

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**Р. І. Сивак, В. А. Огородніков**

# **ХОЛОДНЕ КОМБІНОВАНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ**

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2011

УДК 621.77  
ББК 34.5  
С34

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 24.06.2010 р.)

Рецензенти:

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

**В. А. Тітов**, доктор технічних наук, професор

**Сивак, Р. І.**

С34 Холодне комбіноване видавлювання: монографія / Р. І. Сивак, В. А. Огородніков. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 180 с.  
ISBN 978-966-641-397-3

Розглядається доцільність розробки процесів прямого видавлювання з послідовним радіальним видавлюванням та контурною осадкою з проміжними відпалами. Узагальнено метод оцінки використаного ресурсу пластичності  $\psi$  при немонотонному навантаженні шляхом заміни компонент девіатора пошкоджень компонентами тензора пошкоджень, що дозволило врахувати вплив величини  $\psi$  на перехідних етапах багатопереходних процесів на інтенсивність накопичення пошкоджень. Проведено дослідження радіального видавлювання з контурною осадкою пористих заготовок, отриманих після прямого видавлювання, та розроблено комплексну методику оцінки деформованості пористих заготовок при немонотонній пластичній деформації.

**УДК 621.77**

**ББК 34.5**

**ISBN 978-966-641-397-3**

© Р. Сивак, В. Огородніков, 2011

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
<b>1. РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ.....</b>	<b>6</b>
1.1. Пластична деформація суцільних та пористих матеріалів.....	6
1.2. Напруження при немонотонному навантаженні.....	13
1.3. Накопичення пошкоджень при пластичній деформації. Критерії руйнування.....	21
1.4. Процеси холодного видавлювання.....	28
<b>2. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПРИ НЕМОНОТОННОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....</b>	<b>38</b>
2.1. Визначення кінематики деформування.....	38
2.1.1. Стаціонарні процеси. Метод функцій току.....	38
2.1.2. Розрахунок кінематики деформування на базі сплайн-апроксимації.....	42
2.2. Визначання компонент тензора швидкостей деформацій методом координатних сіток.....	46
2.3. Визначення компонент тензора напружень.....	51
2.4. Визначення компонент тензора напружень при немонотонній деформації.....	56
2.5. Визначення компонент тензора напружень з урахуванням ефектів запізнення.....	64
<b>3. ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ ЗАГОТОВОК У ПРОЦЕСАХ ПОСЛІДОВНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ФОРМОЗМІНИ.....</b>	<b>73</b>
3.1. Побудова поверхні граничної деформації.....	74
3.2. Дослідження процесу видавлювання.....	80
3.3. Дослідження процесу поперечного видавлювання з контурною осадкою.....	93
3.4. Оцінка використаного ресурсу пластичності при комбінованому видавлюванні з проміжними відпалами...	109
3.4.1. Вплив проміжних відпалів на відновлення пластичності.....	110

3.4.2. Оцінка використаного ресурсу пластичності при наявності проміжних відпалів.....	115
3.5 Вплив гідростатичного тиску на пластичність металів	119
<b>4. КОМБІНОВАНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРИСТОЇ ЗАГОТОВКИ.....</b>	<b>124</b>
4.1. Побудова кривої течії матеріалу основи на основі мі-ді.....	124
4.2. Поверхня граничних деформацій.....	130
4.3. Результати розрахунків напружено-деформованого стану та ресурсу пластичності при прямому видавлюван-ні пористої заготовки.....	136
4.4. Поперечне видавлювання з контурною осадкою.....	146
<b>5. РОЗРОБКА ПРОЦЕСІВ НЕМОНОТОННОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ДЕФОРМОВНОСТІ.....</b>	<b>152</b>
5.1. Моделювання процесів пластичної деформації на ос-нові теорії деформовності.....	152
5.2. Оцінка придатності матеріалу для прямого видавлю-вання.....	155
5.3. Оцінка придатності матеріалу для радіального вида-влювання з контурною осадкою.....	158
Висновки.....	162
Література.....	163

## ВСТУП

Підвищення ефективності виробництва за рахунок розвитку, удосконалення існуючих та розробки і впровадження нових ресурсозберігаючих технологій є важливими задачами сучасного машинобудування. Один із шляхів розв'язання цих задач полягає в подальшому розвитку методів оцінки деформовності заготовок, які дозволяють при проектуванні технологічних процесів прогнозувати рівень пошкодження виробів дефектами руйнування. Точність прогнозування якості та технологічної спадковості готових виробів в значній мірі визначається достовірністю та повнотою вихідних даних про залежність пластичності металів від схеми напруженого стану, а також історією навантаження, для визначення якої необхідна повна інформація про напружено-деформований стан у процесі формозміни.

В даний час найбільш поширеним способом обробки металів тиском є холодне об'ємне штампування, яке дозволяє звести до мінімуму або повністю виключити необхідність наступної обробки різанням. Подальший розвиток методів холодного штампування та більш широке впровадження їх у виробництво можливі на основі використання теорії деформовності як при розробці нових способів формозміни, так і при раціональному, з точки зору деформовності, об'єднанні існуючих операцій та створенні нових комбінованих процесів. Аналіз таких процесів неможливий без врахування ефекту Баушингера.

При пластичній деформації, особливо пористих матеріалів, паралельно з процесами накопичення пошкоджень проходять процеси заліковування. Інтенсивність цих процесів залежить від історії навантаження, яка визначається параметрами процесу, можливості зміни яких часто обмежені. Одним з ефективних методів відновлення запасу пластичності є проміжні відпали, результати яких залежать від величини використаного ресурсу пластичності. Відомі методи визначення ресурсу пластичності не дозволяють оцінювати комплексний вплив немотонності навантаження та проміжних відпалів на пластичність. У зв'язку з цим залишається актуальною проблема прогнозування пластичності металів при розробці комбінованих процесів холодного видавлювання з проміжними відпалами.

# 1. РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

## 1.1. Пластична деформація суцільних та пористих матеріалів

Для підвищення ефективності процесів обробки металів тиском необхідний подальший розвиток теорії деформовності та методів розв'язку крайових задач сучасної теорії пластичності. Важливий внесок у розвиток теорії деформовності та технологічної механіки зробили І. С. Алієв, Ю. А. Алюшин, Я. Є. Бейгельзімер, С. І. Губкін, В. М. Данченко, Г. Д. Дель, А. М. Дмитрієв, Б. А. Друянов, А. А. Костава, В. Л. Колмогоров, Ю. Г. Калпін, О. М. Лаптев, Н. Н. Малінін, Є. М. Макушок, І. Ф. Мартинова, В. М. Михалевич, О. В. Нахайчук, А. А. Нотич, А. Г. Овчінніков, В. А. Огородніков, О. С. Пшенишнюк, Є. О. Попов, І. П. Рене, О. А. Розенберг, В. Д. Рудь, Г. П. Сердюк, В. В. Скороход, Г. А. Смірнов-Аляєв, Д. В. Хван, Є. П. Унков, Ю. К. Філіпов, Н. А. Шестаков, М. Б. Штерн, С. П. Яковлєв, Р. Дж. Грін, У. Джонсон, М. Ояне та інші.

Процеси пластичної деформації суцільних та пористих тіл займають важливе місце в технологіях отримання виробів із покращеними фізико-механічними характеристиками.

У вивченні деформаційної поведінки суцільних та пористих тіл сформувалось два основних напрямлення: процеси та закономірності пластичної деформації при різних схемах навантаження; проблема оцінки граничних деформацій, які призводять до руйнування. Приведена вище класифікація ґрунтується на існуючих в наш час відмінностях в постановці, методах теоретичного аналізу і кінцевій меті рішення конкретних задач у першому й другому напрямленнях.

У теоретичному описі процесів деформування суцільних та пористих тіл склались такі два напрямлення. Перший суто континуальний підхід, другий – опис за допомогою теорії пластичності відносно простих моделей, які враховують принаймні в головних рисах структурні особливості цих тіл. В подальшому нами буде використана континуальна теорія.

При дослідженні великих пластичних деформацій суцільних тіл найбільш достовірні результати дає теорія течії. Згідно з цією теорією напружений стан визначають миттєві приріст компонент тензора пластичної деформації. Якщо знехтувати компонентами пружної деформації (що допустимо при розвиненій пластичній деформації), то отримаємо [1, 2] рівняння Сен-Венана-Мізеса:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{de_u}{\sigma_u} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma), \quad (1.1)$$

які після ділення на  $dt$  набудуть вигляду

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_u}{\sigma_u} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma), \quad (1.2)$$

де  $d\varepsilon_{ij}$  – компоненти тензора прирощення пластичних деформацій;  $\delta_{ij}$  – дельта (символ) Кронекера;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – компоненти тензора швидкостей деформацій;  $e_u$  – ступінь деформації;  $\sigma_u$  – інтенсивність напружень.

Необхідно відзначити, що швидкості деформацій  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  не визначаються однозначно при заданих напруженнях. При заданих швидкостях деформацій  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  компоненти девіатора напруження  $s_{ij}$  визначаються однозначно.

Співвідношення (1.1) і (1.2) не інтегруються, тобто не зводяться до кінцевих співвідношень між компонентами напруження й деформації. Цей математичний факт відображає залежність результатів розрахунку за рівняннями (1.1), (1.2) від історії деформування. Проте ці рівняння не дозволяють враховувати реверсування навантаження, при якому проявляється ефект Баушингера.

