

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА
ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА
ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ
ТИСКОМ

МОНОГРАФІЯ

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ

Монографія

Запоріжжя
АТ «Мотор Січ»
2016

Теорія та практика обробки матеріалів тиском / Під ред. Богусласва В.О., Бобиря М.І., Тітова В.А., Качана О.Я. – Запоріжжя, вид. АТ «Мотор Січ», 2016. – 522 с.

Рекомендовано до друку Вченими радами: Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (протокол №5 від 11 квітня 2016 року);

Запорізького національного технічного університету (протокол №11 від 25 квітня 2016 року).

Колектив авторів: Богуслаєв В.О., Бобир М.І., Тітов В.А., Качан О.Я., Алієв І.С., Бейгельзімер Я.Ю, Варюхін В.М., Гожій С.П., Грушко О.В., Лупкін Б.В., Марков О.Є., Матвійчук В.А., Михалевич В.М., Огородніков В.А., Розов Ю.Г., Шамарін Ю.Є., Штерн М.Б., Алієва Л.І., Балушок К.Б., Борис Р.С., Злочевська Н.К., Кондрачук Е.В., Кузьмов А.В., Кулагін Р.Ю., Маковей В.О., Мозговий В.Ф., Мозговий О.В., Лавріненко А.Д., Тітов А.В., Холявік О.В., Басов О.Ю., Березовський Є.К., Вишневський П.С., Гараненко Т.Р., Герасимова О.В., Лисенко О.М., Подгребельний М.С., Проценко П.Ю., Уланов С.О.

Рецензенти:

Баглюк Геннадій Анатолійович – д.т.н., професор, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, заступник директора з наукової роботи;

Нововіцин Олексій Володимирович – д.т.н., професор, Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, завідувач відділом.

Дана колективна монографія містить останні дослідження в галузі обробки металів тиском, які присвячені формоутворенню і забезпеченню якості деталей пластичним деформуванням. Монографія написана колективом вчених – провідних фахівців з найбільш важливих напрямків розвитку технології створення наукоємної техніки машинобудування.

Монографія може бути використана науковцями, інженерно-технічними працівниками, аспірантами та магістрами машинобудівних спеціальностей.

ISBN 978-966-2906-60-8

© Богусласв В.О.,
Бобир М.І.,
Тітов В.А.,
Качан О.Я.
© АТ «Мотор Січ»

Розділ 3 Розробка процесів профілювання трубчастих виробів пластичним деформуванням

3.1 Розробка нових процесів холодного деформування трубчастих виробів з профільованою внутрішньою поверхнею (Ю.Г. Розов).....	237
Література.....	264
3.2 Профілювання гвинтоподібних труб теплообмінників обкочуванням роликками (М.І. Бобир, В.О. Маковей, П.Ю. Проценко).....	266
Література.....	295
3.3 Витягування з потоншенням біметалевих трубчастих елементів з різнорідних металів і сплавів (В.А. Тітов, Р.С. Борис, П.С. Вишневський).....	297
Література.....	335
3.4 Розвиток процесів локального деформування (В.А. Матвійчук, В.М. Михалевич)	339
Література.....	360

Розділ 4 Розвиток нових способів інтенсифікації процесів пластичної обробки

4.1 Методи пошуку нових технологічних способів видавлювання (І.С. Алієв)	364
Література.....	383
4.2 Удосконалення процесу кування великогабаритних плит за рахунок використання інтенсивних пластичних деформацій (О.Є. Марков).....	386
Література.....	410
4.3 Особливості розвитку і впровадження інноваційних процесів штампування обкочуванням деталей високовольтною апаратури (С.П. Гожій).....	415
Література.....	445
4.4 Високошвидкісні методи обробки металів тиском (Ю.С. Шамарін, В.А. Тітов, О.В. Холявік, Р.С. Борис).....	448
Література.....	489
4.5 Формоутворення тонкостінних елементів монолітних коліс ГТД (В.А. Тітов, В.Ф. Мозговий, О.Ю. Басов, К.Б. Балушок, А.В. Тітов, О.М. Лисенко, А.Д. Лаврінєнков, Т.Р. Гараненко).....	490
Література.....	520

РОЗДІЛ I

ОСНОВИ ТЕОРІЇ ДЕФОРМОВАНОСТІ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ДО ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

1.1 Основи феноменологічної теорії деформованості та її застосування до процесів обробки металів тиском

Тенденція зростання вимог споживачів до якості виробів машинобудування, що охоплює весь світ, знаходить своє відображення в металообробці і, зокрема, в обробці металів тиском (ОМТ). Останні роки минулого сторіччя підтвердили можливість забезпечення якості та надійності машин із залученням високих технологій, що включають такі ознаки як наукоємність, системність, моделювання, комп'ютеризацію і т.д.

Появі нових методів обробки тиском металів і матеріалів зі складною реологією передувала низка проблем: втрата стійкості пластичного деформування, руйнування металу в процесі його обробки, непомірний ріст зерна після холодної пластичної деформації і подальшої термообробки, критична пористість, що виникає в процесі деформації порошкових матеріалів [1, 2]. Ці та інші перераховані проблеми можуть бути вирішені за допомогою феноменологічної теорії деформованості, яка інтенсивно розвивається останнім часом і є по суті новим розділом прикладної теорії пластичності [3, 4]. Зазначена теорія базується на експериментальних даних про механічні властивості матеріалів. Однак до теперішнього часу оцінка пластичності металів при різноманітних напружених станах все ще є білою плямою в експериментальній механіці машин.

Застосування теорії деформованості для вирішення задач обробки металів тиском дозволяє дати відповідь не тільки на питання – яка гранична ступінь деформації оброблюваної заготовки. До цього завдання примикають ще дві практично важливі та пов'язані з ним задачі. Оцінка ступеня використання пластичності важлива також в тих випадках, коли після даної операції слідус термообробка, оскільки властивості матеріалу після термообробки знаходяться в залежності від ступеня використання запасу пластичності, отриманого на попередніх операціях. Як відомо, існує граничне значення

технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія «Машинобудування», Київ – 2010 – №59, – С. 13–18

40. Тітов В.А. Розрахунок напружено-деформованого стану витягування з потоншенням ідеальнопластичного двошарового металу / Тітов В.А., Борис Р.С. // Обробка матеріалів тиском. – 2012. – №1 (30). – С. 45–52.

41. Борис Р.С. Особливості врахування сил тертя при витягуванні з потоншенням двошарових заготовок / Борис Р.С., Тітов В.А., Вишневикий П.С. // Обработка материалов давлением. – 2012. – №2 (31). – С. 22–29.

42. Пат. на корисну модель 30195 Україна, МПК В21С 23/22, В21D 22/00, В23К 20/00.Спосіб виготовлення біметалевих виробів / В.А. Тітов, М.С. Тривайло, Р.С. Борис. – № u2007 13002; Заявл. 23.11.2007; Опубл. 11.02.2008, Бюл. №3.

43. Пат. на корисну модель 30508 Україна, МПК В23К 20/00, В21К 5/00.Спосіб виготовлення біметалевих виробів/ В.А.Тітов, М.С. Тривайло, Р.С. Борис. – № u2007 13006; Заявл. 23.11.2007; Опубл. 25.02.2008, Бюл. №4.

44. Пат. на корисну модель 31541 Україна, МПК В21D 22/20.Штамп для виготовлення біметалевих виробів/ М.С. Тривайло, В.А. Тітов, Р.С. Борис. – № u2007 14335; Заявл. 19.12.2007; Опубл. 10.04.2008, Бюл. №7.

45. Пат. на корисну модель 31540 Україна, МПК В21С 23/22, В21D 22/20.Спосіб виготовлення біметалевих виробів з листових заготовок / В.А. Тітов, М.С. Тривайло, Р.С. Борис. – № u2007 14333; Заявл. 19.12.2007; Опубл. 10.04.2008, Бюл. №7.

46. Пат. на корисну модель 34443 Україна, МПК В21 С23/22, В23К 20/00, В21D 22/30.Спосіб виготовлення біметалевих виробів/ М.С. Тривайло, В.А. Тітов, Р.С. Борис, А.В. Тітов, Є.В. Честнов. – № u2007 14338; Опубл. 11.08.2008, Бюл. №15.

47. Пат. на корисну модель 43275 Україна, МПК В21D 22/20. Штамп для виготовлення біметалевих виробів/ В.А.Тітов, М.С. Тривайло, О.В. Холявік, Р.С. Борис, А.В. Кліско. – № u2009 02424; Опубл. 10.08.2009, Бюл. №15.

