні зберігається об'єм, збільшується міцність металу, у той же час, як при механічній обробці металів різанням відбувається зменшення початкового об'єму, а також погіршення вихідної якості металу через перерізання волокон.

Холодна деформація, що відбувається при обкочуванні, у значній мірі впливає на зміну фізико-механічних властивостей металу. Усі показники опору деформації збільшуються. Це пояснюється зміцненням, що підвищує опір зсуву, а отже, підвищує всі механічні характеристики.

Велике практичне значення має характер зміни механічних характеристик у залежності від ступеня обкочування

$$q = \frac{A_0 - A}{A_0} = \frac{d^2 - d_1^2}{d^2} \quad (1.1)$$

Межа зміцнення для вуглецевих сталей, підданих обкочуванню, як показують експериментальні дослідження, настає при ступенях деформації 40-50%. При цьому твердість зростає по всьому перерізу нерівномірно. Більш рівномірний розподіл твердості спостерігається при ступені деформації  $q=45-50\%$ , і менш при  $q=10-30\%$  і  $q=65-80\%$ . При  $q=45\%$  значення твердості в центрі перерізу менше, ніж у поверхневих шарів. При  $q=50\%$  значення твердості в центральних шарах близько до твердості поверхневих шарів. При такому ступені обкочування твердість по перерізу зразка розподілена найбільш рівномірно, її значення визначають середній опір металу пластичної деформації на невеликих ділянках.

При обкочуванні необхідно прагнути до одержання мінімальної неоднорідності деформації, оскільки градієнт деформації підвищує середнє питоме зусилля і знижує пластичність, що може привести до передчасного руйнування і створює в деформованому виробі залишкові напруження.

Відмітимо, що оцінка деформуємості заготовок при обкочуванні практично не здійснювалася, що викликає необхідність дослідження цього параметра якості заготовок.

Ефективним способом одержання осесиметричних виробів із трубчастих заготовок є обкочування інструментом тертя, коли від його зусилля деформування передається до деформованого металу в процесі ковзання металу відносно інструмента [34]. Обкочування інструментом тертя відрізняється від обкочування роликком тим, що весь процес деформації аж до змикання стінок заготовки здійснюється за один прохід інструмента.

На рис. 1.1 представлені схеми обкочування трубчастих заготовок інструментом тертя. Усі ці схеми реалізовані в окремих конструкціях обкочувальних машин.

Обкочування (рис. 1.1, *a*) застосовують у виробництві безшовних газових балонів: трубчастій заготовці 1 з нагрітим до кувальної температури кінцем надають обертання навколо своєї осі  $\theta - \theta$ ; одночасно інструменту 2 – поворот на  $90^\circ$  навколо осі, перпендикулярної до осі заготовки. Створюваний локальний тиск інструмента на метал забезпечує деформацію заготовки до заданого інструментом профілю. Деформація відбувається в процесі тертя – ковзання між інструментом і заготовкою.

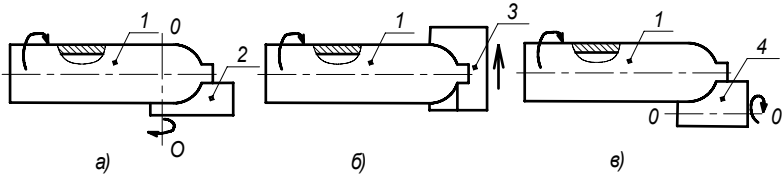


Рис. 1.1. Схема обкочування трубчастих заготовок:  
 1 - заготовка;  
 2 - 4 – інструменти.

Обкочування (рис. 1.1, б) легко здійснюється на верстатах токарської групи, що полягає в наступному: трубчастій заготовці, кінець якої нагрівають до температури кування, повідомляють обертальний рух навколо своєї осі. Одночасно інструменту 3 надають поступальне переміщення в напрямку, перпендикулярному осі обертання заготовки, завдяки чому заготовка деформується до заданої форми.