В загальному випадку, для опису напружено-деформованого стану в пластичній області необхідно визначити 15 функцій:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, z, t), \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x, y, z, t), \quad u_i = u_i(x, y, z, t). \quad (1.3)$$

Функції (1.3) не можуть бути довільними, вони пов'язані диференціальними рівняннями руху та нерозривності:

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho w_i, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho v_{i,i} = 0, \quad (1.4)$$

де  $\rho$  – густина деформуємого матеріалу;  $g_i$  – компоненти заданої розподіленої масової сили;  $w_i$  – компоненти вектора прискорення,

$$w_i = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_{i,j} v_j, \quad (1.5)$$

$v_i$  – компоненти вектора швидкості.

Компоненти тензора деформацій  $\varepsilon_{ij}$  пов'язані з компонентами переміщень співвідношеннями Коші:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (1.6)$$

Функції (1.3) можна знайти після розв'язання системи рівнянь (1.4), (1.6). Проте ця система неповна. Необхідно мати ще шість рівнянь. Такими рівняннями, замикаючими систему (1.4), (1.6), є фізичні рівняння, які в теорії течії приймаються у вигляді (1.1) або (1.2).

Співвідношення теорії течії (1.1), (1.2) були отримані більше ста років тому [3]. Проте лише в наш час було встановлено, що ця теорія є наслідком фундаментальних постулатів загальної теорії пластичності для процесів із траєкторією деформації малої кривизни [4, 5].

При формозмінненні заготовки в її матеріалі можуть виникати порушення суцільності. Тому виникає проблема доповнення системи рівнянь, яка дозволяє розраховувати напружено-деформований стан, системою рівнянь, які визначають граничні стани, так як рівняння (1.4)–(1.6) описують тільки суцільне середовище.

Як впливає з викладеного вище, задача теорії пластичності в загальному випадку тримірної деформації полягає в визначенні 15 функцій (1.3), які задовольняють нелінійну систему 15-ти рівнянь (1.4), (1.6), (1.1) або (1.2) в частинних похідних. Крім того, розв'язок крайової задачі повинен задовольняти також певним граничним умовам. Проте в такій постановці розв'язок задачі пластичності поки що не отримано. Тому розроблено цілу низку методів наближених рішень.



Наприклад, розв'язання задачі малих пружнопластичних деформацій можна звести до розв'язання трьох нелінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку відносно трьох компонентів вектора переміщень [6]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\lambda \varepsilon \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - 2\mu \omega(e_u) e_{ij}] + \rho g_i = \rho w_i. \quad (1.7)$$

Рівняння (1.7) отримане після підстановки (1.8) у співвідношення (1.1):

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - 2\mu \omega(e_u) e_{ij} \quad (1.8)$$

і наступною їх підстановкою в рівняння рівноваги (1.4).

Граничні умови на границі можна записати у вигляді

$$u_i = U_i \quad (1.9)$$

або у вигляді

$$[\lambda \varepsilon \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - 2\mu \omega(e_u) e_{ij}] \nu_j = S_i \quad (1.10)$$

де  $\omega(e_u)$  – характеризує деформаційне зміцнення матеріалу і називається функцією А. А. Ільюшина;  $e_{ij}$  – компоненти девіатора деформацій;  $e_u = \sqrt{2e_{ij}e_{ij}}$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$  – пружні сталі,  $\varepsilon = \varepsilon_{ij}\delta_{ij}$ .

При великих пластичних деформаціях найбільш прийнятні результати дають визначальні співвідношення теорії течії (1.2), які перепишемо у вигляді

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\varepsilon}_u} \dot{\varepsilon}_{ij}. \quad (1.11)$$

Проте, співвідношення (1.11) не дозволяє за заданими компонентами тензора швидкостей деформацій повністю визначити всі компоненти тензора напружень. Тому в теорії течії неможлива коректна постановка задачі у швидкостях, аналогічно (1.7). Перепишемо тензор напружень у вигляді

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \sigma \delta_{ij}$$

і підставимо в рівняння рівноваги (1.4) за умови, що  $g_i = \omega_i = 0$ :

$$\frac{\partial(\sigma\delta_{ij} + S_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial\sigma}{\partial x_j}\delta_{ij} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} = 0. \quad (1.12)$$

Підставимо в (1.12) праві частини (1.11) і виразимо компоненти тензора швидкостей деформацій через компоненти вектора швидкостей. В результаті отримуємо систему з трьох диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x_j}\delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] = 0, \quad (1.13)$$

до яких слід додати рівняння нестисливості:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1.14)$$

Таким чином отримуємо систему трьох диференціальних рівнянь (1.13), (1.14) відносно трьох компонент вектора швидкостей та середнього гідростатичного тиску при граничних умовах

$$v_i = V_i, \quad (1.15)$$

$$v_j \left[ \sigma\delta_{ij} + \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} (v_{i,j} + v_{j,i}) \right] = S_i. \quad (1.16)$$

Континуальна теорія пластичного деформування пористих тіл отримала розвиток у роботах [7, 8, 9, 10]. За допомогою цієї теорії стало можливим рішення цілої низки інженерних задач в області обробки тиском пористих тіл.

На цей час при континуальному описі поведінки пористих тіл припускається, що порошки і пористі тіла можуть розглядатися як мікронеоднорідні, але суцільні середовища. В відповідності до основних уявлень механіки континуума припускається, що поведінка об'єктів, які розглядаються, може бути описана за допомогою тензора напружень  $\sigma_{ij}$ , тензора швидкостей деформацій  $\dot{\epsilon}_{ij}$ , густини  $\rho$  або пористості  $\theta$  та інших параметрів  $\chi_k$ . В подальшому розглядаються матеріали, які у всі моменти деформування ізотропні, а тензор напружень вважа-

ється симетричним. Розглядаються процеси, при яких температура помітно не впливає на характер їх протікання.

При формулюванні визначальних рівнянь використовується підхід, пов'язаний із заданням властивостей дисипативної функції [7, 11–14]. Поведінка матеріалу вважається відомою, якщо задана функція

$$D = D(e_{ij}, \rho, \chi_k), \quad (1.17)$$

причому

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial D}{\partial e_{ij}} \quad (1.18)$$

і, крім того, визначені співвідношення

$$\frac{\dot{\theta}}{1-\theta} = -\frac{\dot{\rho}}{\rho} = \dot{e}_{ij} \delta_{ij}; \quad \dot{\chi}_k = A_k(\dot{e}_{ij}, \theta, \chi_k), \quad (1.19)$$

де  $A_k$  – функції, однорідні відносно першої степені  $\dot{e}_{ij}$ .

Якщо припустити, що треті інваріанти не впливають на поведінку об'єктів, що розглядаються, то з врахуванням ізотропії співвідношення (1.17–1.19) набудуть вигляду

$$D = D(\dot{e}, \dot{\gamma}, \theta, \chi_k); \quad (1.20)$$

$$p = \frac{\partial D}{\partial \dot{e}}, \tau = \frac{\partial D}{\partial \dot{\gamma}}; \quad (1.21)$$

$$\sigma_{ij} - p\delta_{ij} = \frac{\tau}{\gamma} \left( \dot{e}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{e} \delta_{ij} \right); \quad (1.22)$$

$$\dot{\theta} = (1-\theta)\dot{e}; \quad (1.23)$$

$$\dot{\chi}_k = A_k(\dot{e}, \dot{\gamma}, \theta, \chi_k), \quad (1.24)$$

де  $3p$  і  $\dot{e}$  – перші інваріанти тензорів  $\sigma_{ij}$  і  $\dot{e}_{ij}$ ;  $\tau$  і  $\dot{\gamma}$  – квадратні корені із других інваріантів їх девіаторів.

В зазначених припущеннях тензорні визначальні співвідношення (1.22) лінійні і виражають подібність девіаторів напружень і швидкос-

тей деформації для будь-яких видів незворотної деформації об'ємно стискуваних матеріалів. Їх реологічні особливості виражаються скалярними визначальними рівняннями:

$$P = p(\dot{\epsilon}, \dot{\gamma}, \theta, \chi_k); \quad \tau = \tau(\dot{\epsilon}, \dot{\gamma}, \theta, \chi_k), \quad (1.25)$$

які повинні бути узгоджені з (1.19) і (1.21).

Пластична поведінка матеріалу не залежить від часу. Тому функція  $D$  – однорідна першого ступеня від  $\dot{\epsilon}$  і  $\dot{\gamma}$  [11, 12], а  $p$  і  $\tau$  залежать від відношення  $\dot{\epsilon}/\dot{\gamma}$  [13]:

$$P = p(s, \theta, \chi_k), \quad \tau = \tau(s, \theta, \chi_k), \quad (1.26)$$

де  $s = \dot{\epsilon}/\dot{\gamma}$ .

Функції  $p$  і  $\tau$  не можуть бути довільними і в силу (1.21) пов'язані рівнянням

$$\frac{\partial p}{\partial s} s + \frac{\partial \tau}{\partial s} = 0. \quad (1.27)$$

Подальші обмеження на них накладаються принципом максимуму Мізеса: як функції від  $s$  обидві величини обмежені (при  $\theta > 0$ ), при цьому  $p$  – монотонно зростаюча, а  $\tau$  – «колоколоподібна» позитивна і наближається до нуля, коли  $|s| \rightarrow 0$  (рис. 1.1) [10].