48. Пат. на корисну модель 65392 Україна, МПК В21С 23/22 (2006.01). Спосіб виготовлення біметалевих виробів з листових заготовок / В.А. Тітов, Р.С. Борис, Є.І. Богодіст. – № u20011 04182; Заявл. 06.04.2011; Опубл. 12.12.2011, Бюл. №23.

3.4 Розвиток процесів локального деформування

Розвиток основ моделювання механіки формоутворення заготовок

Широке впровадження ресурсозберігаючих технологій обробки металів тиском (ОМТ) стримується через недостатньо розвинутий розрахунковий апарат механіки формоутворення, який покликаний забезпечити: визначення кінематики течії металів і оцінку впливу на неї параметрів технологічних процесів; визначення пластичності металів; аналіз напружено-деформованого стану і накопичення пошкоджень в матеріалі заготовок; визначення впливу величини використаного ресурсу пластичності на службові характеристики виробів.

Таким чином, актуальність теми визначається необхідністю розробки і впровадження в металообробку нових процесів локального деформування (ЛД) з розширеними можливостями щодо формування високоякісних заготовок необхідної форми та розмірів.

Метою даної роботи є формування напрямку розвитку процесів ЛД на основі моделювання механіки формоутворення заготовок.

На сьогодні широкого визнання та застосування для оцінки граничного стану матеріалів за умови пластичного деформування отримала теорія деформованості [1-4]. Проте, до порівняно недавнього часу, було відсутнє чітке уявлення про місце цього підходу серед інших теорій і моделей руйнування та критеріїв граничного стану матеріалів. Важливі кроки по встановленню вказаних зв'язків зроблено у працях [2, 5, 6]. Один із кроків полягає у з'ясуванні відмінностей між різними безрозмірними показниками напруженого стану та встановленні важливих переваг показника $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$, де $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ – перший інваріант тензора σ_{ij} і другий інваріант девіатора $\sigma_{ij} - I_1(T_\sigma)/3$ напружень. Цей показник використовується для визначення одного з фундаментальних понять теорії деформованості – кривої граничних деформацій. Проте, слід зазначити, що у класичній літературі з теорій пружності, пластичності, повзучості та міцності в якості безрозмірного показника напруженого стану традиційно використовувалися параметр Надаї-Лоде μ_σ

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (3.28)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; третій інваріант напрямного тензора напружень D ; кут ψ виду напруженого стану:

$$D = \frac{\cos(3 \cdot \psi)}{\sqrt{54}}, \quad (3.29)$$

та інші подібні показники.

Детальний аналіз взаємозв'язків між такими показниками за умови плоского напруженого стану наведено у [2, 5, 6].

Лише в період становлення та розвитку теорії деформованості, що прийшовся на другу половину минулого століття, в класичних критеріях міцності починає фігурувати показник η , проте без належного обґрунтування доцільності застосування саме цього показника.

У працях [2, 5, 6] показано, що між фізично можливими варіантами плоского напруженого стану та значеннями показника η існує взаємно однозначна відповідність. Як наслідок, залежність $\sigma_{II} = \sigma_{II}(\eta)$ представляється однозначною функцією, що полегшує візуальну оцінку результатів зіставлення та порівняння аналітичних і експериментальних даних стосовно текучості та міцності за умов плоского напруженого стану.

Вказане представлення зображено на рис. 3.92 і є альтернативою традиційному представленню умов текучості та міцності у головних напруженнях.

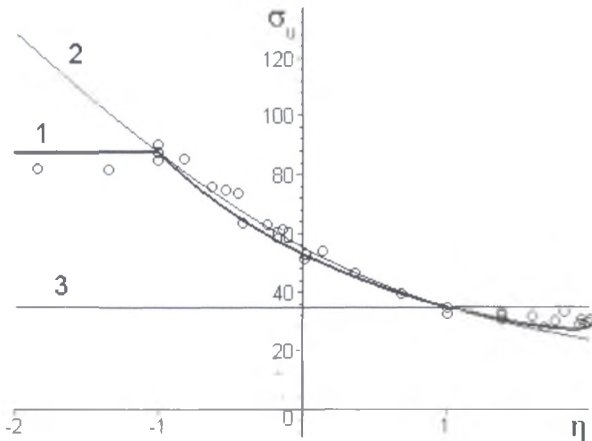


Рис. 3.92 – Подання розрахункових і експериментальних даних з міцності чавуну у вигляді залежності інтенсивності напружень від показника напруженого стану [6]: 1 – умова Писаренка-Лебедева, 2 – умова Баландіна, 3 – умова Мізеса

Що ж стосується так званих класичних показників напруженого стану, то для будь-якого із них одному й тому самому значенню показника відповідає декілька фізично різних варіантів плоского напруженого стану. Ця обставина свідчить про безальтернативне використання показника η у створенні математичних моделей плоского напруженого стану.

У процесах обробки тиском плоский напружений стан найчастіше всього виникає на вільній поверхні заготовки. Нерідко саме ця зона є найнебезпечнішою з точки зору утворення тріщин в матеріалі заготовок. Саме тому, віссиметричний стиск циліндричних зразків є не тільки одним з найважливіших способів лабораторних випробувань для визначення механічних властивостей матеріалів, а й може використовуватися для моделювання поширених технологічних операцій, зокрема, штампування обкочуванням, вальцювання тощо. Ступінь осадження, що відповідає появі тріщин на бічній поверхні заготовки, залежить від інтенсивності бочкоутворення, яка у свою чергу визначається умовами тертя на контакті з інструментом [1, 3, 7, 8].

Математичні моделі та інформаційні технології, що представлені у працях [9, 10, 11], надають можливість описувати і вивчати закономірності пластичного деформування і руйнування матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні, а також можуть бути покладені в основу математичного моделювання інших подібних процесів, наприклад, як це здійснено у праці [12].

У відповідності до експериментально-аналітичного методу в роботах [8-11, 13] отримано математичне описання кривої граничних деформацій за умови нестационарного деформування, яке виникає при віссиметричному стиску за наявності тертя на торцях циліндричних зразків

$$\begin{cases} \eta = \omega(t_*(m)) \\ e_*(t_*(m), m) = m \cdot \int_0^{t_*(m)} \frac{1}{f(2, \tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau, \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\frac{m}{a_2} \cdot \int_0^{t_*(m)} \frac{\exp \left[\omega(\tau) \cdot \ln \left(a_1 \cdot \frac{1 - \omega(\tau)}{2 \cdot a_2} + a_2 \cdot \frac{1 + \omega(\tau)}{2 \cdot a_3} \right) \right]}{f(2, \tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau - 1 = 0, \quad (3.31)$$

де m – параметр, що характеризує коефіцієнт тертя на торцях;

$$\omega(\tau) = f(1, \tau) \cdot f(2, \tau), \quad f(k, \tau) = \left(1 + (-1)^k \cdot 3 \cos^{2k}(\tau)\right)^{\frac{(-1)^{k+1}}{k}}, \quad (3.32)$$

$k = 1, 2$, e_u та t_* – накопичена деформація e_u та параметр t (характеризує стадію процесу пластичного деформування) параметричного представлення траєкторії деформацій в координатах $e_u = e_u(\eta)$, що відповідають моменту досягнення граничного стану; $a_1 > a_2 > a_3 > 0$ – деякі постійні, що визначаються за результатами дослідів з визначення граничних деформацій за різних видів напруженого стану в умовах стаціонарного деформування.

Результати розрахунків за наведеною моделлю наведено на рис. 3.93 [11].

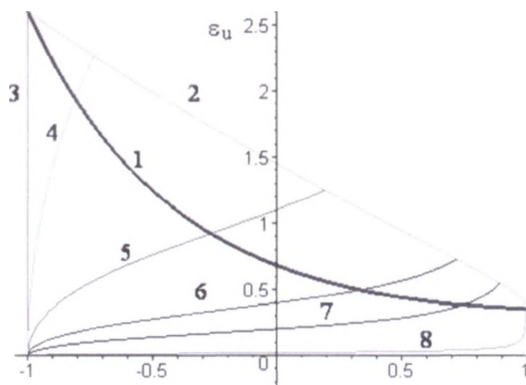


Рис. 3.93 – Залежність граничних деформацій від показника η при торцевому стисненні циліндричних зразків: 1 – крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні; 2 – крива граничних деформацій при нестаціонарному деформуванні; 3 – 8 – траєкторії деформування за різних умов тертя на торцях (параметр m): 3 – $m = 30$, 4 – $m = 2$, 5 – $m = 0,5$, 6 – $m = 0,18$, 7 – $m = 0,09$, 8 – $m = 0,01$

Узагальнення математичної моделі напружено-деформованого стану (НДС) бічної поверхні при віссиметричному осадженні циліндричних зразків, що є структурною складовою співвідношень (3.30) – (3.32), здійснено у праці [14]. А у праці [15] показано, що для одних і тих самих значень a_1, a_2, a_3 , в залежності від вибору аналітичного співвідношення для апроксимації кривої граничного стану при стаціонарному деформуванні $e_{*c} = e_{*c}(\eta)$, поведінка цієї кривої у досліджуваних межах може суттєво відрізнятись. Проте до цього часу відсутні

дослідження впливу зазначеної розбіжності на розрахункові значення граничних деформацій.