Обкочування (рис. 1.1, в) здійснюють поворотом інструмента 4 на  $360^\circ$  щодо осі  $\theta - \theta$ , рівнобіжної осі обертання заготовки.

Кожна з приведених і можливих кінематичних схем процесу обкочування має свої особливості, що враховують при розробці технологічних процесів і проектуванні устаткування.

В даний час розроблені і застосовуються в промисловості обкочування з різними варіантами взаємного переміщення інструмента і заготовки, що значно розширює її технологічні можливості (рис. 1.2).

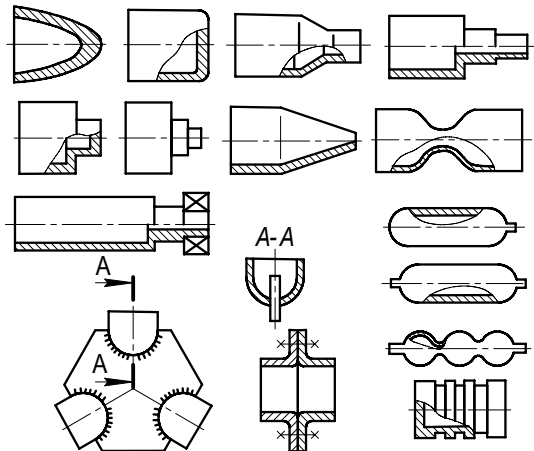


Рис. 1.2. Осесиметричні деталі і вироби, одержані обкочуванням труб

Інструмент у всіх випадках калібрований так, що при заданому переміщенні відносно трубчастої заготовки, що обертається, його переріз при плавному переході відповідає заданим формам утворюючих обкоувальної заготовки.

## **1.2. Деформуємість заготовок в процесах обробки металів тиском**

Реалізація сучасних технологій, що супроводжуються операціями, у яких здійснюється течія металів із складною реологією в умовах складного навантаження неможлива без науково-обґрунтованих параметрів процесу, що забезпечують якість виробів. Поява нових методів обробки тиском стримується рядом проблем: втратою стійкості пластичного деформування, руйнуванням металу заготовок у процесі їх формозміни, ростом зерен металу після термообробки.

Перераховані проблеми можуть бути вирішені за допомогою феноменологічної теорії деформуємість металів без руйнування, яка дістала розвиток в кінці минулого сторіччя, що дозволяє оцінювати граничну формозміну, використаний запас пластичності, граничну до руйнування деформацію, а також прогнозувати технологічну спадковість (залишкову пластичність виробу, розміри зерна після холодної пластичної деформації і наступної термообробки та інші фактори).

Основи феноменологічної теорії деформуємість металів закладені в працях С.І. Губкіна [16, 17], Л.Д. Соколова [102], Г.А. Смірнова-Аляєва [99, 101]. Подальший розвиток вона отримала в роботах В.Л. Колмогорова [37, 38, 39], Г.Д. Деля [20, 21, 24], В.А. Огороднікова [65], В.А. Скуднова [94], Е.М. Макушка [46], С.М. Красневського [41], І.О. Сивака [92], В.М. Михалевича [51], М.Б. Штерна [125], Я.Є. Бейгельзімера [2].

Методи оцінки деформуємість заготовок в процесі обробки їх тиском здобувають зростаючого значення в зв'язку з автоматизацією і оптимізацією технологічних процесів, а також використанням у виробництві металів для деформуємість яких потрібні великі зусилля. Протягом тривалого часу при вивченні технологічних процесів зусилля фахівців направлялися, в основному, на оцінку енергосилових параметрів. Цей напрямок знайшов відображення в роботах Є.П. Ункова [115], А.Д. Томльонова [113], І.Я. Гарновського [109], Є.Н. Попова [84], Ю.Є. Шамаріна [123], С.О. Скрябіна [93] і ін. Однак останнім часом інформації про енергосилові параметри технологічних процесів виявляється недостатньо для їх оптимізації. Особливого значення набувають методи оцінки деформуємість металів, що одержали розвиток у роботах вчених, перерахованих вище. Однак недостатність експери-

ментальних даних про пластичність металів при різних умовах деформування знижує вірогідність результатів, одержуваних цими методами і утрудняє оцінку деформуєності металів при обробці тиском. В особливій мірі це відноситься до розглянутих нами в параграфі 1.1 процесів розкочування, накочування, заочування поршня із шатуном аксіально-роторного поршневого насоса.

