

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк**

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНОГО  
ТА ГРАНИЧНОГО СТАНІВ  
ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ  
ПРИ ТОРЦЕВОМУ СТИСНЕННІ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2013

УДК 539.3  
ББК. 22.251  
М69

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 06.03.2013 р.)

Рецензенти:

**П. П. Лепіхін**, доктор фізико-математичних наук, професор

**В. М. Бастун**, доктор технічних наук, головний науковий співробітник

**Михалевич, В. М.**

М69      Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні : монографія / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 180 с.

ISBN 978-966-641-532-8

В монографії розглянуто результати розв'язання актуальної наукової задачі в галузі деформівного твердого тіла – визначення напружено-деформованого та граничного станів матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні. З цією метою розроблено методику побудови моделей граничного стану матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків із застосуванням як скалярних, так і тензорних моделей накопичення пошкоджень, яка надала можливість вперше аналітично описати криву граничних деформацій в залежності від інтенсивності бочкоутворення.

**УДК 539.3**  
**ББК. 22.251**

**ISBN 978-966-641-532-8**

© М. Михалевич, Ю. Добранюк, 2013

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП .....   | 5  |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ<br>ЗРАЗКІВ ПРИ ТОРЦЕВОМУ СТИСНЕННІ.....  | 6  |
| 1.1 Визначення напружено-деформованого стану зразків у<br>процесах деформування .....   | 6  |
| 1.2 Моделювання розсіяних пошкоджень під час<br>деформування.....   | 16 |
| 1.3 Особливості процесів деформування торцевим<br>стисненням.....   | 21 |
| 1.4 Дослідження формозміни, НДС та деформівності<br>зразків за допомогою скінченно-елементного<br>моделювання в програмних комплексах .....                 | 27 |
| 1.5 Висновки до розділу. Задачі дослідження.....  | 44 |
| РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО<br>СТАНУ ЗРАЗКІВ ПРИ ТОРЦЕВОМУ СТИСНЕННІ.....   | 46 |
| 2.1 Розробка методики побудови апроксимацій залежності<br>між компонентами деформацій бічної поверхні<br>циліндричних зразків при торцевому стисненні ..... | 46 |
| 2.2 Визначення різних мір деформації на вільній поверхні<br>при торцевому стисненні .....   | 55 |
| 2.2.1 Геометричний зміст накопиченої деформації та<br>інтенсивності логарифмічних деформацій.....   | 56 |
| 2.2.2 Спрощення виразу для обчислення накопиченої<br>деформації .....   | 60 |
| 2.3 Визначення показника напруженого стану та побудова<br>траєкторії деформацій на вільній поверхні при<br>торцевому стисненні.....                         | 64 |
| 2.4 Визначення граничної деформації із використанням<br>лінійного принципу накопичення пошкоджень .....   | 68 |
| 2.5 Крива граничних деформацій під час нестационарного<br>деформування, що побудована із використанням<br>лінійного принципу накопичення пошкоджень .....   | 74 |
| 2.5.1 Необхідні та достатні умови опуклості функції<br>пошкоджень під час нестационарних процесів .....   | 77 |
| 2.5.2 Побудова ефективних обчислювальних схем для<br>визначення граничних деформацій під час складного<br>деформування.....                                 | 84 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.6 Аналітичний аналіз моделі граничного стану бічної поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні.....   | 85         |
| 2.7 Визначення граничного стану із використанням тензорно-лінійної моделі накопичення пошкоджень.....  | 88         |
| 2.8 Висновки до розділу .....  | 90         |
| <b>РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТОРЦЕВОГО СТИСНЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ.....</b>   | <b>93</b>  |
| 3.1 Визначення граничного значення відношення висоти зразка до його діаметра .....   | 93         |
| 3.2 Методика проведення експериментального дослідження торцевого стиснення циліндричних зразків.....   | 93         |
| 3.3 Визначення деформацій бічної поверхні циліндричних зразків під час експериментального дослідження торцевого стиснення.....   | 107        |
| 3.4 Висновки до розділу .....  | 113        |
| <b>РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ГРАНИЧНОГО СТАНУ БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ ПРИ ТОРЦЕВОМУ СТИСНЕННІ.....</b>   | <b>115</b> |
| 4.1 Узагальнення аналітичної залежності між компонентами деформацій бічної поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні .....   | 115        |
| 4.2 Прогнозування граничних деформацій матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків на основі початкового фрагменту експериментальних даних.....   | 117        |
| 4.3 Моделювання напружено-деформованого стану циліндричного зразка при торцевому стисненні за допомогою методу скінчених елементів.....  | 127        |
| 4.4 Підвищення точності визначення граничних умов під час чисельного моделювання відповідно до результатів експериментально-аналітичного моделювання напружено-деформованого стану циліндричного зразка при торцевому стисненні..... | 137        |
| 4.5 Висновки до розділу .....  | 144        |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>   | <b>145</b> |
| <b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>  | <b>147</b> |

## ВСТУП

Торцеве стиснення циліндричних зразків є одним із основних методів лабораторних досліджень для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів, а також основою великої кількості технологічних операцій, зокрема, осадження. Як відомо, при стисненні циліндричних зразків із малопластичних матеріалів на бічній поверхні утворюються тріщини. Ступінь стиснення, при якому з'являються тріщини, залежить від інтенсивності бочкоутворення, яке в свою чергу залежить від умов тертя на торцях зразка.

На сьогоднішній день утворився значний розрив між сучасними можливостями інформаційних технологій та існуючими методиками визначення напружено-деформованого стану (НДС) та граничних деформацій матеріалу під час нестационарних процесів на бічній поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні.

Така ситуація приводить до невиправданих інтелектуальних і часових затрат дослідників та інженерів під час розв'язання багатьох наукових та технологічних задач, а також до похибок, які викликані суб'єктивізмом спеціаліста під час побудови відповідних математичних моделей.

На сьогоднішній день відсутня сучасна методика дослідження НДС та граничних деформацій бічної поверхні при торцевому стисненні циліндричних зразків за умов бочкоутворення, яка дозволяє дослідити закономірності та особливості процесу деформування.

Розробка методики побудови моделей граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків із використанням удосконаленої методики дослідження НДС та застосуванням як скалярних, так і тензорних моделей накопичення пошкоджень, яка дасть можливість аналітично описати криву граничних деформацій під час нестационарного деформування, є досить актуальною науковою задачею в галузі деформівного твердого тіла.

Автори висловлюють щире подяку д.т.н., професору, академіку Національної академії наук України Анатолію Олексійовичу Лебедєву за постійну увагу до даної роботи та її підтримку, плідне обговорення отриманих результатів, корисні зауваження, поради, настанови щодо поліпшення змісту і структури роботи.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗРАЗКІВ ПРИ ТОРЦЕВОМУ СТИСНЕННІ

### 1.1 Визначення напружено-деформованого стану зразків у процесах деформування

Торцеве стиснення циліндричних зразків є одним із важливих способів лабораторних досліджень для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Особливого значення згаданий метод набуває в зв'язку із тим, що закономірності пластичної формозміни можуть бути покладені в основу вдосконалення технологічного процесу осадження, а також деяких інших процесів з наявністю вільної поверхні. Дослідженням на стиснення визначають  $\varepsilon_*$  – ступінь деформації, яка відповідає виникненню на вільній поверхні зразка першої тріщини, а також  $q_*$  – питоме зусилля під час стиснення в залежності від ступеня деформації. Під час дослідження на стиснення контактне тертя, яке залежить від температури, стану контактуючих поверхонь, хімічного складу матеріалу та інших факторів, суттєво впливає на отримані результати [89, 123, 124, 145, 159, 162, 171, 172, 198, 199, 203, 204].