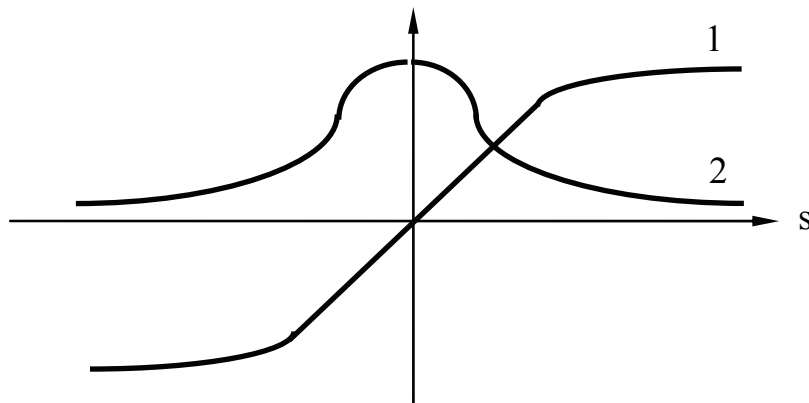


Рис. 1.1. Залежність  $p$  і  $\tau$  від  $s$

Параметр  $s$ , введений М. Б. Штерном [10, 14], є показником деформованого стану. Його значенню, рівному нулю, відповідає чистий зсув; при  $s = -\sqrt{\frac{2}{3}}$  має місце стиск в матриці з жорсткими ідеально

гладкими стінками;  $s = -\infty$  – випадок усестороннього рівномірного стиску.

Явний вигляд виразів (1.26) як функцій від  $s$  може бути встановлений за допомогою спеціальних механічних випробувань, описаних, наприклад, в [15]. Інші, відомі методи описання механіки пластичної деформації пористих тіл [16–20] відрізняються тільки умовою пластичності і видом функції пористості.

## 1.2. Напруження при немонотонному навантаженні

Теорія пластичності металу, який ізотропно зміцнюється, не придатна для кількісної оцінки процесів немонотонного деформування. Крім того, багато особливостей поведінки матеріалів при складному навантаженні можна розглядати як результат прояву ефекту Баушингера. Але справа не тільки в цьому. При розрахунках величини використаного ресурсу пластичності процес накопичення пошкоджень описують тензорними моделями, а напружений стан визначають використовуючи моделі ізотропного зміцнення, що приводить до помилок, величину яких важко оцінити.

За визначенням Г. А. Смірнова-Аляєва [21], деформація називається монотонною, якщо при незмінному значенні параметра Надаї-Лоде  $\mu_\sigma$  напрям головних осей тензора швидкостей деформацій  $T_\xi$  у процесі пластичної деформації збігається з одними і тими ж матеріальними волокнами, а головні швидкості видовжень не змінюють свій знак. Якщо позначити через  $\omega_1$  швидкість обертання матеріальної частинки в процесі деформації, а через  $\omega_2$  – швидкість обертання головних осей  $T_\xi$ , то умову монотонності можна записати у виді  $\omega_1 = \omega_2$  або

$$\varphi = \int_0^t (\omega_1 - \omega_2) d\tau = 0, \text{ де } \varphi \text{ – кут, який характеризує немонотонність розв'язку деформації.}$$

Квазімонотонною будемо називати таку деформацію, при якій має місце поворот матеріальної частинки відносно головних осей  $T_\xi$  в одному з напрямків, тобто  $\omega_1 \neq \omega_2$ , але  $\text{sign}(\omega_1 - \omega_2) = \text{const}$ . Прикладом квазімонотонної деформації є кручення, при якому матеріальні волок-

на повертаються в процесі деформації у напрямку закручування, а головні осі  $T_{\xi}$  залишаються нерухомими ( $\omega_1 \neq 0, \omega_2 = 0, \text{sign} \omega_1 = \text{const}$ ).

Для оцінки впливу немонотонності навантаження на величину напружень і закон їх зміни більшість дослідників пропонують внести зміни в рівняння поверхні навантаження [22]. Найбільш просте рівняння поверхні навантаження, яке дозволяє врахувати анізотропію деформаційного зміцнення, можна одержати, якщо виходити із припущення про жорстке зміцнення поверхні навантаження в напрямку деформування. Однак ця схема дає задовільні результати лише при малих пластичних деформаціях. Значно кращий збіг з експериментальними даними в області великих пластичних деформацій можна одержати, якщо припустити, що поверхня навантаження зазнає переносу й одночасно розширюється рівномірно в усіх напрямках. Якщо ця поверхня в початковому стані описувалась умовою пластичності

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u^2, \quad (1.28)$$

то її зміну в процесі деформування можна описати рівнянням

$$2f(S_{ij}) = (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) - \frac{2}{3} \sigma_u^2 = 0, \quad (1.29)$$

де  $\alpha_{ij}$  – додаткові напруження (мікронапруження) або зміщення центру поверхні навантаження в просторі девіатора напружень;  $\sigma_u$  – інтенсивність напружень, яка пов'язана з накопиченою деформацією  $e_u$  залежністю  $\sigma_u(e_u)$ , єдиною для різних напружених станів і видів навантаження:

$$e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u d\tau, \quad (1.30)$$

де  $\dot{\epsilon}_u$  – інтенсивність швидкостей деформацій;  $t$  - час деформування.

Величину  $e_u$  можна також розглядати як довжину траєкторії деформування в просторі вектора деформацій.

Згідно із законом пластичної течії:

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda(S_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (1.31)$$

можна записати, що

$$d\varepsilon_{ij}d\varepsilon_{ij} = d\lambda^2(S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}); \quad (1.32)$$

тоді

$$d\lambda = \frac{2}{3} \frac{de_u}{\sigma_u}.$$

Отримані співвідношення дозволяють записати рівняння стану для анізотропного зміцнення у вигляді

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \frac{de_u}{\sigma_u} (S_{ij} - \alpha_{ij}). \quad (1.33)$$

Для визначення залежності коефіцієнта Баушингера  $\beta = \sigma''_u / \sigma'_u$  від величини ступеня деформації  $e_u$  проводять такі експериментальні дослідження. Зразки розтягують до різних значень  $e_u$  і знімають навантаження. Потім із них вирізають зразки на стиск таким чином, щоб деформація стиску проходила в напрямку попереднього розтягу. Згідно з (1.33) можна записати [22]:

$$\sigma'_u - \frac{3}{2} \alpha_{11} = \sigma_u. \quad (1.34)$$

При наступному стиску вздовж тієї ж осі до появи пластичного стану  $\alpha_{ij}$  не змінюється, тому із (1.33) витікає, що

$$\sigma''_u + \frac{3}{2} \alpha_{11} = \sigma_u. \quad (1.35)$$

З рівнянь (1.34) і (1.35) знаходимо

$$\sigma_u = \frac{1+\beta}{2} \sigma'_u; \quad \alpha_{11} = \frac{1-\beta}{3} \sigma'_u, \quad (1.36)$$

де  $\sigma''_u$  – границя текучості при стиску;  $\sigma'_u$  – границя текучості при розтягу, після якого виконана деформація стиску до  $\sigma''_u$ .

На рис. 1.2 наведені графіки  $\beta(e_u)$  [22]. Як видно із графіків (див. рис. 1.2), при  $e_u > 0,03$  можна вважати, що  $\beta = const$ .

Для визначення  $\alpha_{ij}$  різні дослідники пропонують різні підходи. Ю. І. Кадашевич і В. В. Новожилов [23] вважають, що

$$\alpha_{ij} = y(a_0)\epsilon_{ij}, \quad (1.37)$$

де  $a_0 = \sqrt{\frac{2}{3}}\alpha_{ij}\alpha_{ij}$  – інтенсивність додаткових напружень.