Крім відсутності даних про залежність пластичності металів, з яких виготовляються шатун і поршень, показників напруженого стану, при реалізації зазначених операцій немає також даних про напружено-деформований стан zdeформованої частини заготовки, де висока імовірність вичерпання ресурсу пластичності.

У розглянутому надалі технологічному процесі формування внутрішнього шліцьового профілю на оправці методом холодного пластичного деформування також відсутні науково-обґрунтовані параметри процесу, що забезпечують запас пластичності деформуєних заготовок і якість виробу.

Викладемо сутність теорії деформуєності, елементи якої будуть використані в монографії.

### 1.2.1. Діаграми пластичності

Під пластичністю розуміється здатність матеріалу до формозміни без руйнування у вигляді макроскопічного порушення суцільності. Мірою пластичності є ступінь деформації, накопичена матеріалом до моменту руйнування (гранична деформація). В якості міри пластичності прийемо визначений А.А. Ільюшиним [32] і Г.А. Смірновим-Аляєвим [98] параметр:

$$e_p = \int_0^{\tau_p} \frac{\tau}{\sigma} d\tau. \quad (1.2)$$

При простому навантаженні і відсутності повороту головних осей деформації накопичена інтенсивність деформації  $\bar{e}_u$  дорівнює інтенсивності деформації:

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_1 - e_3)^2}. \quad (1.3)$$

Накопичена інтенсивність деформацій -  $\bar{e}_u$  в умовах складного навантаження – це довжина дуги в просторі головних деформацій, що характеризує траєкторію деформування, а інтенсивність деформацій – довжина хорди.

Гранична деформація  $e_p$  в холодних процесах деформування залежить від показників напруженого стану, що характеризують “жо-

ресткість” або “м'якість” схеми напруженого стану. Показники напруженого стану характеризуються інваріантами тензора або девіатора напружень.

Так найбільш широко застосований в даний час показник  $\eta$  характеризується відношенням першого інваріанта тензора напружень до другого інваріанта девіатора напружень:

$$\eta = \frac{I_1(T\sigma)}{\sqrt{3}I_2(D\sigma)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}\sigma_u}. \quad (1.4)$$

Цей показник враховує гідростатичний тиск, який істотно впливає на пластичність, а також девіаторну частину тензора, тобто зсуву. Показник у вигляді (1.4) використовували у своїх роботах Г. Д. Дель [24], Г. А. Смірнов-Аляєв [99], В. А. Бабичков [1], В. А. Огородніков [65], І. О. Сивак [92] і ін.

В. Л. Колмогоров використовував цей показник у вигляді

$$\kappa = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3T} \frac{\eta}{\sqrt{3}}, \quad (1.5)$$

де  $T$  – інтенсивність дотичних напружень

$$T = \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}}. \quad (1.6)$$

Залежність граничної деформації  $e_p$  від показника  $\eta$  називають діаграмою пластичності. Методики їхньої побудови викладені в роботах [21, 39, 65, 67, 73, 96, 99], однак зупинимося на деяких з них.

При розтягу  $\sigma_1 = \sigma_{\text{пост.}}$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , тому показник  $\eta = 1$ , а гранична деформація визначається із співвідношення

$$e_p = 2 \ln \frac{d_0}{d}, \quad (1.7)$$

де  $d_0$  – діаметр робочої частини зразка до деформування,  $d$  – діаметр після руйнування тієї частини зразка, де мала місце рівномірна деформація.