Як відомо [88, 89, 123, 124, 145, 159, 162, 171, 172, 198, 199, 204, 226], під час стиснення циліндричних зразків із малопластичних матеріалів на бічній поверхні утворюються тріщини. Причому ступінь стиснення, при якому з'являються тріщини, залежить від інтенсивності бочкоутворення бічної поверхні. У свою чергу інтенсивність бочкоутворення визначається умовами тертя на торцях зразка [123, 145, 162, 198].

На сьогоднішній день утворився значний розрив між сучасними можливостями інформаційних технологій та існуючими методиками визначення напружено-деформованого стану (НДС) та граничних пластичних деформацій матеріалу під час нестационарних процесів на бічній поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні. Подібна ситуація призводить як до невиправданих інтелектуальних і часових витрат дослідників та інженерів під час вирішення багатьох наукових та технологічних задач, так і до появи похибки невизначеної величини, яка породжується суб'єктивізмом конкретного фахівця під час побудови відповідних математичних моделей.

На практиці широке застосування знайшли феноменологічні теорії визначення граничних пластичних деформацій до руйнування [25, 56, 58, 60, 62, 63, 79, 90, 123, 124, 145, 158, 159, 162, 173, 163, 189, 198, 199, 204, 214].

Під пластичністю розуміють властивість твердих тіл незворотно деформуватися без руйнування під дією механічних навантажень або внутрішніх напружень [88, 89, 123, 124, 126, 145, 171, 172, 198, 199, 203, 204, 226].

В якості міри пластичності широко використовують накопичену пластичну деформацію – параметр О. А. Ільюшина [79, 198, 199]:

$$\varepsilon_u(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u(\tau) d\tau, \quad (1.1)$$

де  $t, \tau$  – час;  $\dot{\varepsilon}_u$  – інтенсивність швидкостей деформацій;

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2}; \quad (1.2)$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{d\varepsilon_1}{dt}; \dot{\varepsilon}_2 = \frac{d\varepsilon_2}{dt}; \dot{\varepsilon}_3 = \frac{d\varepsilon_3}{dt}. \quad (1.3)$$

Пластичність матеріалів залежить від значної кількості факторів: схеми напружено-деформованого стану, швидкості деформації та температури деформування. Під час холодного стаціонарного деформування пластичність значною мірою визначається характером зміни напружено-деформованого стану [21, 25, 46, 55, 56, 58, 60, 61, 62, 63, 75, 79, 86, 88, 89, 90, 91, 97, 107, 110, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 145, 149, 153, 154, 155, 158, 159, 161, 162, 163, 165, 166, 171, 172, 173, 176, 184, 185, 189, 192, 198, 199, 200, 201, 203, 204, 214, 216, 226, 234, 245]. Під стаціонарним холодним деформуванням розумітимемо процес, при якому напрямний тензор приростів деформацій  $\beta_{ij}(\varepsilon_u)$ , показник напруженого стану  $\eta(\varepsilon_u)$  та параметр Лоде  $\mu_\sigma(\varepsilon_u)$  залишаються незмінними [145].

Аналогічно кривим тривалої міцності [78, 107, 110, 119, 145, 153, 154, 184, 185], залежність граничних деформацій від напружено-деформованого стану характеризують кривими або поверхнями граничних деформацій. Побудова кривих та поверхонь граничних деформацій, які часто називають діаграмами пластичності, досліджується в

численній літературі [58, 60, 62, 63, 90, 123, 124, 145, 159, 161, 162, 173, 192, 204]. Кривою граничних деформацій називається залежність накопиченої деформації  $\varepsilon_u$  від показника напруженого стану  $\eta$  [107, 123, 124, 145, 159, 162, 198, 199].

Велика кількість методів визначення та характеристик пластичності, в залежності від виду напруженого стану, породжувала появу значної кількості показників напруженого стану [55, 75, 107, 155, 198, 216]. Починаючи з другої половини ХХ століття найширшого використання отримав показник напруженого стану  $\eta$  [123, 145, 159, 162, 171, 173, 198, 199], але строге теоретичне обґрунтування для його використання представлено порівняно недавно в роботі А. О. Лебедева та В. М. Михалевича [107]. У цій роботі продемонстровано беззаперечні переваги використання показника  $\eta$  для характеристики плоского напруженого стану. Показано, що для плоского напруженого стану показник  $\eta$ , на відміну від інших класичних безрозмірних інваріантів, однозначно характеризує можливі напружені стани матеріалу.

Показник напруженого стану  $\eta$  визначається за допомогою виразу [97, 107, 123, 124, 145, 162, 198]

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3} \cdot I_2(D_\sigma)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_\varepsilon}, \quad (1.4)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні напруження;  $\sigma_\varepsilon$  – інтенсивність напружень:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1.5)$$

Параметр Надаї–Лоде  $\mu_\sigma$ , який також використовується для характеристики напруженого стану, визначається за допомогою співвідношення [107, 123, 145, 198]

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (1.6)$$

Вираз (1.6) можна представити через кут виду напруженого стану  $\psi$  залежністю [107]

$$\mu_\sigma = \sqrt{3} \cdot \operatorname{ctg} \left( \psi + \frac{2\pi}{3} \right). \quad (1.7)$$



Ю. Н. Работнов [185] використовує для характеристики напруженого стану безрозмірний показник  $\xi$ , який визначається за допомогою формули:

$$\xi = \frac{\sqrt{6} \cdot I_3(D_\sigma)}{\sqrt[3]{I_2(D_\sigma)}} = \cos(3 \cdot \psi). \quad (1.8)$$

О. А. Ільюшин [79] в якості параметра характеристики напруженого стану використовує вираз:

$$D = \frac{\xi}{\sqrt{54}}. \quad (1.9)$$

В [107] на основі аналізу різних варіантів плоского напруженого стану

$$\sigma_1 = 0; \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq 0; (\sigma_3 < 0); \quad (1.10)$$

$$\sigma_1 \geq 0; \sigma_2 = 0; \sigma_3 \leq 0; (\sigma_1 + |\sigma_3| > 0); \quad (1.11)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0; \sigma_3 = 0 (\sigma_1 > 0). \quad (1.12)$$

доведено, що існує взаємно однозначна залежність між значеннями показника  $\eta$  та можливими напруженими станами.