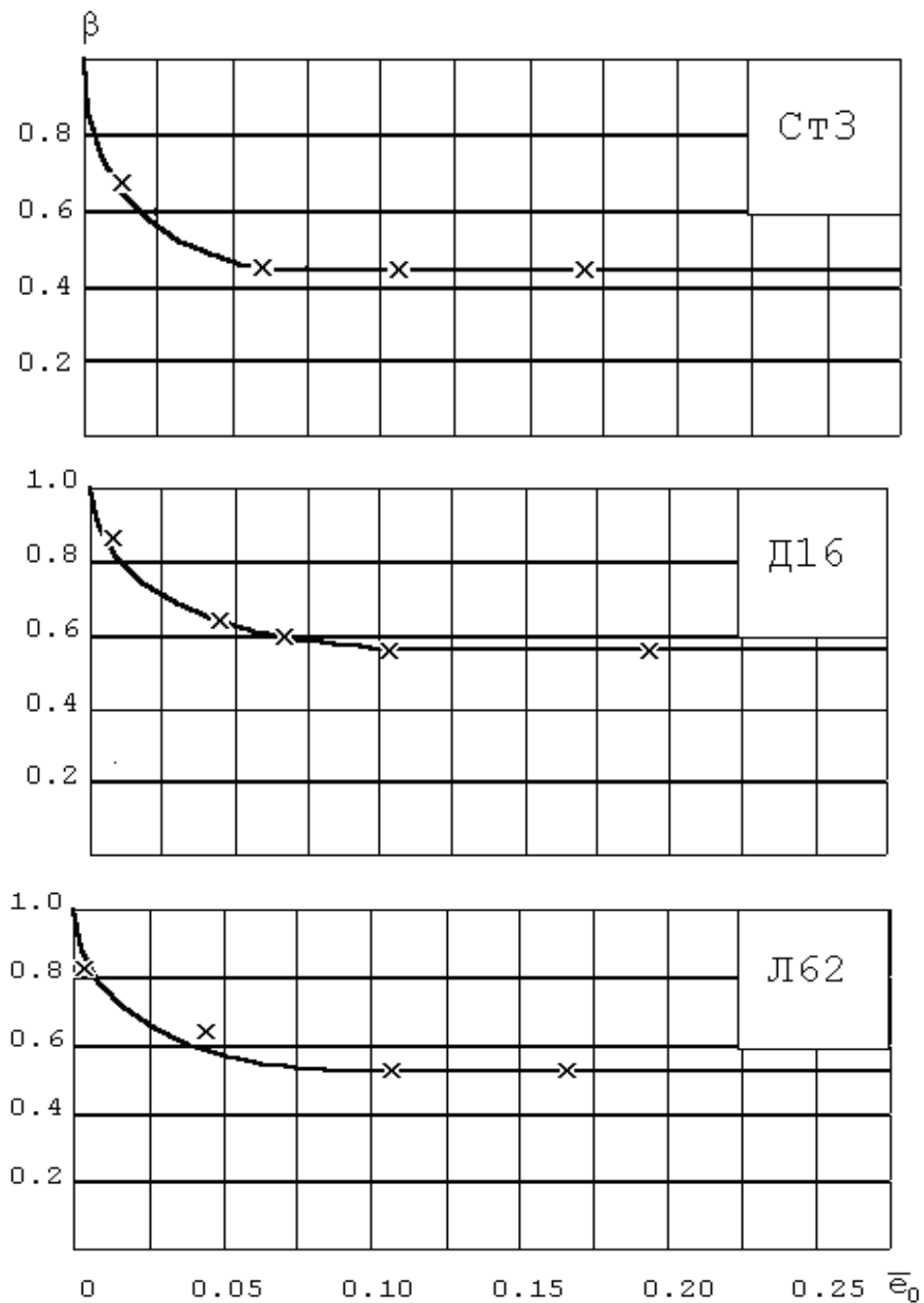


Рис. 1.2. Залежність коефіцієнта  $\beta$  від пластичної деформації



Узагальнюючи ці співвідношення на область великих пластичних деформацій можна записати:

$$\alpha_{ij} = \varphi(e_u)e_{ij}, \quad (1.38)$$

де  $e_{ij}$  – логарифмічні деформації.

Якщо підставити (1.38) у (1.36) і врахувати, що при розтягу  $e_{11} = e_u$ , то одержимо

$$\varphi = \frac{1-\beta}{3} \frac{\sigma'_u}{e_u} = \frac{2}{3} \frac{1-\beta}{1+\beta} \frac{\sigma_u}{e_u}. \quad (1.39)$$

Отже

$$\alpha_{ij} = \frac{1-\beta}{3} \frac{\sigma'_u}{e_u} e_{ij} = \frac{2}{3} \frac{1-\beta}{1+\beta} \frac{\sigma_u}{e_u} e_{ij}. \quad (1.40)$$

Наведені співвідношення не описують з достатньою точністю зміну поверхні навантаження при циклічному деформуванні, так як при повному циклі зміни деформації додаткові напруження  $\alpha_{ij}$  за цими співвідношеннями виявляються рівними нулю, що не узгоджується з експериментом.

У зв'язку з цим були запропоновані диференціальні залежності для прирощень  $d\alpha_{ij}$ . Р. А. Арутюнян і А. А. Вакуленко [24] запропонували замість (1.48) рівняння

$$d\alpha_{ij} = A(\sigma_u) d\varepsilon_{ij} \quad (1.41)$$

В роботі Г. Бакхауза [25] прийнято

$$\alpha_{ij} = \int_0^{e_u} B(e_u^*) \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u^*} de_u^*, \quad (1.42)$$

З рівнянь (1.34), (1.35) і (1.42) знаходимо:

$$B = \frac{1}{3} \frac{d}{de_u} [\sigma'_u (1-\beta)]. \quad (1.43)$$

В. Л. Данилов [26] запропонував такі співвідношення для  $\alpha_{ij}$ :

$$\alpha_{ij} = \frac{2}{3} \alpha \int \frac{d\sigma_u}{de_u} d\varepsilon_{ij}, \quad (1.44)$$

де  $\alpha$  – параметр, який характеризує схильність матеріалу до зміцнення.

При розтягу

$$\alpha_{11} = \frac{2}{3} \alpha \int_{\sigma_m}^{\sigma'_u} d\sigma_u = \frac{2}{3} \alpha (\sigma'_u - \sigma_m), \quad (1.45)$$

де  $\sigma_T$  – границя текучості;  $\gamma = \sigma_T / \sigma'_u$ .

В роботах [26, 27] зроблено спробу разом з розширенням і переміщенням поверхні навантажування врахувати її поворот у процесі деформування матеріалу й зміну співвідношення осей. В роботі [27] запропоновано таке рівняння поверхні навантаження:

$$2\Phi = N_{ijkl} (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{kl} - \alpha_{kl}) - \frac{2}{3} \sigma_m^2 = 0, \quad (1.46)$$

де  $N_{ijkl}$  – тензор поточних параметрів анізотропії, який описується рівнянням

$$N_{ijkl} = \frac{1}{2} \delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{1}{2} \delta_{jk} \delta_{il} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} + \alpha \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}, \quad (1.47)$$

де  $\alpha$  – стала матеріалу, яка визначається експериментально.

А. Ю. Ішлінський визначає додаткові напруження залежністю

$$\alpha_{ij} = c \varepsilon_{ij}, \quad (1.48)$$

де  $c$  – характеристика матеріалу.

Згідно з дослідженнями Г. Д. Деля [22] рівняння кривої зміцнення, які отримуються з умови (1.46), справедливі лише для обмеженої кількості матеріалів. Тому за пропозицією В. Л. Данилова [26] тензор  $N_{ijkl}$  представляється у вигляді

$$N_{ijkl} = I(e_u) \left( \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{jk} \delta_{il} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) + \int_0^{e_u} A(e_u^*) \left( \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u^*} \frac{d\varepsilon_{kl}}{de_u^*} \right) de_u^*, \quad (1.49)$$

а зміщення  $\alpha_{ij}$  центра поверхні навантаження визначаються співвідношенням, подібним (1.46).

Функції  $I(e_u)$ ,  $A(e_u)$ ,  $B(e_u)$  визначаються експериментально. Їх можна, зокрема, визначити шляхом випробувань матеріалу на розтяг і закручування ряду тонкостінних трубчатих зразків.

Експериментальна перевірка розглянутих теорій виконана Г. Д. Делем [22]. На рис. 1.3 наведено результати досліджень, які проводили на зразках із сталі Ст. 3 і дюралюмінію Д16. Криві 3 отримані на основі теорії, представленій співвідношеннями (1.46), (1.48), (1.49). Як видно з результатів досліджень, результати розрахунку за умовою пластичності (1.40) знаходяться в кращій відповідності до експерименту, ніж результати, основані на умові пластичності (1.46).

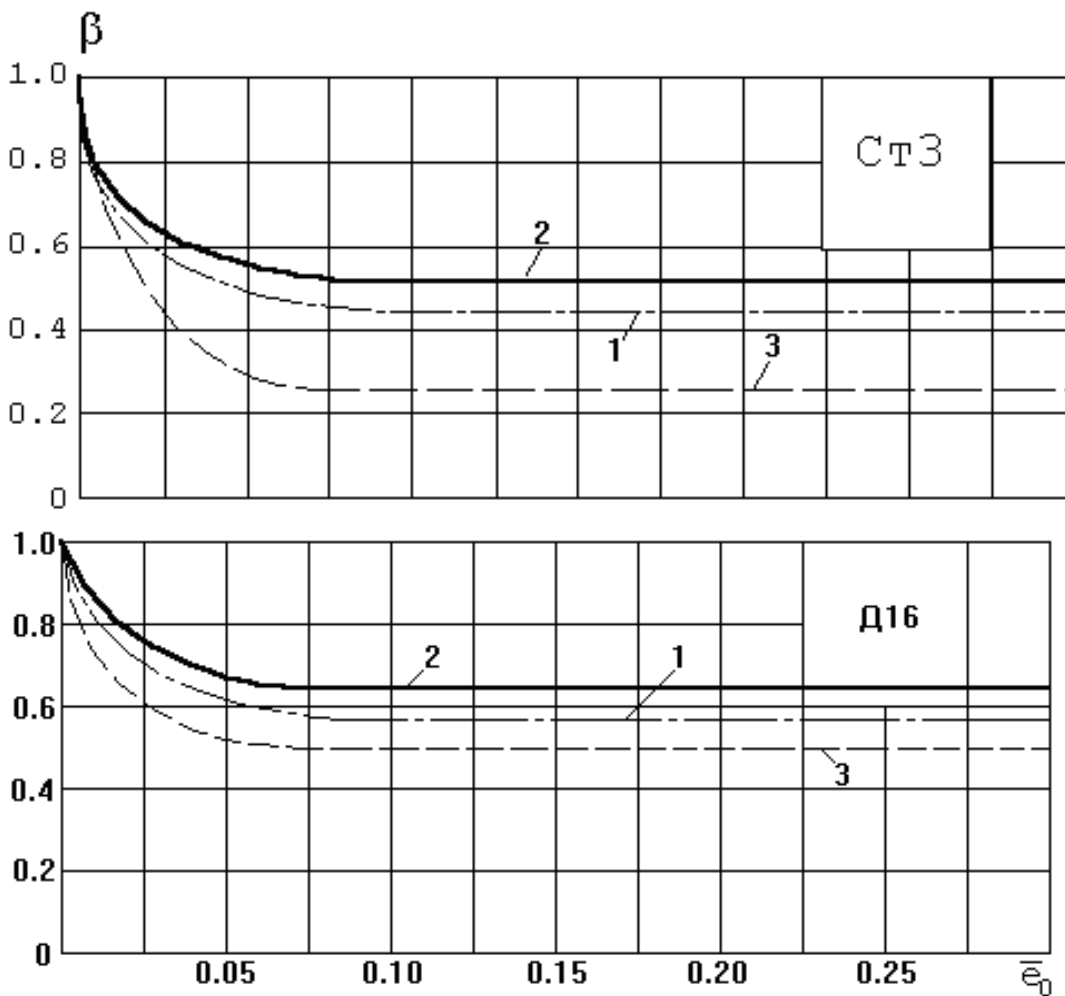


Рис. 1.3. Порівняння результатів експериментальної перевірки рівнянь поверхні навантаження з розрахунком:

*1 – експеримент; 2,3 – розрахунок*

В роботі [22] для експериментальної перевірки залежностей, які визначають тензор додаткових напружень  $\alpha_{ij}$ , вияснено, із якою точні-

стю розглянуті теорії описують діаграму стиску розтягнутого матеріалу. Для цього співставленні експериментальні результати й результати, отримані за різними варіантами теорії, основаними на рівнянні поверхні навантаження (1.40). Експериментальна перевірка, виконана для сталей Ст. 3, сталі 20 і алюмінію АМГ розтягнутих до деформації  $0,025 \leq e_u \leq 0,180$

$$\alpha_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_m \int_0^{e_u} V(e_u^*) \left( \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u^*} \right) de_u^*. \quad (1.50)$$

Наведені на рис. 1.4 результати дозволяють зробити висновок, що рівняння (1.38) (Крива 3) знаходяться в дещо кращій відповідності до експерименту, ніж рівняння (1.48) (Крива 4) і (1.46) (Крива 5). Із збільшенням деформації перед розвантаженням точність рівнянь (1.48) і (1.46) зменшується. У всіх випадках розрахункові значення напруження при стиску менші дійсних.

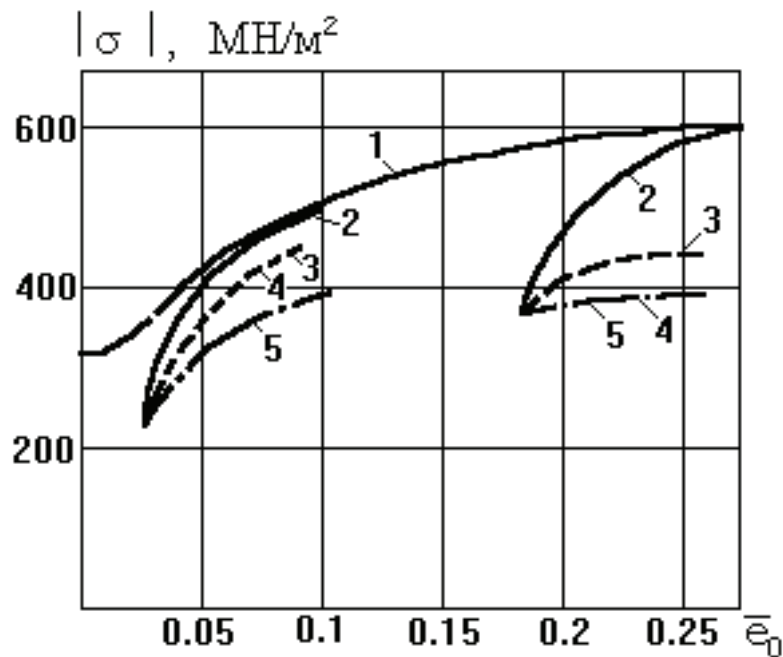


Рис. 1.4. Порівняння експериментальних і розрахункових діаграм деформування розтягнутого матеріалу:

- 1 – розтяг (експеримент); 2 – стиск після розтягу (експеримент);  
 розрахункові діаграми при визначенні додаткових напружень;  
 3 – за (1.38); 4 – за (1.48); 5 – за (1.46)

Г. Д. Дель [22] відмічає, що використання в якості параметра зміцнення накопиченої пластичної деформації (параметра Удквіста) не

## ЛІТЕРАТУРА

1. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.
2. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
3. Сен-Венан Б. Об установлении уравнений внутренних движений, возникающих в твердых пластических телах за пределами текучести / Б. Сен-Венан // Теория пластичности : сб. статей. – М. : Издательство иностранной литературы, 1948. – С. 11–19.
4. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М. : Издательство АН СССР, 1963. – 272 с.
5. Ленский В. С. Гипотеза локальной определенности в теории пластичности / В. С. Ленский // Изв. АН СССР. – 1962. – №5 : Механика и машиностроение. – С. 154 – 158.
6. Кийко И. А. Теория пластического течения / И. А. Кийко // Вопросы прочности и пластичности: сборник. – М. : Издательство МГУ, 1984. – С. 53–64.
7. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания / В. В. Скороход. – Киев : Наукова думка, 1972. – 152 с.
8. Ковальченко М. С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением / М. С. Ковальченко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 240 с.
9. Перельман В. Е. Формование порошковых материалов / В. Е. Перельман. – М. : Металлургия, 1979. – 232 с.
10. Феноменологические теории прессования порошков / [М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк, Л. А. Максименко и др.]. – Киев : Наукова думка, 1982. – 140 с.
11. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1970. – Т. 1. – 256 с.
12. Циглер Г. Экспериментальные принципы термодинамики необратимых процессов и механики сплошной среды / Г. Циглер. – М. : Мир, 1966. – 135 с.
13. Штерн М. Б. Определяющие уравнения для уплотняемых пластических пористых тел. / М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 1981. – № 4. – С. 17–23.

14. Штерн М. Б. К теории пластичности пористых тел и уплотняемых порошков / М. Б. Штерн // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. – Киев : Наукова думка, 1985. – С. 12–23.
15. Рудь В. Д. Экспериментальная проверка гипотез пластичности пористых тел / В. Д. Рудь, В. З. Мидуков // Порошковая металлургия. – 1982. – № 1. – С. 14–20.
16. Лаптев А. М. Технологические задачи теории обработки давлением пористых материалов / А. М. Лаптев // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. – Киев : Наукова думка, 1985. – С. 68–76.
17. Shima S. Plasticity theory for porous metals / S. Shima, M. Oyane // Int. J. Mech. Sci. – 1976. – № 6. – P. 285–291.
18. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов / Г. Л. Петросян. – М. : Металлургия, 1988. – 225 с.
19. Скороход В. В. Условие пластичности пористых тел / В. В. Скороход, Л. И. Тучинский // Порошковая металлургия. – 1978. – № 11. – С. 83–87.
20. Друянов Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел. / Б. А. Друянов. – М. : Машиностроение, 1989. – 168 с.
21. Смирнов–Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов–Аляев. – М.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
22. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
23. Новожилов В. В. Микронапряжения в конструкционных материалах / В. В. Новожилов, Ю. И. Кадашевич. – Л. : Машиностроение, 1990. – 223 с.
24. Арутюнян Р. А. О многократном нагружении пластической среды / Р. А. Арутюнян, А. А. Вакуленко // Известия АН СССР. – 1965. – № 4: Механика. – С. 53–61.
25. Backhaus G. Zur analytischen Darstellung des Materialverhaltens im plastischen Bereich / G. Backhaus // ZAMM. – 1971. – № 51. – P. 471–477.
26. Данилов В. Л. К формулировке закона деформационного упрочнения / В. Л. Данилов // Известия АН СССР. – 1971. – № 6: Механика твердого тела. – С. 146–150.

27. Baltov A. A rule of anisotropic hardening / A. Baltov, A. Savezuk // Acta Mech. – 1965. – №2. – P. 41–47.

28. Ленский В. С. Современные вопросы и задачи пластичности в теоретическом и прикладном аспектах / В. С. Ленский // Упругость и неупругость, 1978. – Вып. 5. – С. 65–69.

29. Ленский В. С. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упругопластических деформаций / В. С. Ленский // Вопросы теории пластичности. – М. : Из-во АН СССР, 1961. – С. 58–82.

30. Лебедев А. А. Исследование скалярных и векторных свойств анизотропных материалов в условиях сложного напряжённого состояния. Сообщ. 1. Об условии текучести анизотропных материалов / А. А. Лебедев, В. В. Косарчук, Б. И. Ковальчук // Проблемы прочности. – 1971. – № 3. – С. 51–56.

31. Можаровский Н. С. О предельном состоянии материала при изменяющихся во времени напряжениях / Н. С. Можаровский, Е. А. Антипов, Н. И. Бобырь // Вестник КПИ. Сер. Машиностроение, 1976. – Вып. 13. – С. 87–91.

32. Предельное состояние материала при программном изменении интенсивности напряжений в условиях плоского напряжённого состояния при различных траекториях нагружения / [Н. С. Можаровский, Е. А. Антипов, Н. И. Бобырь, А. А. Заховайко] // Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряжённом состоянии : сб. – Киев. – С. 172–179.

33. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Выща школа, 1983. – 175 с.

34. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – Киев : УМК ВО, 1989. – 152 с.

35. Дель Г. Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // Изв. вузов. – 1975. – № 4 : Машиностроение. – С. 135–140.

36. Смирнов–Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов–Аляев. – Л. : Машиностроение, 1968. – 272 с.

37. Теорияковки и штамповки / [Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников и др.]; под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – Машиностроение, 1992. – 720 с.
38. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М : Metallurgy, 1970. – 229 с.
39. Богатов А. А. Экспериментальная проверка условия разрушения металла при различных схемах нагружения / А. А. Богатов, В. Л. Колмогоров, Г. А. Матвеев // Изв. вузов. – 1970. – № 8 : Чёрная металлургия. – С. 76–80.
40. Красневский С. М. Разрушение металлов при пластическом деформировании / С. М. Красневский, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин. – Минск. : Наука и техника, 1983. – 175 с.
41. Пластичность и разрушение / под. ред. В. Л. Колмогорова. – М : Metallurgy, 1977. – 336 с.
42. Богатов А. А. Условие разрушения металлов при знакопеременном деформировании с произвольной формой цикла / А. А. Богатов, В. Л. Колмогоров // Известия вузов. – 1973. – № 4 : Чёрная металлургия. – С. 102–105.
43. Ильюшин А. А. Основы математической теории термовязкоупругости / А. А. Ильюшин, Б. Е. Победря. – М. : Наука, 1970. – 280 с.
44. Ильюшин А. А. Об одной теории длительной прочности / А. А. Ильюшин // Изв. АН СССР. – 1967. – № 3 : Механика твёрдого тела. – С. 21–25.
45. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1998. – 195 с.
46. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К. : Наукова думка, 1984. – 216 с.
47. Кийко И. А. Теория разрушения в процессах пластического течения / И. А. Кийко // Обработка металлов давлением : сб. – Свердловск, 1982. – С. 27–40.
48. Богатов А. А. Экспериментальная проверка условия разрушения металла при немонотонной деформации / А. А. Богатов, В. Л. Колмогоров, О. И. Мижирицкий // Известия вузов. – 1977. – № 10 : Чёрная металлургия. – С. 83–86.



49. Исследования пластичности металлов под гидростатическим давлением / [А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, В. Ф. Шишминцев, Ю. А. Аксенов] // Физика металлов и металловедение, 1978. – т. 45. – Вып. 5. – С. 1089–1094.
50. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1982. – № 11 – С. 28–32.
51. Мишулин А. А. Совершенствованиековки на основе описания деформационной анизотропии пластичности / А. А. Мишулин, В. М. Михалевич // Оптимизацияковки на автоматизированных ковочных комплексах : сб. – М., 1982. – С. 144–161.
52. Мишулин А. А. Тензорно–нелинейная модель накопления повреждений / А. А. Мишулин, В. М. Михалевич // Обработка металлов давлением : сб. – Свердловск, 1985. – С. 10–14.
53. Калпин Ю. Г. Оценка деформационной способности металлов в процессах холодной объёмной штамповки / Ю. Г. Калпин, Ю. К. Филиппов, Н. Н. Беззубов // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. – М., 1988. – вып. 10. – С. 1–16.
54. Холодная и полугорячая штамповка на прессах. Методические рекомендации / [В. А. Головин, В. А. Евстратов, Л. И. Рудман и др.] – М. : НИИМАШ, 1981. – 73 с.
55. Холодная объёмная штамповка. Справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого. – М. : Машиностроение, 1973. – 496 с.
56. Ковка и штамповка. Справочник в 4–х т. / под ред. Е. И. Семёнова и др. – Т. 3. Холодная объёмная штамповка / Под ред. Г. А. Навроцкого. – М. : Машиностроение, 1987. – 384 с.
57. Оптимизация технологических процессов и конструкций штампов для холодного и полугорячего выдавливания. Методические рекомендации. – М. : ВНИИТЭМР, 1989. – 192 с.
58. Головин В. А. Актуальные проблемы холодной и полугорячей объёмной штамповки / В. А. Головин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 8. – С. 34–35.
59. Чертавских А. К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением / А. К. Чертавских, В. К. Белосевич. – М. : Машиностроение, 1968. – 364 с.

60. Головин В. А. Технология холодной объёмной штамповки выдавливанием / В. А. Головин, А. Н. Митькин, А. Г. Резников. – М. : Машиностроение, 1970. – 152 с.

61. Штейн Ф. С. Перспективы внедрения жидких технологических смазочных материалов при холодной высадке / Ф. С. Штейн, Г. К. Санакоев // Кузнечно–штамповочное производство. – 1986. – № 7. – С. 12–13.

62. Фам Зыонг. Эффективность применения новых технологических смазок при холодном объёмном деформировании: Автореферат дис... канд. техн. наук : ЛПИ. – Л., 1985.

63. Евстратов В. А. Состояние, направления развития и проблемы холодного и полугорячего выдавливания / В. А. Евстратов // Кузнечно–штамповочное производство. – 1985. – № 10. – С. 10–11.

64. Ганаго О. А. Совершенствование производства крепёжных изделий холодной объёмной штамповкой / О. А. Ганаго, В. А. Пикулин, П. С. Лернер // Кузнечно–штамповочное производство. – 1982. – № 3. – С. 29–32.

65. Артес А. Э. Холодная объёмная штамповка в мелкосерийном и серийном производстве / А. Э. Артес. – М. : НИИМАШ, 1982. – 58 с.

66. Кудрявцев Л. В. Опыт изготовления деталей методами холодного выдавливания и сферической штамповки / Л. В. Кудрявцев, Н. С. Королёва. – Л. : ЛДНТП, 1981. – 36 с.

67. Кузнецов А. В. Штамповка поковок выдавливанием в разъёмных матрицах (состояние и перспективы) / А. В. Кузнецов, О. В. Протопопов, В. Т. Ключков // Кузнечно–штамповочное производство. – 1980. – № 11. – С. 2–6.

68. Кузнецу–штамповщику. Справочное пособие / [Л. Н. Соколов, В. Н. Ефимов, Ю. А. Кащенко, и др.]. – Донецк : Донбас, 1986. – 144 с.

69. Миропольский Ю. А. Современные тенденции развития технологии холодной объёмной штамповки. Обзор / Ю. А. Миропольский, И. З. Мансуров. – М. : НИИМАШ, 1979. – 80 с.

70. Навроцкий Г. А. Состояние и перспективы развития холодной объёмной штамповки / Г. А. Навроцкий, В. А. Головин // Кузнечно–штамповочное производство. – 1975. – № 1. – С. 24–27.

71. Журавлёв А. З. Основы теории штамповки в закрытых штампах / А. З. Журавлёв. – М. : Машиностроение, 1973. – 224 с.

72. Инженерная теория пластичности / под ред. В. И. Беляева. – Минск. : Наука и техника, 1985. – 288 с.
73. Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
74. Теоретические основыковки и горячей объёмной штамповки / [Е. М. Макушок, А. С. Матусевич, В. П. Северденко, В. М. Сегал.]. – Минск. : Наука и техника, 1968. – 407 с.
75. Шофман Л. А. Теория и расчёты процессов холодной штамповки / Л. А. Шофман. – М. : Машиностроение, 1964. – 375 с.
76. Унксов Е. П. Выбор метода расчёта технологических процессов при обработке металлов давлением / Е. П. Унксов // Кузнечно–штамповочное производство. – 1982. – № 8. – С. 24–26.
77. Томсен Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1969. – 502 с.
78. Алюшин Ю. А. Исследование процессов обработки металлов давлением с помощью кинематически возможных полей скоростей: учебное пособие / Ю. А. Алюшин. – Ростов н/Д. : РИСХИ, 1978. – 98 с.
79. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А. Г. Овчинников. – М. : Машиностроение, 1983. – 200 с.
80. Томлёнов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томлёнов. – М. : Metallургия, 1972. – 408 с.
81. Чудаков П. Д. Усилие горячего выдавливания в боковые каналы / П. Д. Чудаков, А. В. Кузнецов // Кузнечно–штамповочное производство. – 1971. – № 3. – С. 3–6.
82. Теория обработки металлов давлением / Под ред. И. Я. Тарновского. – М. : Metallургиздат, 1963. – 672 с.
83. Степанский Л. Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М. : Машиностроение, 1982. – 217 с.
84. Степанский Л. Г. Пластическое течение металла при двусторонней закрытой прошивке / Л. Г. Степанский // Кузнечно–штамповочное производство. – 1964. – № 3. – С. 9–11.
85. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
86. Сегал В. М. Технологические задачи теории пластичности / В. М. Сегал. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.

87. Теория пластических деформаций металлов / [Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.]; под. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.

88. Чумаченко Е. Н. Автоматизированное проектирование процессов изотермической штамповки на базе программного комплекса «SPLEN» / Е. Н. Чумаченко, А. В. Семянистый, Н. Н. Грунин // Кузнечно–штамповочное производство. – 1993. – № 2. – С. 13–15.

89. Oh S. I. Finite element analysis of metal forming processes with arbitrarily shaped dies / S. I. Oh // In. J. Mech. Sci. – 1982. – № 8. – P. 479–493.

90. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков : Выща шк. Изд-во при Харьк. Ун-та, 1981. – 248 с.

91. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.

92. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков : Выща шк. Изд-во при Харьк. Ун-те, 1987. – 144 с.

93. Ренне И. П. Неравномерность деформации при плоском пластическом течении. Часть I. Стационарное плоское течение / И. П. Ренне, Э. А. Иванова, Э. А. Бойко. – Тула : ТПИ, 1970. – 158 с.

94. Ренне И. П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением / И. П. Ренне. – Тула : ТПИ, 1979. – 96 с.

95. Дель Г. Д. Метод делительных сеток / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – М. : Машиностроение, 1979. – 144 с.

96. Дель Г. Д. Экспериментальное исследование неустановившейся стадии холодного выдавливания / Г. Д. Дель, Н. А. Соколов // Известия вузов. – 1974. – № 5 : Машиностроение. – С. 132–136.

97. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением / [П. Н. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин, Н. А. Чиченов]. – М. : Машиностроение, 1974. – 336 с.

98. Огородников В. А. Экспериментально–расчетное определение деформаций в условиях осесимметричного прессования с помощью ЭВМ / В. А. Огородников, В. Д. Покрас // Исследования в области

пластичности и обработки металлов давлением. – Тула, 1985. – С. 49–55.

99. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Metallurgiya, 1973. – 288 с.

100. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением : Справочник / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Metallurgiya, 1982. – 312 с.

101. Перлин И. А. Теория прессования металлов / И. А. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – М. : Metallurgiya, 1975. – 448 с.

102. Обработка металлов давлением в машиностроении / [П. И. Полухин, В. А. Тюрин, П. И. Давидков и др.] – М. : Машиностроение. София : Техника, 1983. – 279 с.

103. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / [А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин и др.]. – М. : Metallurgiya, 1976. – 416 с.

104. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла / В. Джонсон, Х. Кудо. – М. : Metallurgiya, 1966. – 317 с.

105. Voelkner W. Experimentelle Methoden der Ermittlung mittlerer Reibungskenngrößen / W. Voelkner // Fertigungstechnik und Betrieb. – 1976. – № 11. – Р. 5–26.

106. Вдовин В. Ф. Оценка антифрикционных свойств смазки по усилиям деформации при прессовании / В. Ф. Вдовин, В. Ф. Балакин // ОМД. – М. : Metallurgiya (ДМетИ), 1970. – вып. 54. – С. 221–224.

107. Пресняков А. А. Методы изучения удельных сил трения деформации / А. А. Пресняков, А. М. Греков. – Фрунзе : Изд. ФПИ, 1976. – 92 с.

108. Макушок Е. М. Механика трения / Е. М. Макушок. – Минск : Наука и техника, 1974. – 256 с.

109. Павлов И. М. Теория прокатки / И. М. Павлов. – М. : Metallurgizdat, 1950. – 610 с.

110. Исаченков Е. И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1978. – 208 с.

111. Voelkner W. Verfahrenskombination Stauchen und Seitwärtsauspressen / W. Voelkner, H. J. Mewes // Fertigungstechnik und Betrieb. – 1971. – N 4. – Р. 238–241.

112. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М. : Металлургия, 1947. – 532 с.
113. Прозоров Л. В. Прессование стали / Л. В. Прозоров. – М. : Машгиз, 1956. – 158 с.
114. Schmitt G. Untersuchungen über des Rückwartshapfließpressen von Stahle bei Rahmtemperatur / G. Schmitt // Dr. Inf. Diss. TH Stuttgart. –1967.
115. Михайлов В. Г. Пластическая деформация труднодеформируемых металлов с использованием диагонального и сдвигового течения / В. Г. Михайлов, А. А. Мишулин, С. А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 2. – С. 4–5.
116. Девятов В. В. Малоотходная технология обработки металлов давлением / В. В. Девятов. – М. : Машиностроение, 1986. – 288 с. (Рец.: Ерманок М. З. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 9. – С. 41.)
117. Леванов А. Н. Принципиальные основы нового метода закрытой штамповки с компенсацией избытка металла / А. Н. Леванов // Обработка металлов давлением. Вып. 8. – Свердловск : УПИ. – 1981. – № 2. – С. 110–115.
118. Охрименко Я. М. Процессы деформации с активным действием сил трения: Учебное пособие / Я. М. Охрименко, В. Н. Щерба, А. В. Гусев. – М. : Машиностроение, 1982. – 56 с.
119. Ганаго О. А. Актуальные задачи развития кузнечно-штамповочного производства / О. А. Ганаго // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 8. – С. 6–8.
120. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 1–4.
121. Гусинский В. И. О возможностях процессов холодного прессования / В. И. Гусинский // Разработка и исследование ОМД. ЭНИК-маш. – М. : Машиностроение, 1968. – Вып. 19. – С. 45–56.
122. Людвик П. Основы технологической механики / П. Людвик // Расчеты на прочность. – М. : Машиностроение, 1970. – Вып. 15. – С. 130–166.
123. Овчинников А. Г. Штамповка выдавливанием поковок с боковыми отростками и с фланцами / А. Г. Овчинников, О. Ф. Дрель,

И. С. Поляков // Кузнечно–штамповочное производство. – 1979. – № 4. – С. 10–13.

124. Богоявленский К. Н. Повышение качества деталей, получаемых холодным радиальным выдавливанием / К. Н. Богоявленский, И. С. Алиев // Современные технические и технологические методы повышения качества, надёжности и долговечности деталей машин. – Кишинёв : КПИ им. С. Лазо, 1976. – С. 208–213.

125. Алиев И. С. Повышение качества процессов холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев, Л. И. Девиченко, К. Д. Махмудов // Повышение точности в холодноштамповочном производстве. – Л.: ЛДНТП, 1981. – С. 50–55.

126. Алиева Л. И. Верхняя оценка силовых параметров при выдавливании инструментом с криволинейным профилем / Л. И. Алиева, Р. С. Борисов, А. И. Лобанов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ. : ДДМА, 2004. – С. 340–344.

127. Алиев И. С. Формоизменение заготовок при боковом выдавливании / И. С. Алиев, Р. С. Борисов, С. А. Ковляшенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ. : ДДМА, 2003. – С. 111–113.

128. Алиев И. С. Технологические процессы выдавливания с раздачей / И. С. Алиев, О. В. Чучин, А. А. Носаков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ. : ДДМА, 2003. – С. 328–334.

129. Носаков А. А. Технологические возможности комбинированного обратно-поперечного выдавливания в подвижных матрицах / А. А. Носаков, В. М. Гридасов, Г. А. Гамзатов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ. : ДДМА, 2002. – С. 348–351.

130. Алиев И. С. Формоизменение при радиально-прямом выдавливании на оправке / И. С. Алиев, Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Обработка металлов давлением. – Краматорськ. : ДГМА. - 2008. - №1(19). – С. 171–176.

131. Алиев И. С. Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания / И. С. Алиев,

М. С. Грудкина // Обработка металлов давлением. – Краматорськ. : ДГМА. – 2008. – №1(19). – С. 55–60.

132. Оленин Л. Д. К выбору оптимального варианта получения заготовок под точную объёмную штамповку / Л. Д. Оленин // Повышение точности и качества при штамповке. – М. : МДНТП, 1975. – С. 72–79.

133. Быков А. И. Опыт внедрения и перспективы развития процессов холодной объёмной штамповки в автомобилестроении / А. И. Быков, А. И. Митькин. – М. : НИИНАвтопром. – 1980. – № 2. – С. 3–8.

134. Алиев И. С. Формообразование фланцев при холодном выдавливании осесимметричных деталей / И. С. Алиев, Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, И. Г. Савчинский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ. : ДДМА, 2007. – С. 221–225.

135. Одностороннее и двухстороннее выдавливание деталей из трубных заготовок / [К. А. Кирсанов, В. А. Зимин, Е. А. Ревтова и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – № 9. – С. 7–9.

136. Пшенишнюк А. С. Оптимизация энергетических затрат при штамповке обкатыванием / А. С. Пшенишнюк // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва : зб. наук. пр. – К. : НТУУ «КПІ», 1998. – Т. II. – С. 343–348.

137. Pshenisnyuk A. S. Critical forming force in rotary forging and the application of tungsten carbide dies / A. S. Pshenisnyuk, J. V. Hawkyard // Int.J.Mech.Sci. – 1999. – № 6. – P. 471–476.

138. Пшенишнюк А. С. Обобщённая оценка эффективности процесса и оборудования для штамповки обкатыванием / А. С. Пшенишнюк, Юй Чжйон // Сучасні проблеми сільськогосподарського машинобудування: зб. наук. пр. – Київ : Національний аграрний університет України, 1997. – том 1.

139. Алюшин Ю. А. Связь линий тока и скорости деформации в процессах развитого пластического формоизменения / Ю. А. Алюшин // Изв. вузов. – 1970. – № 8: Черная металлургия. – С. 71–74.

140. Кучеряев Б. В. К определению действительных функций тока и функций напряжений при решении задач теории вязкопластических



течений / Б. В. Кучеряев // Пластическая деформация легких и специальных сплавов. – М. : Metallurgiya, 1982. – Вып 2. – С. 27–37.

141. Кузьменко В. И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – Киев : Техника, 1990. – 136 с.