Одним з ключових результатів роботи [2] стало встановлення загальних концепцій і наявних відмінностей тензорної моделі тривалої міцності О.А. Ільюшина і моделей граничних деформацій, що побудовані відповідно до концепцій теорії деформованості. Це дозволило об'єднати два зазначених підходи до побудови моделі в рамках єдиної, узагальненої, що, в свою чергу, призвело як до збагачення самої теорії підсумовування пошкоджень, так і до напрямів її застосування. Серед найважливіших наслідків зазначеного об'єднання стала розробка моделі спадкового типу, яка враховує залежність граничної деформації від закону зміни швидкості деформації при гарячому деформуванні.

Відомо, що гранична до руйнування деформація, яку набуває матеріал за умови гарячого деформування, залежить від швидкості деформації ε_{II} . За даними, які наведені у [2], зокрема з посиланням на інші джерела, гранична деформація залежить від закону зміни швидкості деформації, що може бути відображено скалярною моделлю підсумовування пошкоджень

$$\psi(t) = \int_0^t \varphi(t-\tau; I(\tau)) \cdot f(\varepsilon_{II}(\tau)) \cdot d\tau, \quad (3.33)$$

де $0 \leq \psi \leq 1$, $\psi(0) = 0$, $\psi(t_*) = 1$; t , τ – час; t_* – граничний час, що відповідає руйнуванню зразка; $\varphi(t-\tau, I(\tau))$ – ядро спадковості; f – деяка функція.

Сукупність аксіом, постулатів та гіпотез, що покладено в основу побудови моделі, а також аналіз результатів моделювання показав, що в рамках такого підходу може бути описано широкє коло процесів, які виходять далеко за рамки дослідження властивостей матеріалів. Характерним прикладом є моделювання різних законів розподілу сил спортсмена, який долає певну дистанцію [9, 17].

Поява моделі (3.33) надала можливість сформулювати дві важливі, як в теоретичному, так і практичному плані, варіаційні задачі ізопериметричного типу [9, 17].

Перша задача формулюється так: визначити закон зміни швидкості деформації $\varepsilon_{II} = \varepsilon_{II}(t)$, при якому задана накопичена деформація e досягається за найкоротший час t_* за умови, що $\psi(t_*) = 1$

$$\begin{aligned}
 t_* &= t_*(\varepsilon_U(t)) \rightarrow \min, \\
 e_* &= \int_0^{t_*} \varepsilon_U(\tau) \cdot d\tau, \\
 \int_0^t \varphi(t_* - \tau; I(\tau)) \cdot f(\varepsilon_U(\tau)) \cdot d\tau &= 1.
 \end{aligned}
 \tag{3.34}$$

Задача (3.34) не може бути віднесена до класичних задач ізопериметричного типу, тому що значення накопиченої деформації, яке представляється визначеним інтегралом, є відомим, а мінімізується верхня межа функціонала, який пов'язаний критеріальною умовою.

Формулювання другої задачі. Задано час t_Σ . Необхідно визначити закон зміни швидкості деформації $\varepsilon_U = \varepsilon_U(t)$, $t \in [0, t_\Sigma]$, відповідно якому матеріал набуває найбільшої деформації e_Σ . Очевидно, що мають справджуватися співвідношення $e_\Sigma = e_*$, $t_\Sigma = t_*$, отже

$$\begin{aligned}
 e_* &= \int_0^{t_*} \varepsilon_U(\tau) \cdot d\tau \rightarrow \max, \\
 \int_0^t \varphi(t - \tau; I(\tau)) \cdot f(\varepsilon_U(\tau)) \cdot d\tau &= 1.
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

Слід зазначити, що невідомі подібні постановки оптимізаційних задач в теорії підсумовування пошкоджень незалежно від використовуваних моделей.

Аналіз задачі (3.35) показав, що за умов обмеження функцій $\varepsilon_U = \varepsilon_U(t)$ класом гладких кривих розв'язку варіаційної задачі не існує.

Показано, що при розширенні області допустимих функцій до класу кусково-сталих функцій, зокрема для двохступеневої схеми

$$\varepsilon_U(t) = \begin{cases} \varepsilon_{U1}, & 0 \leq t \leq t_1; \\ \varepsilon_{U2}, & t_1 \leq t \leq t_*; \end{cases}
 \tag{3.36}$$

задача (3.35) із врахуванням (3.36) може бути зведена до задачі нелінійного програмування [9]:

$$\begin{aligned}
 e_* &= \varepsilon_{U1} \cdot t_1 + \varepsilon_{U2} \cdot (t_* - t_1) \rightarrow \max, \\
 -\left(\frac{t_* - t_1}{t_{*1}}\right)^n + \left(\frac{t_*}{t_{*1}}\right)^n + \left(\frac{t_* - t_1}{t_{*2}}\right)^n &= 1, \\
 t_1 &\leq t_{*1},
 \end{aligned}
 \tag{3.37}$$

де $t_{*1} = t_{*c}(\varepsilon_{u1})$ та $t_{*2} = t_{*c}(\varepsilon_{u2})$ – окремі точки кривої граничного стану при стаціонарному деформуванні у координатах $t_{*2} = t_{*c}(\varepsilon_{u2})$, яка відображає властивості матеріалу.

Показано, що задача (3.37) може бути розв'язана за допомогою побудови функції Лагранжа та врахуванні умови $t_1 = t_{*1}$. Остаточню розв'язок задачі (3.37) зведено до розв'язку системи [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d\varepsilon_{u1}} \left\{ \gamma \varepsilon_{u1}^n + \left[\gamma^n - \varepsilon_{u1} \left(t_*^n - \left(t_* - \gamma \varepsilon_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^n \right) \right] \cdot \left(t_* - \gamma \varepsilon_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^{1-n} \right\} = 0; \\ \varepsilon_{u2} = \frac{\gamma^n - \varepsilon_{u1} \left[t_*^n - \left(t_* - \gamma \varepsilon_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^n \right]}{\left(t_* - \gamma \varepsilon_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^n}; \\ t = \gamma \varepsilon_{u1}^{\frac{1}{n}}. \end{array} \right. \quad (3.38)$$

На основі даних кручення зразків із сталі 14X17H2 при температурі 1150 °С відповідно до отриманих розрахунків розбіжність між граничними значеннями накопиченої деформації для неоптимальної та оптимальної схем деформування може сягати до 10%.

Отримані результати надають можливість розширити коло прикладних задач, що можуть бути розв'язані на основі моделювання механіки формоутворення, зробити сам процес моделювання більш зручним, а його результати більш обґрунтованими. Крім того, важливим є розвиток теорії підсумовування пошкоджень, області застосування якої вийшли далеко за межі механіки та машинобудування.

Розвиток процесів локального деформування на основі моделювання механіки формоутворення заготовок

При розробці процесів ОМТ актуальним є розширення технологічних можливостей маловідходного виробництва високоякісних виробів складної форми. Особливе місце серед процесів ОМТ займають спо-

соби ЛД, при яких деформація охоплює відносно невеликий об'єм матеріалу заготовки, а формоутворення відбувається внаслідок поступового взаємного переміщення інструменту та заготовки. Незначна площа контакту інструменту з заготовкою обумовлює відносно невеликі сили деформування, а можливість створити сприятливі умови течії матеріалу в зоні контакту дозволяє формувати розвинуті тонкостінні елементи заготовок складної форми. Разом з тим, можливості досягнення великих деформацій обмежуються небезпекою руйнування заготовок та втрати стійкості їх окремих частин. Важливим завданням є також забезпечення високої якості виробів.

Основними завданнями дослідження є визначення впливу на НДС матеріалу заготовки ступеня локалізації деформації, оцінка впливу технологічних параметрів процесів ЛД на кінематику течії металу, оцінка ресурсу пластичності матеріалу деформованої заготовки та встановлення її граничних геометричних параметрів.