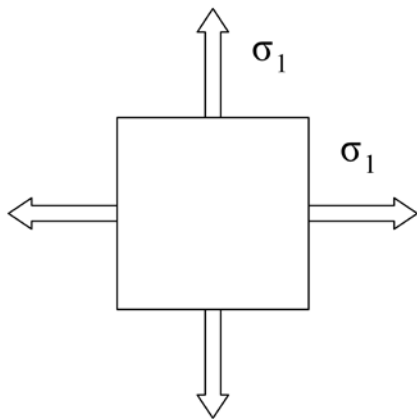
Що ж стосується параметра Надаї–Лоде (1.6), то для кожного із трьох розглянутих варіантів параметр  $\mu_\sigma$  приймає всі значення від  $-1$  до  $+1$ . Аналогічна ситуація й з іншими класичними показниками: куту виду напруженого стану, а також показниками, які використовували Ю. М. Работнов (1.8) та О. А. Ільюшин (1.9).

Це означає, що показник напруженого стану  $\eta$  однозначно визначає плоский напружений стан, а інші розглянуті показники – неоднозначно.

Характерний приклад наведено на рис. 1.1. Як видно, фізично різним схемам напруженого стану відповідає одне й те саме значення параметра Надаї–Лоде, а також кута виду напруженого стану та показників, що використовували Ю. М. Работнов та О. А. Ільюшин. Графічну ілюстрацію до теоретичних висновків наведено на рис. 1.2.

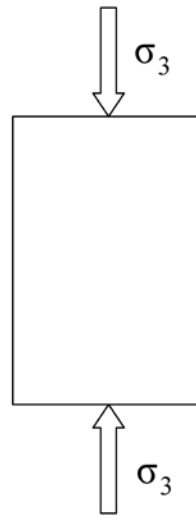
Ще одним характерним прикладом є те, що значенню  $\mu_\sigma = 0$  відповідають три різні значення показника  $\eta$ :  $\eta_1 = -\sqrt{3}$ ,;  $(\sigma_2 = 0,5 \cdot \sigma_3 < 0; \sigma_1 = 0)$ ;  $\eta_2 = 0$ ,  $(\sigma_1 = -\sigma_3 > 0; \sigma_2 = 0)$ ;  $\eta_3 = +\sqrt{3}$ ,  $(\sigma_2 = 0,5 \cdot \sigma_1 > 0; \sigma_3 = 0)$ .

Рівномірний двовісний розтяг  $\sigma_1 = \sigma_2$



$\eta=2$        $\mu_\sigma=+1$

Одновісне стиснення  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$



$\eta=-1$        $\mu_\sigma=+1$

Рисунок 1.1 – Схеми плоского напруженого стану

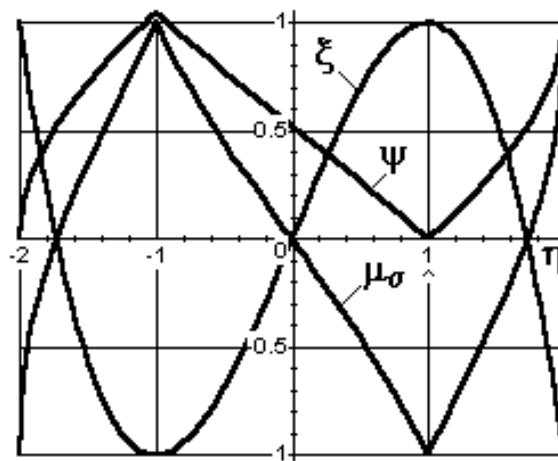


Рисунок 1.2 – Залежності між показниками під час плоского напруженого стану

Про недоліки параметра Надаї–Лоде йдеться також і в роботі [176], де також відмічається, що запропонований показник неоднозначно визначає вид напруженого стану, що демонструється з використанням кола Мора. Параметр Надаї–Лоде характеризує відносне розташування компоненти  $\sigma_2$  на числовій осі між  $\sigma_1$  та  $\sigma_3$ , і може приймати значення в межах від  $-1$  до  $+1$ . При цьому, для великого спектра видів напруженого стану із різним співвідношенням між компонентами головних напружень, параметр Надаї–Лоде  $\mu_\sigma$  буде набувати однакового значення, якщо згадані напружені стани будуть відобража-

тися однаковими колами Мора. Так, для тривісного та двовісного розтягу, двовісного та тривісного стиснення параметр Надаї–Лоде приймає відповідно однакове значення [176]. Але в роботі [176], на відміну від [107], не пропонується краща альтернатива.

Для демонстрації переваг використання показника  $\eta$  в [107] розглянуто подання критеріїв граничного стану в класичній та новій формах (рис. 1.3, 1.4).

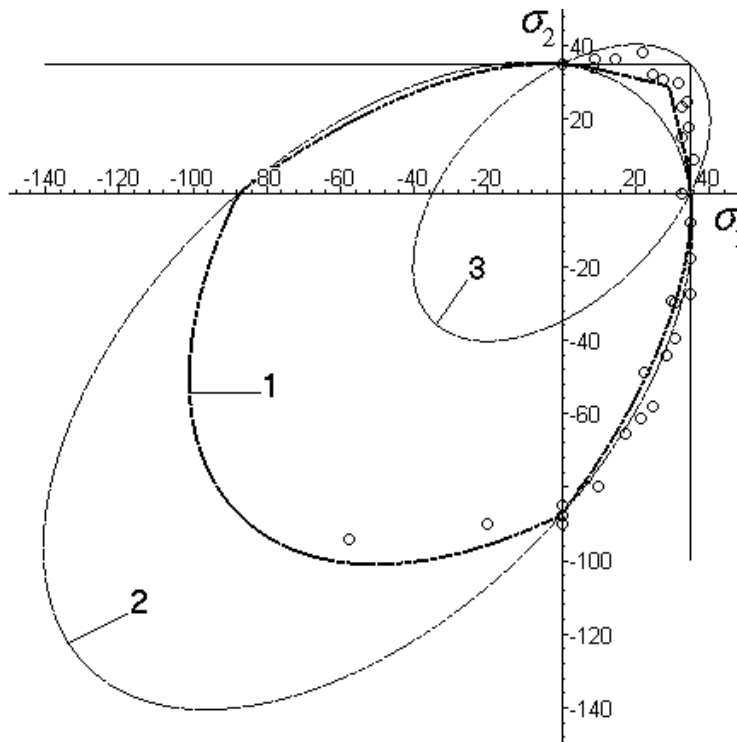


Рисунок 1.3 – Представлення розрахункових та експериментальних даних міцності сірого чавуну в традиційному просторі головних напружень: 1 – рівняння Писаренка–Лебедева; 2 – рівняння Баландіна; 3 – рівняння Мізеса; вертикальна та горизонтальна лінії – перша теорія міцності

Очевидно, що можна провести певну аналогію між кривими, що представлені на рис. 1.4 та кривими граничних деформацій [110, 119, 123, 145, 171, 172, 185]. Криві, що представлені на рис. 1.4, можна інтерпретувати як залежність граничних значень інтенсивності напружень від показника напруженого стану. Очевидно, що із «пом'якшенням напруженого стану», що відповідає зменшенню показника  $\eta$ , гранична величина інтенсивності напружень зростає або не зменшується.