142. Шебейк А. Решение на ЦВМ методом визиопластичности задачи осесимметричного прессования через матрицу с криволинейной образующей / А. Шебейк // Труды американского общества инженеров-механиков. – 1972. – № 2 : Конструирование и технология машиностроения. – С. 273–279.

143. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

144. Завьялов Ю. С. Методы сплайн – функций / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – М. : Наука, 1980. – 352 с.

145. Суворов И. К. Обработка металлов давлением / И. К. Суворов. – М. : Высш. шк., 1973. – 381 с.

146. Рвачёв М. А. Система «Поле–ТДТ» для решения краевых задач механики твёрдого деформируемого тела на базе метода R–функций / М. А. Рвачёв, В. Д. Покрас, Д. В. Сахаров // Математическое моделирование технологических процессов обработки металлов: тез. науч.-техн. конф. – Пермь, 1987. – С. 96–97.

147. Визначення кінематичних характеристик пластичної деформації пористих тіл / [І. О. Сивак, А. Я. Мисловський, Р. І. Сивак, С. М. Шестаков] // Реологічні моделі та процеси деформування пористих і композиційних матеріалів: матеріали міжнародного семінару. – Луцьк: Інститут проблем матеріалознавства НАН України. – 1999. – С. 33–36.

148. Огородніков В. А. Моделювання процесів немонотонної пластичної деформації / В. А. Огородніков, І. О. Сивак, Р. І. Сивак // Контроль і управління в складних системах (КУСС–99) : книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково–технічної конференції. – Вінниця : ВДТУ, 1999. – Том 1. – С. 195–197.

149. Хван Д. В. Исследование деформационной анизотропии металлов при немонотонном пластическом деформировании в условиях линейного напряжённого состояния / Д. В. Хван, О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов // Проблемы прочности. – 1990. – № 12. – С. 53–56.

150. Хван Д. В. Экспериментальная механика конечных деформаций / Д. В. Хван, Ф. Х. Томилов, В. И. Корольков. – Воронеж : Изд-во «ЭЛИСТ», 1996. – 248 с.

151. Ренне И. П. Методика построения диаграммы пластичности путем испытания цилиндрических образцов в условиях совместного кручения и растяжения / И. П. Ренне, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // Проблемы прочности. – 1976. – № 6. – С. 142–145.

152. Пахотин К. К. Расчет фактического сопротивления сдвигу по результатам испытания упрочняющихся материалов на кручение / К. К. Пахотин, Л. М. Седоков // Известия Томского политехнического института им. С. М. Кирова, 1975. – Т. 241. – С. 23–27.

153. Сивак Р. І. Пластичність пористих тіл при комбінованому видавлюванні / Р. І. Сивак // Реологічні моделі та процеси деформування пористих і композиційних матеріалів: матеріали міжнародного семінару. – Луцьк : Інститут проблем матеріалознавства НАН України. – 1999. – С. 31–33.

154. Ресурс пластичности заготовок при последовательных операциях пластического формоизменения / [И. О. Сивак, В. А. Огородников, Р. И. Сивак, А. Я. Мысловский] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія, 2000. – С. 29–33.

155. Влияние геометрии траектории деформации на пластичность / [И. О. Сивак, В. А. Огородников, Р. И. Сивак, В. Т. Ивацко] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія, 1999. – С. 5–8.

156. Сивак И. О. Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с контурной осадкой / И. О. Сивак, Р. И. Сивак, И. С. Алиев // Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением. – Тула : Тульский государственный университет, 2000. – С. 278–284.

157. Контактные напряжения при холодном деформировании пористых заготовок / [В. А. Огородников, И. О. Сивак, В. Т. Ивацко, Р. И. Сивак] // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск :

Донбасская государственная машиностроительная академия, 1998. – Вып. № 4. – С. 240–245.

158. Сивак И. О. Поверхность предельной пластичности / И. О. Сивак // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія, 1999. – С. 9–15.

159. Сивак І. О. Оцінка деформовності пористих тіл / І. О. Сивак // Реологічні моделі та процеси деформування пористих і композиційних матеріалів : матеріали міжнародного семінару. – Луцьк. – 1999. – С. 37–40.

160. Алиев И. С. Пластичность металла при многократной холодной деформации с промежуточными отжигами / И. С. Алиев, И. О. Сивак, Р. И. Сивак // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск : Донбасская государственная машиностроительная академия, 1998. – Вып. № 4. – С. 203–207.

161. Оценка использованного ресурса пластичности при комбинированном выдавливании с промежуточными отжигами / [И. О. Сивак, В. А. Огородников, Р. И. Сивак, И. С. Алиев] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ–Слов'янськ : Донбаська державна машинобудівна академія, 2000. – С. 165–167.

162. Богатов А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.

163. Оцінка деформовності пористої кільцевої заготовки під час осадки в закритому штампі / [В. А. Огородніков, І. О. Сивак, В. Т. Ивацько, Р. І. Сивак] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 1(22). – С. 65–69.

164. The Determination of Prouisity Functions for Sintering Powder Materials / [I. O. Sivack, D. V. Sakharov, T. I. Babjuck, R. I. Sivack] // Optimum Technologies, Technologic Systems and Materials in the Machines Building Field, 1998. – TSTM–4. – P. 170–175.

165. О критериях разрушения пористых материалов / [В. А. Огородников, И. О. Сивак, В. Т. Ивацко, Р. И. Сивак] // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – № 1(5). – С. 63–66.

166. Ивацко В. Т. Моделирование процессов холодного деформирования пористых тел / В. Т. Ивацко, Р. И. Сивак // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск : Донбасская государственная машиностроительная академия, 1998. – Вып. № 4. – С. 262–264.

167. Сивак І. О. Оцінка деформовності пористих тіл при обробці тиском / І. О. Сивак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 1(2). – С. 79–82.

168. Сивак И. О. Пластичность металла при плоском напряжённом состоянии / И. О. Сивак // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск, 1998. – вып. 4. – С. 254–257.

169. Петросян Г. Л. Формирование пористых труб и стержней / Г. Л. Петросян // Докл. АН АрмССР. – 1977. – № 3. – С. 176–181.

170. Петросян Г. Л. Исследование процесса выдавливания спечённого пористого материала через коническую матрицу / Г. Л. Петросян, Г. В. Мусаелян, Х. Л. Петросян // Порошковая металлургия. – 1985. – № 3. – С. 19–23.

171. Упруго–пластическое деформирование спечённых пористых материалов в процессах обработки давлением / [В. М. Горохов, Е. А. Дорошкевич, Е. В. Звонарёв и др.] // Порошковая металлургия. – 1992. – № 6. – С. 69 – 75.

172. Теоретическое исследование процесса холодного выдавливания прутков из непластифицированных металлических порошков / [А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич, А. А. Веремчук, Т. А. Медведева] // Порошковая металлургия. – 1987. – № 5. – С. 6–10. (1987. – № 6. – С. 12–15; 1987. – № 7. – С. 6–11).

173. Гун Г. Я. Комплексная математическая модель процессов пластического течения сжимаемых материалов / Г. Я. Гун, А. Я. Гун, В. Н. Гудков // Порошковая металлургия. – 1996. – № 5. – С. 18–24.

174. Березовский Б. Н. Деформированное состояние при осаживании шара и цилиндра на плоских плитах и в штампах / Б. Н. Березовский, В. Е. Логинов, Г. С. Котлов // Изв. вузов. – 1985. – № 4: Чёрная металлургия. – С. 66–71.

175. Степаненко Н. А. Моделирование деформированного состояния металла при ковке круглых валов в вырезных бойках /

Н. А. Степаненко // Кузнечно–штамповочное производство. – 1986. – № 5. – С. 13–15.

176. Унксов Е. П. Методы моделирования процессов обработки давлением / Е. П. Унксов // Кузнечно–штамповочное производство. – 1975. – № 4. – С. 1–5.

177. Шебейк А. Применение сверхпластичного эвтектического сплава свинец–олово для изучения процесса горячего прессования / А. Шебейк, А. Вирани // Труды американского общества инженеров–механиков. – 1972. – № 4 : Конструирование и технология машиностроения. – С. 99–105.

178. Sivas I. O. The evaluation of Deformability of the Porous Bodeis / I. O. Sivas // The Bulletin of Polytechnic Institute of Iassy. XLII(XLVI). – 1996. – № 3–4. – P. 607–611.

179. Огородников В. А. Влияние гидростатического давления на пластичность металлов / В. А. Огородников // Физика и техника высоких давлений. – 2007. – № 2, Том 17. – С. 7–10.

180. T. Wierzborski, Y. Bao, Y–W. Lee, Y. Bai, Int. J. Mech. Sci. 47, 719. – 2005.

181. T. Wierzborski, L. Xue, Impact and Crashworthiness Lab Report. – № 136. – 2005.

182. Огородников В. А. Приложение теории деформируемости к решению задач механики формирования внутреннего шлицевого профиля обжатием на оправке / В. А. Огородников, О. В. Нахайчук, В. И. Музычук // Прогрессивные технологии и оборудование кузнечно–штамповочного производства : сб. – Москва : МГТУ «МАМИ», 2003. – С. 66–75

*Наукове видання*

**Сивак Роман Іванович  
Огородніков Віталій Антонович**

**ХОЛОДНЕ КОМБІНОВАНЕ  
ВИДАВЛЮВАННЯ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено Р. Сиваком

Підписано до друку 3.02.2011 р.  
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 10,39  
Наклад 100 прим. Зам № 2011-031

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.