При розтягу зразків з матеріалів, руйнуванню яких передують утворення шийки, показник  $\eta$  розраховують за формулою Н. Н. Давиденкова і Н. І. Спирідонової [18]:

$$\eta = 1 + \frac{3d}{4R}, \quad (1.8)$$

де  $d$  – діаметр поперечного перерізу зразка по шийці;  $R$  – поточний радіус кривизни меридіонального перерізу шийки зразка. Можливий

також розрахунок показника за формулою, отриманою на підставі співвідношення П. Бріджмена [8]:

$$\eta = 1 + 3 \ln \left( 1 + \frac{d}{4R} \right). \quad (1.9)$$

У дослідженнях на вільне кручення  $\sigma_1 = \tau$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = -\tau$ , тому показник  $\eta = 0$ , а гранична деформація визначається за формулою

$$e_p = \frac{tg \alpha}{\sqrt{3}}, \quad (1.10)$$

де  $\alpha$  – кут зсуву на поверхні зразка після руйнування.

При крученні також має місце локалізація пластичної деформації в області, пов'язаною з зоною руйнування. Тому кут  $\alpha$  вимірюють на інструментальному мікроскопі на відстані, не менше 5...10 мм від зони руйнування, тобто в тій області, де деформація була однорідною по довжині зразка.

При осесиметричній осадці коротких ( $h_0 / d_0 = 1,5...2,0$ ) циліндричних зразків без тертя в торцях  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = -\sigma_{смис.}$ , тому показник  $\eta = -1$ , а гранична деформація дорівнює

$$e_p = 2 \ln \frac{h_0}{h}, \quad (1.11)$$

де  $h_0$  - вихідна висота зразка,  $h$  - висота зразка після руйнування.

Однак реалізувати дослідження осесиметричної осадки без тертя практично неможливо, тому для побудови діаграми пластичності в області значень  $-1 \leq \eta \leq 0$  часто проводять дослідження з різними умовами тертя в контакт [65]. При цьому на бічну поверхню зразків наносять чотири відбитки алмазною пірамідкою під навантаженням 200 Н. Відбитки розташовують так, щоб вони утворили ромб, діагоналі якого рівні  $\approx 1$  мм, збігалися з осовим і окружним напрямками. Для підвищення точності і надійності вимірів такі ромби наносять у чотирьох симетрично розташованих точках екватора. Оскільки в процесі осадження вертикальна складова зменшується, то розмір між відбитками по вертикалі рекомендується робити в 2...2,5 рази більші, ніж в окружному напрямку.

Підготовлені таким способом зразки поетапно осаджують до появи видимих неозброєним оком тріщин, що виникають, у більшості випадків, на екваторі бічної поверхні зразків.

Оскільки в цьому випадку навантаження в небезпечній області зразка близько до простого, то ступінь деформації на кожному етапі можна визначити за формулою



$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_z^2 + e_z e_\varphi + e_\varphi^2}, \quad (1.12)$$

де  $e_z = \ln \frac{b_0}{b}$ ,  $e_\varphi = \ln \frac{a_0}{a}$ ,  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $a, b$  – початкові і поточні значення відстаней між відбитками на бічній поверхні зразків в окружному і вертикальному напрямках.

Використовуючи рівняння деформаційної теорії, де осьове напруження розраховується за формулою

$$\sigma_z = \frac{4P}{\pi d^2}. \quad (1.13)$$

Можна показати, що оскільки на вільній поверхні зразка  $\sigma_r = 0$ , то показник напруженого стану з врахуванням (1.4) будемо визначати за формулою

$$\eta = \sqrt{3} \frac{e_z + e_\varphi}{\sqrt{e_z^2 + e_z + e_\varphi + e_\varphi^2}}. \quad (1.14)$$

По отриманих наприкінці кожного етапу значенням  $\eta$  і  $e_u$  будують шлях деформування  $\eta(e_u)$ , і використовуючи критерії деформуємі, знаходять значення граничної деформації  $e_p$  ( $\eta = -1$ ), що відповідають простому навантаженню при  $\eta = -1$ . Точність такого значення  $e_p$  буде залежати від точності тієї моделі процесу накопичення пошкоджень, яка покладена в основу використаного критерію деформуємі.