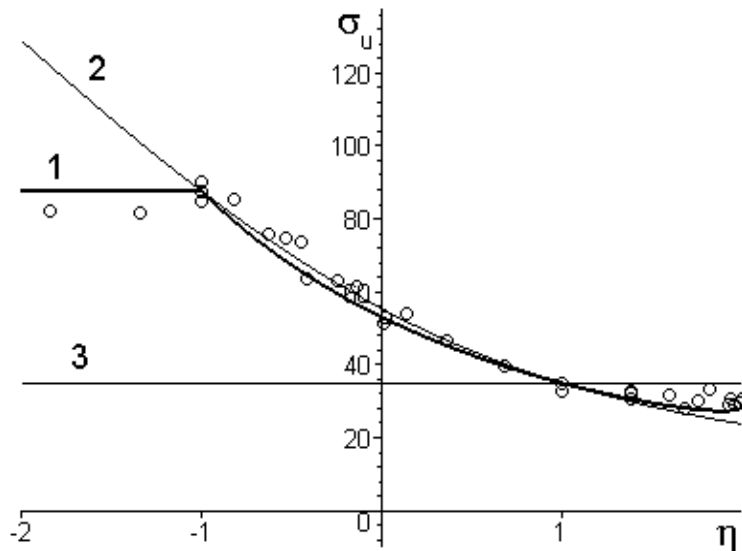


Рисунок 1.4 – Представлення розрахункових та експериментальних даних міцності сірого чавуну в вигляді залежності інтенсивності напружень від показника «жорсткості» напруженого стану: 1 – умова Писаренка–Лебедева; 2 – умова Баландіна; 3 – умова Мізеса

При оцінюванні напруженого стану під час об’ємного напруженого стану одного показника  $\eta$  недостатньо. Вважалось б природним введення в цьому випадку параметра Надаї–Люде  $\mu_\sigma$  чи кута виду напруженого стану  $\psi$ , але ці параметри не залишаються незмінними в умовах плоского напруженого стану. В роботах [158, 159, 162, 192] для аналізу об’ємного напруженого стану використовують показник  $\eta$  (1.4) та параметр  $\eta_2$  у вигляді співвідношення:

$$\eta_2 = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sigma_\varepsilon} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_\varepsilon}. \quad (1.13)$$

В [107] для опису об’ємного напруженого стану пропонується використовувати показник  $\eta$  (1.4) та безрозмірний показник  $\nu$ , що відображує зміну третього інваріанта напрямного тензора напружень та рівний нулю при плоскому напруженому стані

$$\nu = \cos(3 \cdot \psi) - 0,5 \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2), \quad (1.14)$$

але наголошується, що цей випадок вимагає більш глибокого дослідження.

Досить ґрунтовні дослідження процесів стиснення наведено в роботах В. А. Крохи. В роботі [97] наведено результати дослідження

зміцнення матеріалу під час пластичного деформування у вигляді кривих зміцнення для широкого кола матеріалів, отриманих в результаті експериментального дослідження. Крива зміцнення – це залежність напруження течії  $\sigma_T$  від міри деформації, яка характеризує зміну значення  $\sigma_T$  в процесі холодного пластичного деформування.

Криві зміцнення, які наведено в [97], побудовані на основі значних обсягів експериментальних досліджень, в першу чергу процесу стиснення, а також розтягу та кручення. В [97] представлені результати дослідження таких процесів: неперервне стиснення зразків із торцевими циліндричними виточками, які заповнені змащувальним матеріалом; двоступеневе стиснення зразків із торцевими циліндричними виточками, які заповнені змащувальним матеріалом; неперервне стиснення зразків із торцевими циліндричними виточками, які заповнені змащувальним матеріалом, в умовах гідростатичного тиску; стиснення конічними бійками зразків із торцевими конічними виточками; дослідження зразків на стиснення ( $\frac{h}{d}$  – невідоме); неперервне стиснення

високих зразків ( $\frac{h}{d} = 1,5 - 2,0$ ); ступінчасте стиснення високих зразків; ізотермічне стиснення високих зразків; стиснення в умовах гідростатичного тиску; стиснення в умовах ультразвукових коливань; стиснення високих зразків у вакуумі; стиснення зразків із початковим співвідношенням  $\frac{h_0}{d_0} = 1$ ; стиснення на пластомірі; динамічне стиснення;

стиснення зразків із різними початковими співвідношеннями  $\frac{h_0}{d_0}$ ;

перетиснення матеріалу двома плоскими плитами; стиснення плитами при додатковому переміщенні однієї із них в площині контакту.

В [97] встановлено, що для багатьох попередньо нездеформованих матеріалів при нормальних та близьких до них температур, під час деформування із швидкістю  $2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$ , в діапазоні логарифмічних деформацій 0,1–1,25 криві зміцнення можуть бути апроксимовані залежністю:

$$\sigma_T = m \cdot \varepsilon^n, \quad (1.15)$$

де  $m$  – значення напруження течії при  $\varepsilon = 1,0$ ;  $\varepsilon$  – міра деформації;  $n$  – показник деформаційного зміцнення.

Показник деформаційного зміцнення  $n$  характеризує здатність матеріалу до зміцнення під час пластичного деформування. Показник  $n$  чисельно дорівнює максимальному рівномірному видовженню  $\varepsilon_p$  та визначається під час дослідження на розтяг за допомогою співвідношення:

$$n = \varepsilon_p = 2 \cdot \ln \left( \frac{d_0}{d_B} \right), \quad (1.16)$$

де  $d_0, d_B$  – діаметр зразка до дослідження та в момент максимального навантаження відповідно.

Досить важливим фактором при дослідженні зразків під час пластичного деформування є стійкість зразків. Критерієм стійкості процесу торцевого стиснення є граничне відношення  $a_{0*}$  повздовжніх розмірів зразка до поперечних, який характеризує їхню формозміну без прогину. Для визначення значення  $a_{0*}$  використовують параметри кривих зміцнення.

Під час стиснення незміцнених холодною пластичною деформацією циліндричних зразків із гладкими торцями та із торцевими виточками, які заповненні твердим змащувальним матеріалом, граничне початкове значення відношення висоти зразка до діаметра визначається як [97]

$$a_{0*} = \frac{h_0}{d_0} = 2,24 \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{\nu}, \quad (1.17)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт приведення висоти, який залежить від методу закріплення кінців зразка (у випадку стиснення зразків із гладенькими торцями  $\nu = 0,5$ ; при стисненні зразків із торцевими виточками, які заповнені твердим змащувальним матеріалом,  $\nu = 0,74 - 0,785$ ).

Результати розрахунку параметра  $a_{0*}$  для деяких відпалених металів та сплавів наведено в табл. 1.1 [97].

Таблиця 1.1 – Значення граничного відношення висоти зразка до його діаметру

| Матеріал     | $\nu$ | $n$    | $a_{0*} = \frac{h_0}{d_0}$ |
|--------------|-------|--------|----------------------------|
| Техн. залізо | 0,5   | 0,276  | 2,36                       |
| Мідь         | 0,5   | 0,47   | 3,06                       |
| Алюміній     | 0,5   | 0,151  | 1,73                       |
| Цинк         | 0,5   | 0,218  | 2,08                       |
| Срібло       | 0,5   | 0,4354 | 2,95                       |
| Сталь 40Х    | 0,5   | 0,153  | 1,76                       |
| Сталь 40ХНМА | 0,5   | 0,134  | 1,64                       |
| Латунь Л63   | 0,5   | 0,406  | 2,85                       |
| Сплав АМг2М  | 0,5   | 0,194  | 1,975                      |

На жаль, в роботах В. А. Крохи з дослідження торцевого стиснення, відсутній аналіз НДС та граничних деформацій бічної поверхні.