З метою дослідження впливу на НДС матеріалу заготовки ступеня локалізації деформації було проведено моделювання процесів ЛД шляхом втискування кульки і ролика в плоский напівпростір. Моделювання проводили на різних металах, зокрема на сплаві ЕП718, який добре зміцнюється і має сильну залежність твердості від інтенсивності деформації. Кульку втискували на різну глибину із забезпеченням різних граничних умов на контакті. На рис. 3.94, а приведений типовий характер розподілу інтенсивності деформацій e_u в зоні пластичного відбитку, отриманий методом вимірювання твердості.

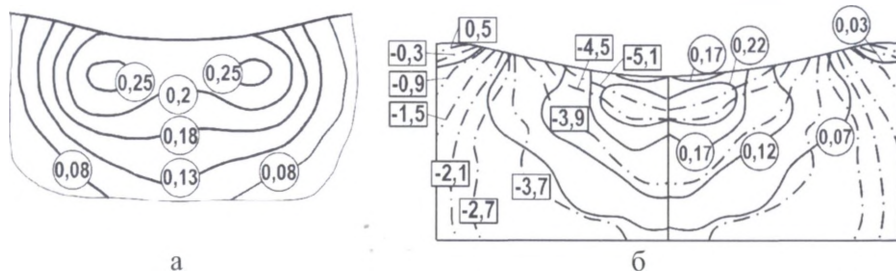


Рис. 3.94 – Розподіл в зоні пластичного відбитку ізоліній:

$$e_u = \text{const} (\circ), \eta = \text{const} (\square)$$

Отже, характер деформованого стану в зоні відбитку є досить нерівномірним. Інтенсивність деформацій на поверхні відбитку сягає лише 50 – 80% максимальної. Найбільша інтенсивність деформацій спо-

стерігається поблизу центра відбитка і віддалена від поверхні контакту на глибину $\approx 0,1d$, при цьому глибина проникнення пластичної зони $h_{\text{нп}} \approx (1,5 - 1,6)d$, де d – діаметр відбитка або його ширина.

Для дослідження НДС пластичної зони при втискуванні інструменту застосовано також метод координатних ділильних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії R функцій [18]. При цьому здійснювалося поетапне втискування в заготовку кульки (віссиметрична задача) та ролика (плоска задача). Характер розподілу ізоліній $e_{\text{н}} = \text{const}$ в зоні відбитку (рис. 3.94, б), отриманий за результатами вимірювання координатної ділильної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості (рис. 3.94, а).

Показник жорсткості напруженого стану змінюється від величин, що відповідають всебічному стиску ($\eta = -5 \dots -3$) на осі симетрії відбитку, до зсуву-розтягу ($\eta \geq 0$) на краю відбитку, в місці утворення пластичного валика.

Таким чином, для процесів ЛД в зоні втискування інструменту характерна «м'яка» схема напруженого стану. Глибина проникнення пластичної деформації залежить від діаметру (ширини) відбитку і, відповідно, розмірів інструмента та величини подачі. Для забезпечення відносно рівномірного деформованого стану заготовки необхідно застосовувати інструменти (валки) з більшим діаметром, призначати більшу величину подачі, використовувати ефективні мастила. Наближення зони максимальної деформації до поверхні заготовки можливо шляхом зменшення контактного тертя та використання на заключних етапах обробки деформуємих тіл менших розмірів.

В якості досліджуваних процесів ЛД в роботі вибрано штампування обкочуванням (ШО) та вальцювання заготовок.

При ШО відбувається деформування заготовки в торець та під різними кутами до її поздовжньої осі. До методів ШО відноситься сферорухоме штампування (нерухома заготовка обкочується конічним валком) та торцеве розкочування (обертається заготовка і валок, конічний або циліндричний).

Сферорухоме штампування отримало розвиток завдяки працям С.П. Г'ожія, Л.Т. Кривди, А.С. Пшенишнюка та ін. [19, 20]. Даний метод дозволяє обробляти заготовки за схемами осаджування, висаджування, комбінованого витискування, рельсфного формування та ін., забезпечуючи при цьому високу якість виробів.

При сферорухомому штампуванні чинити вплив на механіку формоутворення заготовок можна змінюючи (незначною мірою) кут нахилу валка, характер його руху та форму матриці.

Метод торцевого розкочування розроблений завдяки працям К.Н. Богоявленського, В.В. Лапіна [21] та інших дослідників. На рис. 3.95 представлені схеми торцевого розкочування, основними елементами яких відповідно до рис. 3.95, а с: 1 – заготовка, 2 – матриця, 3 – розкочувальний валок (циліндричний або конічний), 4 – шпиндель, 5 – оправка, 6 – штовхач.

Дослідженнями встановлено, що при торцевому розкочуванні заготовок циліндричним валком напрям течії матеріалу заготовки залежить переважно від величини та напрямку зміщення осі валка від осі поперечного перерізу заготовки δ , по відношенню до напрямку обертання заготовки.

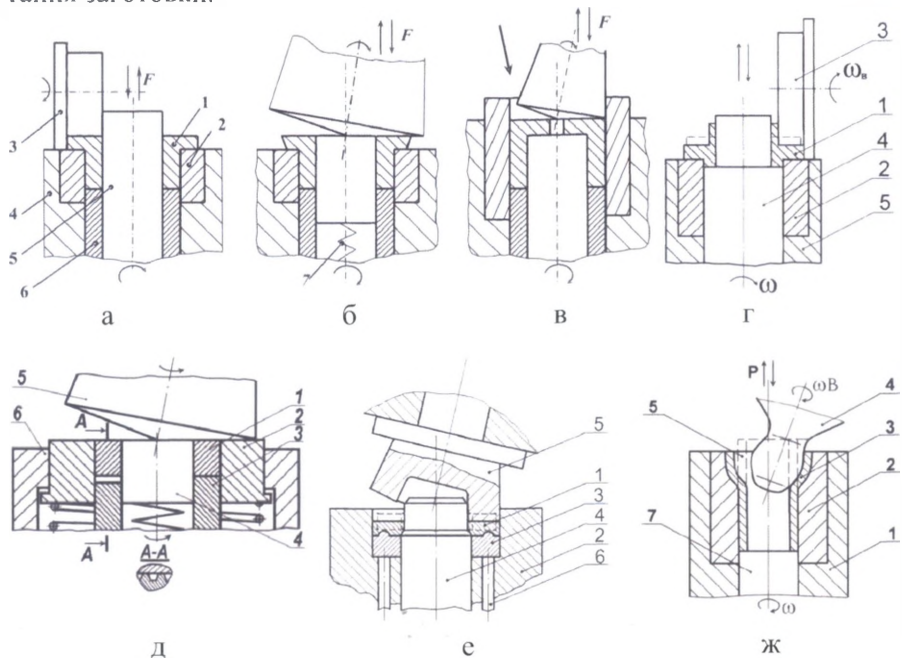


Рис. 3.95 – Схеми торцевого розкочування циліндричним і конічним валками: висаджування зовнішнього бурта (а), (б); висаджування внутрішнього бурта (в); висаджування і зворотнє витискування (г); пряме витискування зубчастої поверхні (д); осаджування-калібрування (е); роздавання-калібрування (ж)

Основними параметрами, що впливають на напрям течії матеріалу заготовки при торцевому розкочуванні конічним валком, є кут нахилу α осі валка, а також величина і напрям зміщення вершини валка δ по відношенню до осі обертання заготовки.

З використанням апарату аналітичної геометрії отримана залежність кута φ між векторами швидкості точок контактної поверхні заготовки і валка від параметрів процесу розкочування [3, 22]. Кут між проєкціями векторів швидкості точок циліндричного валка і заготовки на площину розкочування в місці контакту визначається співвідношенням

$$\varphi = \arctg \sqrt{\frac{\sqrt{R_n^2 - (h - R_n)^2} + \delta}{R}}, \quad (3.39)$$

де R_n – радіус валка, h – глибина втискування валка, R – радіус заготовки.

Кут φ між векторами швидкостей точок контактної поверхні заготовки і конічного валка від параметрів процесу розкочування визначається залежністю

$$\varphi = \arctg \left[\frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2} \right], \quad (3.40)$$

де $k_1 = -x_0 / y_0$, $k_2 = m / l$ – кутові коефіцієнти проєкцій прямих, на яких лежать вектори швидкості точок заготовки і валка, на утворену розкочуванням площину. Залежність (3.40) кута φ від напрямку та величини зміщення валка δ при різних кутах нахилу його осі графічно представлена на рис. 3.96, а, від радіусу заготовки – на рис. 3.96, б.