Тому, в більшості випадків вплив тертя на торцях зразків, що осаджуються, намагаються максимально зменшити шляхом використання прокладок із свинцевої фольги разом із змазкою із суміші гліцерину і колоїдного графіту. Крім того, на торцевих поверхнях роблять спеціальні канавки. Чим менше в процесі осадки перекручування циліндричної форми зразків, тим ближче умови деформування до простого навантаження  $\eta = -1$  і тим точніше отримані значення граничної деформації.

Питання апроксимації діаграм пластичності, отриманих у результаті досліджень матеріалів на розтяг, стиск і кручення розглянуті в роботах [21, 65].

В.А. Огородніков у роботах [65, 67, 111] ввів коефіцієнти чутливості пластичності матеріалу до схеми напруженого стану:

$$\lambda_1 = \ln \frac{e_p(0)}{e_p(1)}, \quad (1.15)$$

$$\lambda_2 = \ln \frac{e_p(-1)}{e_p(0)}, \quad (1.16)$$

де  $e_p(-1)$ ,  $e_p(0)$ ,  $e_p(1)$  – граничні деформації при  $\eta = -1$ ,  $\eta = 0$ ,  $\eta = 1$ .

У роботах [65, 67, 111] показано, що діаграми пластичності для більшості матеріалів із задовільною точністю можна апроксимувати співвідношеннями:

$$e_p(\eta) = e_p(0) \exp(-\lambda_2 \eta), \quad \text{при } -1 \leq \eta \leq 0, \quad (1.17)$$

$$e_p(\eta) = e_p(0) \exp(-\lambda_1 \eta), \quad \text{при } 0 \leq \eta \leq 1, \quad (1.18)$$

де  $e_p(0)$  – гранична деформація при крученні ( $\eta = 0$ ).

Крім зазначених діаграм пластичності в теорії деформуємісті з метою врахування зміцнення металу використовують найважливішу механічну характеристику матеріалу – криву течії в координатах: інтенсивність напружень

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}; \quad (1.19)$$

інтенсивність деформацій по (1.3), побудова якої також пов'язана з рядом особливостей, що будуть викладені в наступних розділах монографії. Головною з цих особливостей, є “підводний камінь усіх дослідників” - по висловлюванню А.А. Ільюшина [32], що полягає в особливості врахування неоднорідності напружено-деформованого стану в шийці зразка.

### 1.2.2. Критерії деформуємісті

Г.А. Смірнов-Аляєв [98] висловив припущення про те, що існує єдина для різних напружених станів діаграма пластичності в координатах  $e_p = \int(\eta)$ . Умова деформування металу без руйнування, запропонована Смірновим-Аляєвим в роботі [98] має вигляд

$$\bar{e}_u = \int_0^{\tau_p} \bar{e}_u d\tau \leq 1, \quad (1.20)$$

де  $e_p = e_p(\eta)$  – гранична деформація в момент появи перших тріщин, що виявляються візуально при заданому показнику напруженого стану. Нормуючи (1.20) на одиницю, одержимо

$$\psi = \frac{\bar{\sigma}_u}{e_p(\eta)} \leq 1. \quad (1.21)$$

При оцінці граничних деформацій за цим критерієм нехтують впливом історії деформування (тобто впливом швидкості зміни показника напруженого стану  $\eta$ ).

Врахування впливу історії деформування на пластичність металів вперше здійснено В.Л. Колмогоровим [38]. Його критерій руйнування отриманий з використанням гіпотези про пропорційну залежність між накопиченням пошкоджень і ступенем зростання деформації у вигляді

$$\psi = \int_0^{\tau_p} E(t - \tau) B(t) \frac{H(t)}{\lambda_p [K(\tau)]} \leq 1, \quad (1.22)$$

де  $H$  – інтенсивність швидкості деформації зсуву,  $K$  – показник напруженого стану, обумовлений, як  $K = \eta / \sqrt{3}$ ,  $\lambda_p = e_p \cdot \sqrt{3}$  – гранична деформація при даному  $K$ ,  $B(t)$  – величина, що враховує історію деформування,  $E(t - \tau)$  – коефіцієнт, що враховує самозаліковування дефектів при високих температурах і який монотонно зменшується від 1 до 0 із збільшенням аргументу.