Методику визначення НДС бічної поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення висвітлено в [198]. Але наведена методика розрахована на використання тільки одного конкретного математичного виразу в якості апроксимації залежностей між компонентами деформацій, тобто відсутні як база апроксимацій, так і методика їхньої побудови. Що не забезпечує можливості вибору апроксимацій з метою найкращого описання конкретних експериментальних даних, а також ускладнює оцінку достовірності результатів дослідження.

Крім того, робота [198] обмежується визначенням НДС і не торкається питань моделювання граничних деформацій із застосуванням моделей накопичення розсіяних пошкоджень. Ці питання досліджуються в [99, 123, 159, 162, 173]. Але в згаданих роботах визначення траєкторії деформацій виконується чисельним методом, позбавленим переваг використання аналітичної залежності між компонентами деформацій. Одним із наслідків цього було те, що до недавнього часу криву граничних деформацій під час нестационарного деформування будували наближено шляхом апроксимації по декількох точках, отриманих для окремих траєкторій деформацій. В [173], до того ж, оцінку граничних деформацій за моделлю розсіяних пошкоджень проводили

наближено із використанням усереднених значень показника напруженого стану.

Робота [149] – єдина в якій задача визначення граничних деформацій розв’язана на основі побудови аналітичної залежності між компонентами деформацій. Але отримані результати мають фрагментарний характер, яким властиві основні із зазначених вище недоліків.

Відсутність сучасних інформаційних технологій розв’язання задачі визначення НДС та граничних деформацій бічної поверхні циліндричного зразка призводить до того, що і до сьогоднішнього часу зустрічаються роботи, зокрема, [64, 99, 100, 101], в яких вказані задачі вирішуються із використанням застарілої малоефективної методики, яка недостатньо сприяє поширенню та систематизації відповідних досліджень.

## **1.2 Моделювання розсіяних пошкоджень під час деформування**

В сучасній промисловості основною задачею є виготовлення та експлуатація деталей і механізмів із забезпеченням найкращої якості, які мають необхідні для їхньої роботи запаси пластичності та міцності. Під час лабораторних досліджень зразків та виготовлення деталей деформуванням на пластичність впливає велика кількість факторів. До таких факторів належать фізико-механічні властивості матеріалу, термомеханічні параметри технологічних процесів та ін. Під час холодного деформування на пластичність матеріалу великий вплив здійснює значення показника напруженого стану та закономірність його зміни в процесі пластичної формозміни [25, 78, 107, 110, 119, 123, 145, 154, 159, 162, 184, 199, 204].

Для багатьох процесів стримуючим фактором є невисока пластичність матеріалу, що обробляється. Тому на сьогоднішній день досить велику увагу науковий світ зосередив на дослідженні закономірності накопичення пошкоджень. Впродовж багатьох десятиліть набуває розвитку феноменологічний підхід в теорії розсіяних пошкоджень. Моделі розсіяних пошкоджень використовуються науковцями для кількісної оцінки впливу напруженого стану та закономірностей його зміни під час деформування на граничну пластичну деформацію до руйнування, яка ідентифікується появою тріщини, що призводить до бракування деталей.



Питання дослідження міцності, пластичності, пошкоджуваності матеріалу під час деформування, оцінки напружено-деформованого стану розглядаються у великій кількості наукових робіт [2, 8, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 47, 55, 58, 79, 82, 84, 85, 86, 90, 103, 104, 106, 107, 111, 112, 113, 119, 123, 124, 127, 128, 145, 149, 153, 155, 159, 169, 171, 181, 182, 183, 184, 190, 200, 206, 213, 219, 229, 230, 231, 232, 233, 236, 247, 251, 253].

Для оцінки граничного стану зразків використовують два підходи. Відповідно до першого підходу, який набув розвитку в класичних теоріях міцності, в критеріях руйнування накладають обмеження на напруження [78, 105, 107, 110, 119, 126, 153, 154, 155, 171, 172, 184, 185, 204, 263]. Один із головних недоліків указанного підходу полягає в тому, що в області пластичних деформацій невелика зміна інтенсивності напружень, як правило, супроводжується значними змінами накопиченої пластичної деформації.

Інший напрямок оцінки граничного стану полягає у використанні моделей розсіяних пошкоджень. Один із найпростіших підходів до оцінки граничних деформацій було запропоновано Г. О. Смірновим-Аляєвим [198, 199]

$$\psi = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{*c}[\eta(\tau)]}, \quad (1.18)$$

де  $\psi$  – використаний ресурс пластичності, який характеризує міру пошкодженості матеріалу та змінюється від 0 в початковому стані до 1 під час руйнування;  $\varepsilon_u$  – ступінь деформування, який знаходиться як накопичена деформація;  $\varepsilon_{*c}[\eta(\tau)]$  – крива граничних деформацій (діаграма пластичності).

Цей підхід не враховує історію деформування, яка відображує зміну показника напруженого стану  $\eta$ . В роботах [123, 145, 159, 161, 162, 163, 192] зазначається, що такий підхід в деяких випадках може призвести до похибок порядку 35 %.

В рамках теорії розсіяних пошкоджень першу модель для визначення граничних пластичних деформацій було запропоновано В. Л. Колмогоровим [90, 123, 145, 159, 162, 173, 236]

$$\psi(t) = \int_0^t E(t-\tau) \cdot B(\tau) \cdot \frac{\dot{\varepsilon}_u(\tau)}{\varepsilon_{*c}[\eta(\tau)]} \cdot d\tau, \quad (1.19)$$

де  $t, \tau$  – час;  $E(t - \tau)$  – коефіцієнт, який враховує ефект «самозаліковування» дефектів при високій температурі;  $B(\tau)$  – коефіцієнт, який враховує історію деформування;  $\dot{\varepsilon}_u(\tau)$  – інтенсивність швидкостей деформацій.

Однак, в літературі не було наведено жодних відомостей про визначення функцій  $E(t - \tau)$  та  $B(\tau)$ . Широке застосування отримала модель В. Л. Колмогорова [90, 91, 123, 145]

$$\psi(\varepsilon_u) = \int_0^{\varepsilon_u} \frac{d\varepsilon_u^*}{\varepsilon_{*c} [\eta(\varepsilon_u)]}, \quad (1.20)$$

яка виражає принцип лінійного накопичення пошкоджень.

Аналогом моделі (1.20) є інтеграл Бейлі в теорії тривалої міцності

$$\int_0^{t_*} \frac{d\tau}{t_{*\bar{n}} [\sigma(\tau)]} = 1, \quad (1.21)$$

де  $t_{*\bar{n}}(\sigma)$  – час руйнування зразка в умовах повзучості (при постійному значенні  $\sigma$ );  $t_*$  – час деформування до руйнування.