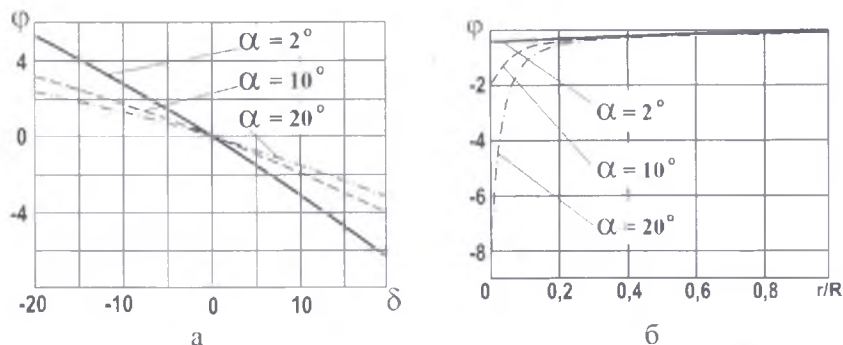


Рис. 3.96 – Залежність кута φ від напрямку та величини зміщення валка δ (а) і радіусу заготовки (б) при різних кутах нахилу валка

Аналіз отриманих залежностей показує, що при додатному зміщенні вершини валка (від осі обертання заготовки в напрямку плями контакту) матеріал тече від центру заготовки ($\varphi < 0$), а при від'ємному – до центру ($\varphi > 0$). Інтенсивність течії не симетрична відносно нульового зміщення, тобто матеріал більш інтенсивно тече у напрямку від центру. При збільшенні кута α інтенсивність відцентрові течії збільшується. Максимальна інтенсивність течії спостерігається на відстані $r < 0,2R$ від центру заготовки (рис. 3.96, б).

Встановлений вплив активних сил тертя на характер течії матеріалу наглядно представлено на рис. 3.97, що дозволило розробити ряд сферичних процесів штампування обкочуванням.

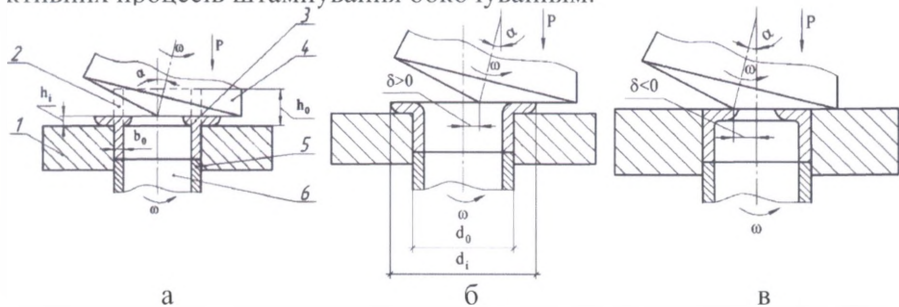


Рис. 3.97 – Положення валка і характерні геометричні параметри заготовки при висаджуванні розкочуванням буртів: а – зовнішніх і внутрішніх; б – зовнішніх; в – внутрішніх; 1 – матриця; 2 – заготовка; 3 – виріб; 4 – валок; 5 – штовхач; 6 – оправка

На рис. 3.98, а показано характер розподілу ізоліній інтенсивності деформацій і напружень в перерізі зовнішнього бурта трубної заготовки із сталі 30ХГСА, а на рис. 3.98, б – в перерізі кільцевої заготовки складного профілю з міді М0б, виготовлених торцевим розкочуванням.

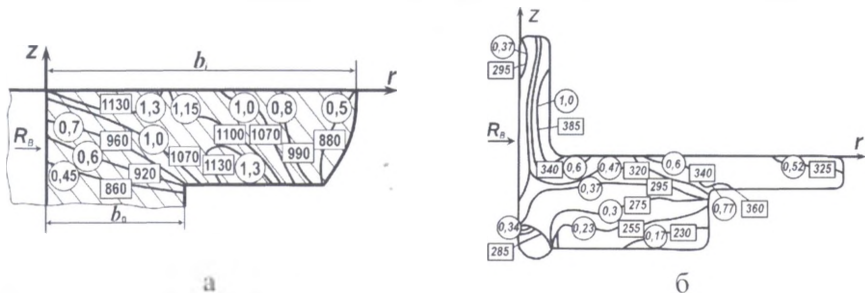


Рис. 3.98 – Характер розподілу в перерізі зовнішнього бурта трубної заготовки (а) і кільцевої заготовки (б), параметрів $e_u = const$, $\sigma_u = const$ за результатами вимірювання твердості

Дослідження операції висаджування торцевим розкочуванням на трубних заготовках зовнішніх буртів з вільною поверхнею здійснювали також із застосуванням методу сіток та імітаційного моделювання за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ).

На рис. 3.99 представлені результати розрахунків інтенсивності деформацій в перерізі бурта осаджуваного торцевим розкочуванням, а на рис. 3.100 – показника жорсткості напруженого стану η протягом операції висаджування для точок, що знаходяться на вільній поверхні та в перерізі бурта [23].

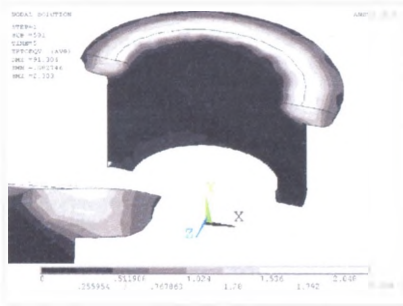


Рис. 3.99 – Розподіл інтенсивності деформацій в перерізі бурта, отриманий МСЕ

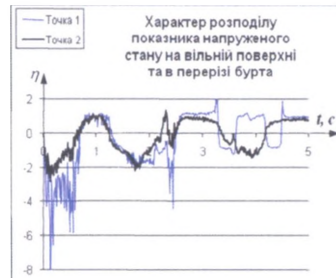


Рис. 3.100 – Розподіл показника η на вільній поверхні і в перерізі бурта

На рис. 3.101 представлені діаграми пластичності металів і шляхи деформування матеріалу вільної поверхні зовнішніх буртів при їх висаджуванні, в залежності від параметрів торцевого розкочування.

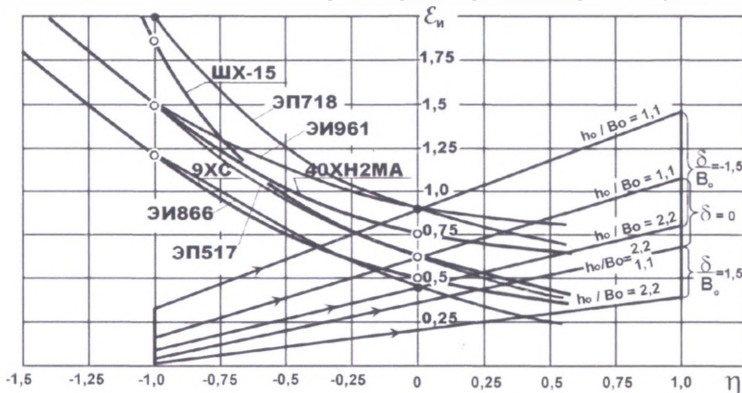


Рис. 3.101 – Діаграми пластичності сталей і сплавів —○— та шляхи деформування —>— вільної поверхні периферійної частини буртів в процесі висаджування розкочуванням (h_0 , b_0 – вихідна під розкочування висота і товщина стінки трубної заготовки)

Деформованості заготовок в реальному технологічному процесі залежать від схеми формозміни, пластичності матеріалу, параметрів процесу і заготовки. Найбільш небезпечними через руйнування схемами ШО є висадка зовнішнього бурта, роздача та відбуртовка трубних заготовок.

При висадці зовнішніх буртів гранична до руйнування деформація зменшується із збільшенням відношення висоти виставленої під розкочування частини заготовки до товщини стінки h_0/s_0 . До погіршення умов деформованості приводить зміщення вершини конічного валка від осі заготовки у напрямку плями контакту внаслідок появи в приконттактних шарах заготовки напружень розтягу від дії сили тертя.

На основі критерію деформованості В.А. Огороднікова [1] отримано значення граничного діаметру зовнішнього бурта розкочувальної заготовки, яке описується співвідношенням:

$$d_p = d_0 \cdot \exp\left\{0,865 \cdot e_{*c}(\eta = 0) \cdot \exp(-\eta_k \ln \lambda) w - 0,14 \cdot [e_{*c}(\eta = 0) \cdot \exp(-\eta_k \ln \lambda) w]^2\right\}, \quad (3.41)$$

де η_k – значення показника η в точці перетину шляху деформування часток матеріалу небезпечної зони заготовки із діаграмою пластичності; w – коефіцієнт впливу історії деформування на пластичність. При висаджуванні розкочуванням зовнішніх буртів $w = 1,2 \dots 1,35$.