У критерії (1.22) вплив історії деформування при холодному деформуванні враховується параметром  $B(t)$ , а при наявності високих температур  $E(t - \tau)$ . Однак значення коефіцієнта  $B(t)$  в критерії (1.22) для різних шляхів деформування залишається нез'ясованим.

Розглянутий критерій деформування металів без руйнування виходить з лінійної теорії накопичення пошкоджень при деформуванні, створений А.А. Льюїніним [32], з якого у випадку простого навантаження випливає:

$$\psi = \int_0^{e_p^*} \frac{d\bar{e}_u}{e_p(\eta)} \leq 1. \quad (1.23)$$

При навантаженнях, близьких до простого, критерій (1.22) перетворюється в критерій (1.23).

Критерій деформуємі, що враховує вплив історії деформування на пластичність і заснований на нелінійній теорії накопичення пошкоджень, запропонований у роботі [24, 65], має вигляд

$$\psi = \int_0^{\bar{e}_u^*} \left( 1 + a \cdot \arctg \frac{d\eta}{de_u} \right) \frac{\bar{e}_u^{a \cdot \arctg \frac{d\eta}{de_u}}}{[e_p(\eta)]^{1 + a \cdot \arctg \frac{d\eta}{de_u}}} \leq 1. \quad (1.24)$$

Константа  $a$  в (1.24) виявилася для матеріалів, що зміцнюється, рівною 0,2.

В роботі [65] зроблена експериментальна перевірка критеріїв деформуємості (1.22), (1.23), (1.24). Показано, що при деформуванні матеріалів в умовах, близьких до простого деформування розглянуті критерії дають практично однакові результати розрахунку граничних деформацій. У більш загальному випадку, при складному деформуванні, застосування критерію (1.21) приводить до деякого запасу пластичності (якщо значення показника  $\eta$  дослідної області металу при русі по шляху деформування збільшується). Розрахунок пластичності за допомогою критерію (1.22) дає завищені дані. У тих випадках, коли показник  $\eta$  при русі по шляху деформування зменшується, застосування критерію (1.23) завищує величину пластичності. Критерій (1.24) у випадку, коли параметр швидкості зміни схеми напруженого стану  $\frac{d_n}{de_u} > 0$  – значення пластичності зростає в порівнянні з критерієм (1.22). Це підтверджується експериментально в роботі [65] дослідженнями зразків на спільне кручення і розтяг. В зв'язку з викладеним, у випадку, якщо параметр  $\frac{d_n}{de_u}$  змінюється, утворюючи вид траєкторій деформування малої чи середньої кривизни, доцільно використовувати критерій (1.24).

### **1.2.3. Оцінка деформуємості заготовок за допомогою критеріїв деформуємості**

Розглянуті вище критерії деформуємості припускають інформацію про діаграми пластичності дослідних матеріалів. Для оцінки деформуємості заготовок при обробці тиском необхідно знати напружено-деформований стан, що виникає при реалізації технологічної операції на різних стадіях деформування. Оцінка деформуємості матеріалу може бути здійснена, якщо відома залежність показника  $\eta$  і ступеня деформації  $\bar{\epsilon}_u$  в найбільш небезпечній області деформуємого об'єму від величини характерної деформації (наприклад, обтиснення) і інших параметрів процесу.

В роботі [5] згадується про можливість реалізації процесу розкочування з погляду деформуємості, або як зазначено в цій же роботі “граничної пластичності” матеріалу заготовок. Відзначимо, що термін “гранична пластичність” не зовсім коректний, тому що під терміном “пластичність” розуміють граничну до руйнування деформацію матеріалу. Тому використовуючи поняття “деформуємість”, необхідно

враховувати вплив схеми напруженого стану. При розрахунках використовують показник Г.А. Смірнова-Аляєва (1.4).