Г. Д. Дель, В. А. Огородніков, В. Г. Нахайчук запропонували модель, що базується на нелінійному законі накопичення пошкоджень [58, 62, 159, 162]

$$\psi(\varepsilon_u) = \int_0^{\varepsilon_u} n \cdot \frac{\varepsilon_u^{n-1}}{\varepsilon_{*c}^n [\eta(\varepsilon_u)]} \cdot d\varepsilon_u, \quad (1.22)$$

де

$$n = 1 + a \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_u} \right). \quad (1.23)$$

та розробили методику визначення показника  $a$  за результатами експериментів на спільний розтяг з крученням.

Відповідно до процесів двоетапного та багатоетапного деформування  $\left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_u} = 0 \right)$ , модель (1.22) стає тотожною критерію (1.20) та не

відображає суттєвих закономірностей зміни граничних деформацій [145]. Більш повне описання закономірностей зміни граничних деформацій під час нестационарного деформування надають можливість

отримати тензорні моделі розсіяного пошкодження [48, 49, 50, 51, 52, 53, 61, 62, 76, 86, 145, 236]

В роботах [61, 62] компоненти тензора-девіатора пошкоджень пропонуються визначати таким чином:

$$\psi_{ij}(\varepsilon_u) = \int_0^{\varepsilon_u} F(\varepsilon_u, \eta, \mu_\sigma) \cdot \beta_{ij} \cdot d\varepsilon_u, \quad (1.24)$$

де  $\beta_{ij}$  – напрямний тензор приростів деформацій, який визначається відповідно до співвідношення

$$\beta_{ij} = \frac{d\varepsilon_{ij}}{\sqrt{d\varepsilon_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}}}, \quad (1.25)$$

де  $d\varepsilon_{ij}$  – прирости пластичних деформацій.

Умову руйнування прийнято у вигляді

$$\psi_{ij} \cdot \psi_{ij} = 1, \quad (1.26)$$

а в якості підінтегральної функції в співвідношенні (1.24) пропонується вираз

$$F = \frac{1}{\varepsilon_{*c}(\eta)} \cdot \left( 1 - a + 2 \cdot a \cdot \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{*c}(\eta)} \right), \quad (1.27)$$

де  $a$  – коефіцієнт, який підбирається за результатами експериментів із немонотонного деформування.

На основі загальних положень із побудови тензорних моделей розсіяних пошкоджень, що сформульовані О. А. Ільюшиним [78, 79], в роботах [145, 149] запропоновано та досліджено тензорно-нелінійну модель

$$\begin{aligned} \psi_{ij}(\varepsilon_u) = & \int_0^{\varepsilon_u} F(\varepsilon_u^*, \eta, \mu_\sigma) \times \\ & \times \left\{ a \cdot \beta_{ij}(\varepsilon_u^*) + b \cdot \left[ \beta_{ik}(\varepsilon_u^*) \cdot \beta_{kj}(\varepsilon_u^*) - \frac{1}{3} \cdot \delta_{ij} \right] \right\} \cdot d\varepsilon_u^*, \end{aligned} \quad (1.28)$$

де  $\beta_{ik} \cdot \beta_{kj}$  – квадрат тензора  $\beta_{ij}$ ;  $\delta_{ij}$  – одиничний тензор,  $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$  та  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ ;  $a = a(\eta, D)$ ,  $b = b(\eta, D)$  – параметри моделі, які необхідно визначити за результатами експериментальних даних.

Отже, теорія накопичення пошкоджень набула високого наукового рівня, але аналіз сучасної літератури свідчить про те, що як і 20–30 років назад, в застосуваннях переважає лінійний принцип накопичен-

ня пошкоджень, або, без достатнього обґрунтування, пропонуються нові критеріальні співвідношення, що описують вузький клас експериментальних даних.

Так, в роботі [157] досліджується поява нерівномірності деформування під час осадження та ймовірність руйнування, яке, на думку автора, відбувається в момент стрибка інтенсивності деформацій.

В роботах [179, 197, 270] проводиться аналіз методів прогнозування накопичення пошкоджень та пропонується модель накопичення пошкоджень, яка може бути використана для чисельних розрахунків процесів пластичних деформацій із неперервною зміною напружено-деформованого стану (НДС). При малих кроках навантаження, адаптивна модель має вигляд [179, 270]

$$\Delta\omega_i = \left(1 + R_{(\Delta k)_i} + R_{(\Delta v)_i}\right) \cdot \frac{\Delta\Lambda_i}{\Delta\Lambda_{pi}}, \quad (1.29)$$

де  $R$  – адаптивні функції, які характеризують приріст (заліковування) пошкоджень при зміні умов навантаження на  $i$ -му кроці розрахунку та розраховуються за формулами [197, 270]

$$R_{(\Delta k)_i} = c_1 \cdot \left(1 - e^{-c_2 \cdot \Delta k_i}\right), \quad R_{(\Delta v)_i} = c_3 \cdot \mathcal{G}_i \left(1 - \frac{\Delta\Lambda_{i-1}}{\Lambda_{p(i-1)}}\right)^{c_4}, \quad (1.30)$$

де  $\mathcal{G}_i$  – кут зміни напрямку деформування в фазовому просторі деформацій О. А. Ільюшина;  $\Delta k_i$  – зміна показника напруженого стану  $k = \sigma/T$ ;  $\sigma$  – середнє напруження;  $T$  – інтенсивність дотичних напружень;  $\Delta\Lambda_{i-1}$  – приріст ступеня деформації зсуву;  $c_1 \dots c_4$  – емпіричні коефіцієнти;  $\Lambda_{p(i-1)}$  – пластичність металу (деформація зсуву в момент руйнування під час простого навантаження).

В роботі [211] запропоновано вираз для визначення густини мікропошкоджень у вигляді

$$D_i(\Lambda) = D_{0_i} \cdot \left[1 - \left(\Lambda_i / \Lambda_{pi}\right)^{2n}\right]^{1/(1-\beta_i)}, \quad (1.31)$$

де  $D_{0_i}$  – початкова густина мікротріщин, яка залежить від накопичених пошкоджень на попередніх етапах;  $n$  – коефіцієнт із рівняння кривої зміцнення  $\sigma_s = \sigma_{s_0} + m \cdot \Lambda^n$ ;  $\beta_i$  – коефіцієнт, який враховує ін-

## ЛІТЕРАТУРА

1. Алиев И. С. Автоматизированный расчет процессов выдавливания / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков, О. К. Савченко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 8–13.
2. Алиев И. С. Дефектообразование в процессе радиально-прямого выдавливания на конусной оправке / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – № 2Е(10). – С. 88–93.
3. Алиев И. С. Исследование контактного пластического трения [Электронный ресурс] / И. С. Алиев, К. Крюгер // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – 4 с. – Режим доступу до роботи: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2005-h/pdfs/s2-002.pdf>.
4. Алиев И. С. Формоизменение заготовки при радиально-прямом выдавливании на оправке / И. С. Алиев, Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Металургія : наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2008. – Випуск 10(141). – С. 201–204.
5. Алиев И. С. Формоизменение заготовки при радиально-прямом выдавливании на оправке / И. С. Алиев, Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1(19). – С. 171–176.
6. Алиева Л. И. Исследование процессов радиального выдавливания методом конечных элементов / Л. И. Алиева, П. Абхари, Я. Г. Жбанков // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1(20). – С. 19–24.
7. Алиева Л. И. Моделирование разрушения в процессе радиального выдавливания фланца / Л. И. Алиева, П. Абхари, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 2–7.
8. Алиева Л. И. Оценка деформируемости металлов при холодном выдавливании энергетическим методом / Л. И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і

- машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 346–350.
9. Алиева Л. И. Оценка пластичности металлов энергетическим методом [Электронный ресурс] / Л. И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – 4 с. – Режим доступу до роботи: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2003-o/pdfs/074.pdf>.
  10. Алиева Л. И. Получение утолщений при радиальном выдавливании втулок / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Л. Н. Соколов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – № 2Е(10). – С. 83–87.
  11. Алиева Л. И. Формоизменение в процессе радиального выдавливания высоких фланцев / Л. И. Алиева, П. Абхари, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2009. – № 1 (15). – С. 27–31.
  12. Алиева Л. И. Формоизменение при радиальном выдавливании фланцев / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1Е (6). – С. 135–139.
  13. Антонюк Ф. И Точность холодной осадки цилиндрических заготовок / Ф. И Антонюк, А. Г. Веткин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2000. – № 10. – С. 16–20.
  14. Арчаков А. Т. Определение силовых и кинематических параметров процесса осадки с трением цилиндрического образца / А. Т. Арчаков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2003. – № 4. – С. 8–11.
  15. Арчаков А. Т. Распределение деформаций в цилиндрическом образце после осадки с кручением / А. Т. Арчаков, В. А. Некрасов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2002. – № 9. – С. 6–9.
  16. Афонин А. Н. Моделирование нарезания резьб в системе DEFORM [Электронный ресурс] / А. Н. Афонин. – 2 с. – Режим

- доступу до роботи:[http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es08\\_orgtu.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es08_orgtu.pdf).
17. Афонин А. Н. Моделирование разрушения металлов при пластической деформации в Deform и Ls-Dyna [Электронный ресурс] / А. Н. Афонин. – 9 с. – Режим доступа до роботи: <http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/Orel1.pdf>.
  18. Бастун В. Н. К исследованию закона упрочнения начально изотропных металлов / В. Н. Бастун // Прикл. механика. – 1981. – Т. 17, № 4. – С. 51–57.
  19. Бастун В. Н. К определению связи между напряжениями и деформациями при сложных процессах нагружения на основе учета деформационного упрочнения материала / В. Н. Бастун, Л. М. Шкарапута // Пробл. прочности. – 1987. – № 6. – С. 49–54.
  20. Бастун В. Н. О применимости гипотез упрочнения в области малых пластических деформаций / В. Н. Бастун, Н. И. Черняк // Прикл. механика. – 1973. – Т. 9, № 12. – С. 53–57.
  21. Бастун В. Н. Прикладные проблемы процессов деформационного упрочнения конструкционных материалов / В. Н. Бастун, А. А. Каминский // Успехи механики. – К. : Література Ltd, 2011. – Т. 6, кн. 1. – С. 158–197.
  22. Бастун В. Н. Эффект Баушингера в трансверсально-изотропных материалах с трансляционным упрочнением / В. Н. Бастун // Пробл. прочности. – 2012. – № 1. – С. 5–13.
  23. Белан О. А. Оптимизация технологии изготовления холодной объемной штамповкой гаек с боковым рифлением с помощью программного комплекса DEFORM-3 D [Электронный ресурс] / О. А. Белан, А. А. Сидоров, А. А. Белан. – 4 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es08\\_metiz.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es08_metiz.pdf).
  24. Березін В. Г. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень (статичне навантаження). / В. Г. Березін, М. Г. Чаусов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 2. – С. 15–20.

25. Богатов А. А. Ресурс пластичности при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. –144 с..
26. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты : карманный справочник / У Болтон. – [Пер. с англ.]. – М. : Издательский дом «Додэка-XX1», 2004. – 320 с, ил. – (Серия «Карманный справочник»).
27. Бохоева Л. А. Особенности расчёта на прочность элементов конструкций из изотропных композиционных материалов с допустимыми дефектами : монография. / Л. А. Бохоева. – Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2007. – 192с.
28. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 720 с.
29. Буренников Ю. А. Применение промежуточных отжигов для улучшения механических характеристик заготовок, получаемых при поперечном выдавливании [Электронный ресурс] / Ю. А. Буренников, Е. И. Сивак, Л. И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – 4 с. – Режим доступу до роботи: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2004-h/pdfs/051.pdf>.
30. Васильев К. И. Компьютерное моделирование процесса формоизменения цилиндрической заготовки при открытой осадке / К. И. Васильев, М. В. Соловьев, Е. В. Королева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2005. – № 9. – С. 41–43.
31. Васильев К. И. Моделирование процесса формоизменения цилиндрической заготовки при открытой осадке и прогнозирование возникновения трещины на боковой поверхности / К. И. Васильев, М. В. Соловьев, К. М. Шарапов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць ; тематичний випуск : нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 31. – С. 88–92.



32. Васильев К. И. Определение предельно-допустимой относительной деформации при открытой осадке по критерию возникновения трещины на боковой поверхности / К. И. Васильев, М. В. Соловьев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 195–197.
33. Власов А. В. Программа расчета поврежденности при холодной пластической деформации металлов для постпроцессора DEFORM3D [Электронный ресурс] / А. В. Власов. – 2 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es09\\_mgtu1.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_mgtu1.pdf).
34. Воронцов А. Л. Общая теория контурной осадки / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2008. – № 3. – С. 8–15.
35. Воронцов А. Л. Определение возможности трещинообразования в процессе высадки заготовки / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 5. – С. 3–11.
36. Воронцов А. Л. Определение силовых и геометрических параметров контурной осадки / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2008. – № 4. – С. 3–12.
37. Воронцов А. Л. Определение формы боковой поверхности заготовок при осадке / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 3. – С. 7–16.
38. Воронцов А. Л. Осадка заготовки с разным расширением на верхнем и нижнем торцах / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 4. – С. 3–12.
39. Воронцов А. Л. Осадка малопластичных материалов без обжатия оболочек / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 8. – С. 3–8.