Матеріали із пологою діаграмою пластичності ($\lambda = e_p(\eta = -1)/e_p(\eta = 0) \leq 1,5$) можуть руйнуватись не на вільній поверхні бурта, а в зоні із максимальними деформаціями на відстані S_0 від внутрішньої поверхні вихідної заготовки (рис. 3.98, а). У цьому випадку допустимий ступінь деформації необхідно перевіряти також за граничним ступенем осаджування бурта

$$\frac{h_0}{h_p} = \exp[e_{*c}(\eta = 0) \cdot \exp(1,5 \ln \gamma)]. \quad (3.42)$$

При розкочуванні трубних заготовок за схемою висаджування зовнішніх буртів, у випадку $h_0/s_0 > 2 \dots 2,5$, відбувається викривлення стінки і утворення складки, що є технологічним обмеженням процесу через втрату стійкості заготовки. Для уникнення складкоутворення при розкочуванні заготовок із відносною товщиною стінки $s_0/d_0 < 0,1 \dots 0,12$ і відносною вихідною висотою $h_0/s_0 > 3$ формування зовнішніх буртів можна здійснювати за схемою відбуртовки. Виключення складкоутворення при цьому досягається шляхом зміщення вершини валка від осі заготовки у напрямку плями контакту на величину

$$\delta = \frac{s_0}{(1,5...2)\mu}, \quad (3.43)$$

де μ – коефіцієнт тертя на поверхні валок-заготовка.

Розкочування заготовок за схемою відбуртовки супроводжується появою значних напружень розтягу, тому такому виду розкочування можна піддавати матеріали із високою пластичністю, яка характеризується величиною відносного звуження шийки при розтягу зразка $\psi_u = 60...65\%$.

Переформування розкочуванням квадратних заготовок в круглі (рис. 3.102, а) є ефективним при виготовленні заготовок під наступну витяжку, оскільки наближає виробництво до безвідходного. Зменшенню потоншення центральної частини заготовки сприяє застосування розкочування з невеликим кутом нахилу валка, для чого найкраще підходить процес сферорухомого штампування з $\alpha = 2^\circ$.

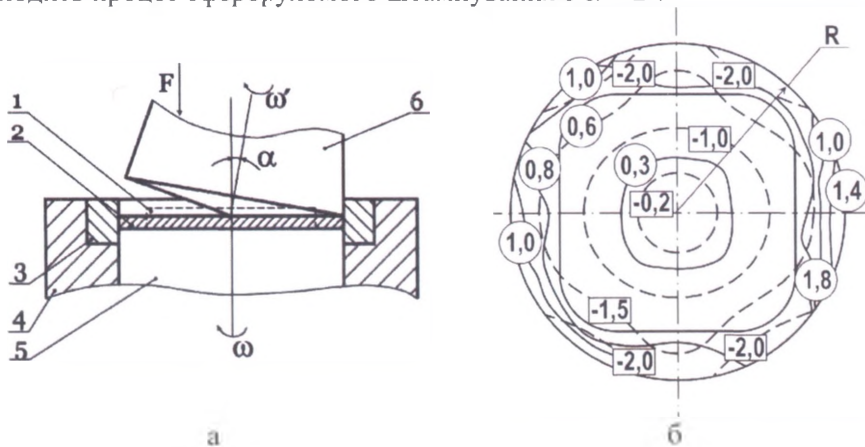


Рис. 3.102 – Схема переформування (а) і характер розподілу (б) інтенсивності деформацій e_u - e_u - \circ та показника

η - \square - переформованої заготовки

На рис. 3.102, б показаний характер розподілу НДС танталової заготовки, переформованої з квадрату на круг діаметром $d = 31$ мм. Мінімальна інтенсивність деформацій ($e_u \leq 0,5e_u^{\max}$) спостерігається в центральній частині заготовки на площі, що обмежена колом з радіусом $r = 0,6R$. Найбільша інтенсивність деформацій досягає значень $e_u^{\max} = 1,2 - 1,4$ на контурі заготовки, поблизу середин сторін вихідного квадрата. Напружений стан змінюється від $\eta = 0 - 0,5$ в центрі за-

готовки (при куті нахилу валка $\alpha > 5^\circ$ тут показник $\eta \approx 1$) до $\eta = -2$ поблизу її периферії і $\eta = -0,7 \dots -1,0$ на бокових поверхнях.

Застосування процесу переформування дозволяє змінити анізотропію механічних властивостей матеріалу заготовок. Покращення характеристик матеріалу переформованих розкочуванням заготовок привело до того, що при витяжці циліндричних виробів величина фестонів зменшилася у 2 – 2,5 рази, а величина граничного ступеня витяжки зросла на 10 – 15%. При цьому зменшилася відносна різниця товщини стінки по периметру витягнутої заготовки, а зміна товщини стінки по її висоті набула лінійного характеру. Що стосується службових характеристик виробів, то використання переформованих танталових заготовок під витяжку корпусів конденсаторів дозволило збільшити електролітичну стійкість конденсаторів в 2 – 3 рази за рахунок формування сприятливої мікроструктури матеріалу та зменшення його пластичного розпушування.

Зі збільшенням кута α при переформуванні заготовки відбувається значне потоншення її центральної частини з наступним руйнуванням матеріалу. Даний ефект можна використати при гарячому розкочуванні для утворення порожнин в центральній частині заготовки і формування кільцевих виробів складного профілю, таких як комірцеві фланці трубопроводів тощо.

Вальцювання заготовок поділяється на наступні види: формувальне – для отримання фасонних заготовок під наступне штампування на пресі або молоті; штампувальне – для отримання штампованих заготовок (виробництво заготовок лопаток гарячим вальцюванням); калібрувальне – для точного холодного вальцювання деталей (виробництво заготовок тонкопрофільних компресорних лопаток).

Формувальне вальцювання використовується переважно в якості підготовчої операції до об'ємного штампування з метою цілеспрямованого перерозподілу металу. Цим забезпечується усунення надмірної нерівномірності деформації і неодночасного заповнення металом порожнини штампі при об'ємному штампуванні; досягнення зростання ступеня деформації та виготовлення якісних штампованих виробів із високим коефіцієнтом використання металу; виготовлення складнопрофільованих виробів, в тому числі з криволінійною віссю; формування сприятливої структури металу та покращення його механічних характеристик [18].

Розвиток процесу вальцювання заготовок на основі моделювання механіки формоутворення заготовок розглянемо на прикладі вальцювання на гладку бочку з наступним формуванням заготовки з криволінійною віссю (рис. 3.103). Криволінійність осі заготовки забезпечували за рахунок збільшення ступеня обтискування з випуклої сторони заготовки шляхом використання гладких конічних валків.

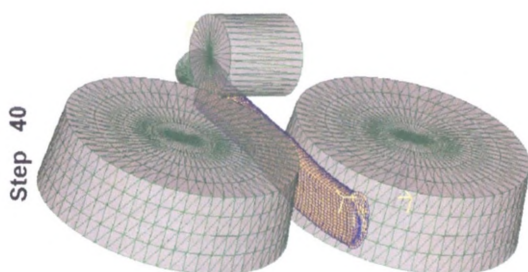


Рис. 3.103 – Схема вальцювання криволінійної заготовки

Дослідження вказаного процесу деформування було проведено в програмному комплексі DEFORM 3D.

Пошкоджуваність металу в програмному комплексі DEFORM 3D обчислюються відповідно до моделі Cockroft-Latham [24]:

$$\int_0^{e_u} \frac{\bar{\sigma}_{\max}}{\sigma_u} \cdot de_u = C, \quad (3.44)$$

де $\bar{\sigma}_{\max}$ – максимальне головне розтягуюче напруження; C – константа матеріалу.

На рис. 3.104 наведено характер розподілу інтенсивності деформацій і використаного ресурсу пластичності в криволінійній заготовці при вальцюванні.

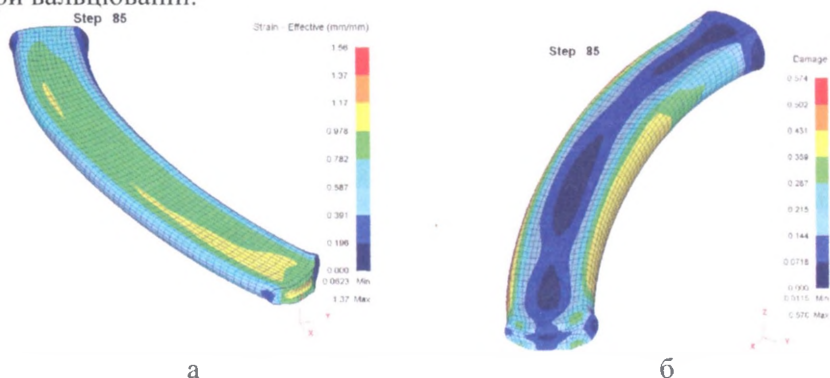


Рис. 3.104 – Характер розподілу інтенсивності деформацій а) і використаного ресурсу пластичності б) в криволінійній заготовці при вальцюванні

Для потенційно найбільш небезпечної частини заготовки з точки зору накопичення пошкоджень проведено аналіз НДС. Суть проведе-

ного аналізу полягала в побудові траскторії деформацій в координатах $\epsilon_{ii} - \eta$ для точки бічної поверхні заготовки.