Використовуючи цей показник, автори роботи [92] одержали вираз для умови деформування без руйнування у вигляді:

$$e \leq e_{ep}(\eta). \quad (1.25)$$

Умова (1.25) не враховує вплив історії деформування на накопичення пошкоджень.

Нам невідомі роботи, у яких би згадувалося про деформуємість при закочуванні пари поршень-шатун аксіально-роторного поршневого насоса. Тим часом оцінка деформуємість металу при закочуванні дозволила б здійснити процес закочування з необхідним запасом пластичності і одержанням якісного виробу. На підприємстві ЗАТ “Будгідравлика” м. Одеса відомі випадки поломки аксіально-роторних поршневих насосів через вичерпання ресурсу пластичності при закочуванні пари поршень-шатун.

Відзначимо також, що для розглянутих (див. параграф 1.4) нових процесів формування внутрішнього шліцьового профілю на оправці методом “охоплюючого” протягування також необхідні дослідження деформуємість заготовок з метою одержання якісних виробів.

### **1.3. Технологічний процес закочування поршня із шатуном аксіально-роторного поршневого насоса**

Як було зазначено в параграфі 1.1, поряд із процесами обкочування труб, холодного розкочування прецизійних заготовок, об’єднуючим фактором яких є механізм деформації, розглянемо також технологічний процес закочування поршня із шатуном аксіально-роторного поршневого насоса.

#### **1.3.1. Технологічний процес закочування пари поршень-шатун**

При виготовленні поршня відрізається заготовка із сталі 38Х2МЮА в стадії постачання на образивно-відрізнаму пристосуванні МФ-332. Після відрізання проводиться вимір заготовки штангенциркулем ШЦ-I-125-0.1 ДСТ 166-89. Для поліпшення сталі проводиться термічна обробка (HRC<sub>c</sub> 20...25), надалі заготовка піддається операціям: точіння, свердління, шліфування, промивання і контролю.

На рис. 1.3 показані розміри поршня після завершення всіх операцій виготовлення.

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-217-4>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-217-4>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-217-4>

*Наукове видання*

**Огородніков Віталій Антонович  
Музичук Василь Іванович  
Нахайчук Олег Вікторович**

**МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО  
ФОРМОЗМІНЮВАННЯ З ОДНОТИПНИМИ СХЕМАМИ  
МЕХАНІЗМУ ДЕФОРМАЦІЇ**

Монографія

Редактор Т. А. Ягельська

Оригінал-макет підготовлено В. І. Музичуком

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»  
Свідоцтво Держкомінформу України  
Серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 11.04.2007 р.  
Формат 29,7×42<sup>1</sup>/<sub>4</sub> Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний Ум. друк. арк. 10,39  
Наклад 100 прим. Зам. № 2007-060

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
Серія ДК № 746 від 25.12.2005 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-81-59



### **ОГОРОДНІКОВ ВІТАЛІЙ АНТОНОВИЧ**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри опору матеріалів і прикладної механіки Вінницького національного технічного університету, інженер-механік.

Один із основоположників сучасної феноменологічної теорії деформуємості металів, становлення якої сприяло розвитку нових наукових напрямків в теорії обробки металів тиском.

Наукові інтереси: прикладна теорія пластичності, механіка деформуємого твердого тіла, експериментальна механіка машин, теорія обробки металів тиском, динаміка і міцність машин.



### **МУЗИЧУК ВАСИЛЬ ІВАНОВИЧ**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри тракторів, автомобілів і технічного сервісу машин Вінницького державного аграрного університету, інженер-механік.

Наукові інтереси: теорія обробки металів тиском, експериментальна механіка машин, прикладна теорія пластичності.



### **НАХАЙЧУК ОЛЕГ ВІКТОРОВИЧ**

Доктор технічних наук, професор кафедри сільськогосподарських машин Вінницького державного аграрного університету, інженер-механік.

Наукові інтереси: прикладна теорія пластичності, теорія обробки металів тиском, розвиток теорії деформуємості заготовок складного профілю в умовах граничного формоутворення.