Траскторії деформацій, які представлені на рис. 3.105, будували на основі табличних значень компонент напружень та накопиченої деформації, отриманих в результаті імітаційного моделювання деформування заготовки в пакеті DEFORM 3D.

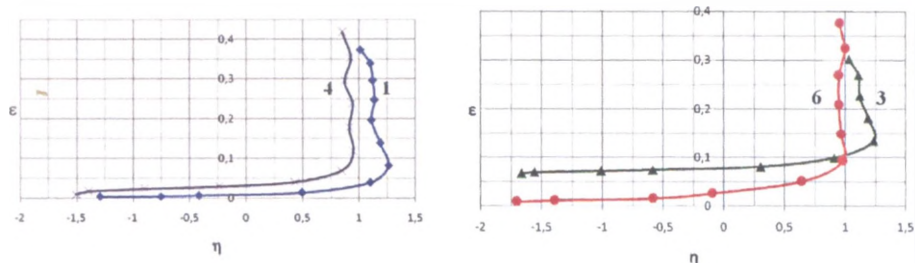


Рис. 3.105 – Траскторії деформацій для різних точок вихідної циліндричної заготовки, побудовані за результатами імітаційного моделювання в програмному комплексі DEFORM 3D: 1, 3 – випукла сторона, 4, 6 – ввігнута сторона виробу

Аналіз результатів моделювання процесу формувального вальцювання свідчить, що на вільній бічній поверхні заготовки буквально на початкових етапах деформування реалізується стабільний напружений стан, близький до одноосного розтягу. Отримана різниця напружено-деформованого стану та рівня обтиснення на різних бічних сторонах заготовки при вальцюванні надає можливість отримання заготовок із криволінійною віссю.

Для дослідження механіки формоутворення заготовок при калібрувальному вальцюванні проводили аналіз деформованого стану пера компресорних лопаток із застосуванням методу ділильних сіток [4]. Аналіз отриманих результатів дозволив виявити основні закономірності зміни деформованого стану заготовок лопаток при вальцюванні. Підтверджено, що найбільшою за абсолютною величиною є деформація по товщині заготовки $e_z < 0$ та поздовжня деформація $e_x > 0$. Поперечна деформація e_y близька до нуля і може приймати невеликі додатні або від'ємні значення в залежності від виду профілю заготовки. На поверхні вальцьованої заготовки спостерігаються значні за площею зони з плоскою деформацією, де $e_{ij} = 0$. До цих зон можна засто-

совувати математичний апарат теорії пластичності, розроблений для плоскої деформації.

На характер деформованого стану заготовки суттєвий вплив чинить зміна виду припуску. При еквідистантному припуску деформація по товщині e_z в поперечному перерізі має найбільше значення поблизу крайок пера лопатки. У випадку припуску пропорційного обтискування, деформація e_z має постійну величину в кожному поперечному перерізі пера заготовки. При цьому втискування валка починається в середній частині поперечного перерізу, де більша абсолютна величина припуску, що приводить до першочергового подовження серединних ділянок пера заготовки. В міру збільшення величини обтискування, поблизу крайок пера утворюється утяжина у вигляді смужки не контактуючого з валками металу, на якій навіть при незначних деформаціях можуть виникати тріщини, а при великих деформаціях відбувається руйнування пера при вальцюванні.

При розрахунках НДС пластичної зони вальцьованої заготовки застосовували методику, основу на методах ліній току, функцій напружень і теорії R -функцій [25, 26]. На рис. 3.106 показано отриманий характер розподілу НДС на ділянці заготовки, розташованій між валками.

Показник жорсткості напруженого стану в зоні деформації змінюється від величин $\eta = 1$ на вході в контакт з валками, до величин під валками $\eta = -3 \dots -5$.

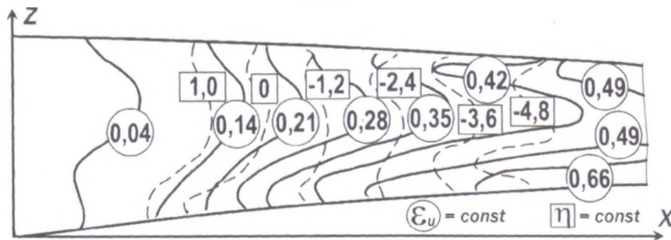


Рис. 3.106 – Характер розподілу НДС в зоні деформації поздовжнього перерізу середини заготовки при вальцюванні

Для вдосконалення процесу вальцювання важливо також знати величину середнього за прохід показника η в зоні деформації. Для до-

сліджених сплавів його величина становить $\eta = -1,2 \dots -1,5$, причому більші за абсолютною величиною значення відповідають матеріалам з діаграмами пластичності, що мають слабку залежність від показника η .

На рис. 3.107, а показаний розподіл по перу лопатки показника η_c при вальцюванні з еквідистантним припуском, а на рис. 3.107, б – при використанні припуску, пропорційного обтискуванню.

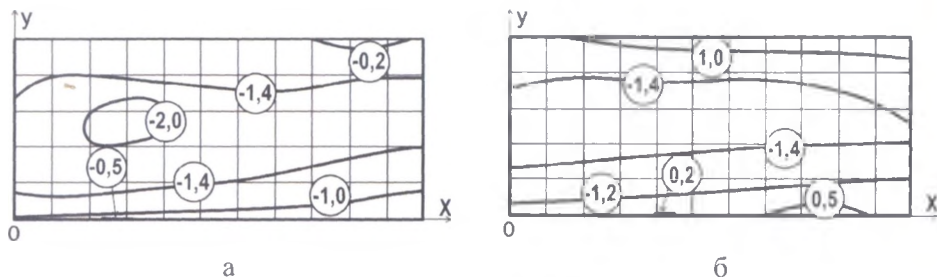


Рис. 3.107 – Розподіл показника η_c по перу лопатки ($x = 0$ – замкова частина) при вальцюванні з припуском еквідистантним (а) та пропорційним обтискуванню (б)

Для забезпечення сприятливих умов вальцювання, за результатами дослідження НДС матеріалу заготовки був запропонований еквідистантний припуск і методика розрахунку форми і розмірів вихідної заготовки [27, 28].

За результатами аналізу деформованості сталей і сплавів на основі використання критеріїв деформованості В.А. Огороднікова [1] і В.М. Михалевича [2] запропоновані критерії інженерної оцінки величини використаного ресурсу пластичності ψ_u для найбільш небезпечних, з точки зору руйнування при вальцюванні, зон заготовки. У випадку вальцювання лопаток з пропорційним величині обтискування припуском, використаний ресурс пластичності небезпечної зони заготовки можна визначити за співвідношенням:

$$\psi_u = \frac{1}{e_*(\eta = 0)} \left(\lambda \ln \frac{C_{\kappa P}^{\kappa P}}{C_{\kappa}^{\kappa P}} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{C_{\kappa}^{\kappa P}}{C_{\lambda}^{\kappa P}} \right), \quad (3.45)$$

де $C_{\kappa}^{\kappa P}$, $C_{\lambda}^{\kappa P}$, $C_{\lambda}^{\kappa P}$ – товщина заготовки поблизу крайок до вальцювання, в момент повного дотику валка до поверхні заготовки в поперечному перерізі та після вальцювання.

Величину використаного ресурсу пластичності при вальцюванні лопаток з еквідистантним припуском можна визначити за формулою:

$$\psi_{II} = \ln \frac{C^{KP}}{C_{II}^{KP}} \frac{1}{\lambda e^*(\eta = 0)} \quad (3.46)$$

Достовірність розрахунків за формулами (3.45) і (3.46) підтверджена розрахунками величини ψ_{II} за критеріями [1, 2], які враховують вплив історії деформування, а також експериментально.

Слід відзначити, що сприятливим еквідистантний припуск є для лопаток з невеликою різницею товщини в поперечному перерізі, коли ступінь деформації поблизу крайок не перевищує більш ніж на 20-30% ступінь деформації посередині поперечного перерізу. При отриманні поблизу крайок відносно більших деформацій даний припуск доцільно використовувати тільки при вальцюванні металів з дуже чутливою пластичністю до схеми напруженого стану. В інших випадках запропоновано використовувати комбінований припуск – пропорційний обтискуванню в зоні найбільших розмірів поперечних перерізів та збільшений поблизу крайок пера до величин, що забезпечують прямолінійність вихідних поперечних перерізів після вальцювання.

Оскільки в процесі експлуатації руйнування лопаток відбувається в зоні, що віддалена від хвостової частини на відстань 0,05...0,2 довжини пера лопатки, то деформаційні пошкодження тут мають бути цілком усунуті термообробкою. Для більшості досліджених металів за такий рівень можна прийняти величину використаного ресурсу пластичності $\psi_{II} \leq 0,4$. На ділянках поблизу кінця пера важливо не допустити руйнування металів при вальцюванні. Тому, якщо вальцювання здійснюється за декілька переходів, обмежуючою тут величиною рекомендується значення $\psi_{II} \leq 0,7$, а на останньому переході – $\psi_{II} < 1$.

Висновки

В роботі шляхом моделювання механіки формоутворення заготовок при локальному деформуванні на прикладах процесів штампування обкочуванням і вальцювання визначені шляхи впливу технологічних параметрів на кінематику течії, напружено-деформований стан і деформованість матеріалу заготовок, що дозволяє цілеспрямовано розвивати і вдосконалювати технологічні процеси локального деформування.

Література

1. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / Огородников В. А. – К. : Выща шк., 1983. – 200 с.
2. Михалевич В.М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1998. – 195с.
3. Матвийчук В.А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография / В.А. Матвийчук, И.С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с.
4. Матвийчук В.А. Совершенствование процесса холодной штамповки вальцовкой компрессорных лопаток на основе анализа деформируемости материалов / В.А. Матвийчук, И.Ф. Корнет, В.Д. Покрас // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – №5. – С. 6-10.
5. Lebedev A.A. On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics/ A. A. Lebedev, V. M. Mikhalevich // Strength of Materials N 35 (3) , Plenum Publishing Corporation (USA), May - June, 2003, 217-224.
6. Лебедев А.А. О выборе инвариантов напряженного состояния при решении задач механики материалов / А.А. Лебедев, В.М. Михалевич // Пробл. прочности. – 2003. – № 3. – С. 5–14.
7. Михалевич В.М. Удосконалення експериментальної частини експериментально-аналітичної методики дослідження напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричних зразків під час віссиметричної осадки [Електронний ресурс] / В.М. Михалевич, Ю.В. Добранюк, Є.А. Трач // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – №4. – Київ: Національна бібліотека ім. В.І. Вернадського. – 2011. – 8 с. – Режим доступу до журн.: http://www.nbuu.gov.ua/old_irn/e-journals/VNTU/2011_4/2011-4.files/uk/11vmmwas_ua.pdf.
8. Михалевич В.М. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стищенні: монографія / В.М. Михалевич, Ю.В. Добранюк. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 180 с. ISBN 978-966-641-532-8
9. Михалевич В.М. Віссиметрична осадка циліндричних заготовок / Михалевич В.М., Красвський В.О., Добранюк Ю.В. // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк: – 2009 – Випуск 25, ч. 1 – С. 241-249. – ISBN 5-7763-8653-5.

10. Mikhalevich V.M. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression / V.M. Mikhalevich, A.A. Lebedev and Yu.V. Dobranyuk // *Strength of Materials*. – Volume 43, Number 6 (2011), P. 591–603, DOI: 10.1007/s11223-011-9332-7.

11. Михалевич В.М. Моделирование пластического деформирования цилиндрического образца при торцевом сжатии / В.М. Михалевич, А.А. Лебедев, Ю.В. Добранюк // *Пробл. прочности*. – 2011. – № 6. – С. 5–22.

12. Гунько І.В. Оцінка деформівності матеріалу заготовок при холодному вальцюванні / І.В. Гунько // *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 7 с.

13. Постановка и решение частного случая основной задачи теории суммирования повреждений / В.М. Михалевич, В.А. Матвийчук, Е.А. Трач, Ю.В. Добранюк, В.С. Зайкова // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2012. – №47(953) – С. 67–71.

14. Узагальнення експериментально-аналітичної методики аналізу процесу осадження / В.М. Михалевич, Ю.В. Добранюк, В.А. Матвійчук, Є.А. Трач // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА. – 2014. – №1(38). – С. 41–47.

15. Михалевич В.М. Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями / В.М. Михалевич, Л.И. Алиева // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА. – 2010. – №3(24). – С. 3–10.

16. Михалевич В.М. Моделирование израсходования ресурса спортсмена на дистанции / В.М. Михалевич, В.А. Краевский, К.Ф. Козлова // *Збір. наук. праць «Фізична культура, спорт та здоров'я нації»*. – Вінниця, 2009. – Випуск 8, Том 2. – С. 103-109. ISSN 2071-5285.

17. Михалевич В.М. Определение оптимальной схемы изменения скорости бега спортсмена на длинной дистанции / В.М. Михалевич, В.А. Краевский, К.Ф. Козлова // *Збір. наук. праць «Фізична культура, спорт та здоров'я нації»*. – Вінниця, 2011. – Випуск 12, Том 2. – С. 155-162. ISSN 2071-5285.

18. Определение возможности появления дефектов при штамповке поковок с применением процесса вальцовки подготовительных ручьев / Скрыбин С.А. , Гунько И.В. , Чайка Д.С. , Бубновская И.А. / *Обрабо-*

тка матеріалів давлением: збірник наукових трудов. – Краматорськ : ДГМА. – 2010. – №3(24). – С. 76–81.

19. Гожій С.П. Розвиток моделі пластичних деформацій при осаджуванні циліндричного зразка обкочуванням / С.П. Гожій // Вестник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПІ». – 2007. – 52. – С. 359–365.

20. Пшенишнюк А.С. Процесс штамповки обкатыванием, специализированное оборудование и методика проектировочных и технологических расчетов / А.С. Пшенишнюк, Л.Т. Кривда // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №5. – С. 26–28.

21. Богоявленский К.Н. Оборудование и технология раскатки прецизионных заготовок / К.Н. Богоявленский, М.Т. Селин, В.В. Лапин. – М.: НИИМаш, 1981. – 82 с.

22. Красевський В.О. Вплив технологічних параметрів на кінематику холодного торцевого розкочування / В.О. Красевський, В.А. Матвійчук, В.М. Михалевич // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: Зб. наук. пр. – Краматорськ – Слов'янськ, 2003. – С. 286–291.

23. Матвійчук В.А. Моделирование высадки торцевой раскаткой наружных буртов на трубных заготовках / В.А. Матвійчук, Л.И. Алиева, С.И. Сухоруков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2009.

24. Матвійчук В.А. Моделювання процесу формування заготовок з криволінійною віссю вальцюванням / В.А. Матвійчук, Ю.В. Добрянюк, В.М. Михалевич // Зб. тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ. 19–23 травня 2014 р. / НТУ «Київський політехнічний інститут». – К., 2014. – С. 12.

25. Matviychuk V. A. Design of cold roll-forging of compressor blades based on workability analysis / V. A. Matviychuk, V. D. Pokras // Proceedings of the 5th International Conference on Technology of Plasticity. Columbus, Ohio, USA. October 7–10, 1996. P. 155–158.

26. Рвачев М.А. Применение метода R-функций для экспериментально-расчетного исследования кинематики деформирования в осесимметричных стационарных процессах ОМД / М.А. Рвачев, В.Д. Покрас // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – №9. – С. 40–42.

27. Оптимизация технологии холодной вальцовки с учетом характеристики усталости лопаток осевых компрессоров / В.П. Егоров, И.Ф. Корнет, В.М. Капралов, В.А. Матвийчук // Проблемы прочности. – 1989. – №5. – С. 89–92.

28. Матвийчук В.А. Разработка процессов изготовления компрессорных лопаток с заданными служебными характеристиками / В. А. Матвийчук // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2006. – №1 (3). – С. 32–36.

Монографія

Богуслаєв Вячеслав Олександрович

Бобир Микола Іванович

Тітов Вячеслав Андрійович

Качан Олексій Якович

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА ОБРОБКИ
МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ**

Комп'ютерна верстка М.Д. Хош

Коректори: О.Є. Носик, Я.В. Обухович, О.І. Пільгусва

Підписано до друку 05.10.16 р.

Формат видання 21×29,7/4. Ум. друк. арк. 15,2. Папір офсетний.

Тираж 350 пр. Замовлення №2799.

АТ «Мотор Січ», просп. Моторобудівників, 15,

м. Запоріжжя, 69068, тел. 720-41-11, 720-42-49.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4213 від 22.11.2011.