40. Воронцов А. Л. Осадка малопластичных материалов в оболочках / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 7. – С. 3–10.
41. Воронцов А. Л. Осадка малопластичных материалов в поясах / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 8. – С. 3–8.
42. Воронцов А. Л. Пластическое течение при осадке полых заготовок / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 1. – С. 3–8.
43. Воронцов А. Л. Теория осадки с кручением заготовки / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 6. – С. 3–9.
44. Воронцов А. Л. Технологические расчеты осадки полых заготовок / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 2. – С. 7–15.
45. Вплив геометричних параметрів заготовки на утворення утяжини при осадці диска на плиті з отвором / І. С. Алієв, О. Є. Марков, С. В. Янчук, І. Г. Савчинський // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 188–191.
46. Ганаго О. А. Критерий выбора механических схем пластической деформации / О. А. Ганаго // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1993. – № 2. – С. 9–12.
47. Гигиняк Ф. Ф. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану / Ф. Ф. Гигиняк, А. О. Лебедев, О. К. Шкодзінський. – К. : Наукова думка, 2003. – 270 с.
48. Голуб В. П. К задаче построения нелинейных моделей накопления повреждений при ползучести / В. П. Голуб, А. В. Романов // Пробл. прочности. – 1990. – № 6. – С. 9–14.
49. Голуб В. П. К расчёту длительной прочности на основе модели вязкого разрушения Хоффа / В. П. Голуб, Р. Г. Тетерук // Пробл. прочности. – 1993. – № 2. – С. 26–34.
50. Голуб В. П. Критерии длительного разрушения изотропных материалов при плоском напряженном состоянии / В. П. Голуб //

- Теоретическая и прикладная механика : научно-технический сборник. – Харьков. : Основ, 2002. – Вып. 35. – С. 3–19.
51. Голуб В. П. Накопление повреждений и расчёт усталостной долговечности стержней при осевом нагружении / В. П. Голуб, Е. А. Пантелеев // Пробл. прочности. – 1993. – № 4. – С. 3–12.
  52. Голуб В. П. О применимости гипотезы линейного суммирования в задачах ползучести и усталости / В. П. Голуб, А. Д. Погребняк, А. В. Романов // Пробл. прочности. – 1993. – № 10. – С. 20–29.
  53. Голуб В. П. Определяющие уравнения в нелинейной механике повреждённости / В. П. Голуб // Прикл. механика. – 1993. – Т. 29, № 10. – С. 37–49.
  54. Гольшков Р. Оптимизация технологических процессов колесо-прокатного производства с помощью программного комплекса DEFORM [Электронный ресурс] / Р. Гольшков, А. Латаев, А. Харламов // САПР и графика. Опыт использования технологий. – 2006. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_wheel\\_sapr0706.pdf](http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_wheel_sapr0706.pdf).
  55. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. Физико-механические основы пластической деформации / С. И. Губкин. – М. : Металургиздат, 1961. – 376 с.
  56. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1947.
  57. Гунько М. И. Влияние формы инструмента на производительность процесса раскатки колец наружным диаметром свыше 2500 мм / М. И. Гунько, Л. Н. Соколов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 46–49.
  58. Дель Г. Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // Изв. вузов. Машиностроение, 1975. – № 9. – С. 135–137.
  59. Дель Г. Д. Метод делительных сеток / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – М. : Машиностроение, 1979. – 144 с.
  60. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.

61. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла. / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений : научно-технический сборник. – 1983. – № 11. – С. 28–32.
62. Дель Г. Д. Пластичность при немонотонном деформировании / Г. Д. Дель. – Воронеж, 1982. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ 13.04.82, №1813-82.
63. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
64. Диамантопуло К. К. Исследование формоизменения относительно высоких полос при профилировании осадкой с продольным изгибом / К. К. Диамантопуло, В. В. Кухарь // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – №1(20). – С. 181–185.
65. Дмитриева А. Я. Определение влияния угла охвата заготовки при радиальной ковке на механические свойства изделия при помощи программного комплекса DEFORM-3D [Электронный ресурс] / А. Я. Дмитриева. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es10\\_mgtu2.pdf](http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_mgtu2.pdf).
66. Добранюк Юрій Володимирович. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / Добранюк Юрій Володимирович. – К., 2012 – 263 с.
67. Добранюк Ю. В. Моделювання за допомогою програмного комплексу DEFORM 3D напружено-деформованого стану на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення / Ю. В. Добранюк, Л. І. Алієва, В. М. Михалевич // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4(25). – С. 3–10.
68. Добранюк Ю. В. Моделювання за допомогою програмного комплексу Deform-3D напружено-деформованого стану циліндричних зразків під час торцевого стиснення / Ю. В. Добранюк, Є. А. Трач // Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз : тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «ВНТУ–2011» – Вінниця, 2011. – С. 222–224.

69. Добранюк Ю. В. Моделивання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 01.02.04 «Механіка деформівного твердого тіла» / Добранюк Юрій Володимирович ; Ін-т проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. – К., 2012. – 21 с.
70. Добранюк Ю. В. Розрахунок граничного стану та побудова кривих граничних деформацій бічної поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення / Ю. В. Добранюк, В. М. Михалевич, О. В. Михалевич // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38308 від 11 травня 2011 р.
71. Дороговцев А. Я. Математичний аналіз : підручник : у двох частинах. Частина 1 / А. Я. Дороговцев. – К. : Либідь, 1993. – 320 с.
72. Евстратов В. А. Технологическая эффективность осадки и штамповки с активным действием сил трения / В. А. Евстратов, В. И. Кузьменко, Е. А. Кузьменко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2000. – № 8. – С. 3–7.
73. Елизаров Ю. М. Экстраполяция кривых течения на область больших деформаций / Ю. М. Елизаров // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1Е (6). – С. 125–129.
74. Журавлев В. Н. Машиностроительные стали. Справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1981. – 391 с.
75. Зайков М. А. Критерий пластичности при обработке давлением / М. А. Зайков, В. Н. Перетяцько // Изв. вузов. – 1959. – № 8. – С. 75–86.
76. Золочевский А. А. Нелинейная механика деформируемого твердого тела / А. А. Золочевский, А. Н. Склепус, С. Н. Склепус. – Х., 2011. – 720 с. – ISBN 978-966-2262-25-4.
77. Изучение деформированного состояния при разнонаправленной обработке Nb-Ti-сплава / В. М. Ажажа, О. В. Чёрный, Г. Е. Сторожилов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). – 2004. – № 6. – С. 136–139.

78. Ильюшин А. А. Об одной теории длительной прочности / А. А. Ильюшин // Механика твердого тела. – 1967. – № 13. – С. 21–25.
79. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.
80. Испытание пластичности металла при ступенчатом изменении напряженного состояния [Электронный ресурс] / Н. В. Биба, Д. И. Вичужанин, С. В. Смирнов, С. А. Стебунов. – 2001. – 8 с. – Режим доступа до работы: [http://qform3d.ru/db\\_imgs/326/1072.pdf](http://qform3d.ru/db_imgs/326/1072.pdf).
81. Исследование процесса осадки цилиндрической заготовки в программе LS-DYNA [Электронный ресурс] / ОАО «Ульяновский НИАТ», Ульяновский государственный технический университет. – 2 с. – Режим доступа до работы: <http://dynaomd.ru/Osadka.pdf>.
82. Каминский А. А. Деформационное упрочнение и разрушение металлов при переменных процессах нагружения / А. А. Каминский, В. Н. Бастун. – К. : Наукова думка, 1985. – 167 с.
83. Каргин В. Р. Компьютерное моделирование безоправочного волочения тонкостенных труб [Электронный ресурс] / В. Р. Каргин, Б. В. Каргин, Я. А. Ерисов. – 6 с. – Режим доступа до работы: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es10\\_sgau.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_sgau.pdf).
84. Карпов Я. С. Механика композиционных материалов : учеб. пособие / Я. С. Карпов, П. П. Лепихин, И. М. Тараненко ; Национальный аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х. : ХАИ, 2004. – 104 с.
85. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.
86. Кийко И. А. Теория разрушения в процессах пластического течения / И. А. Кийко // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – 1982. – С. 27–40.
87. Кинзин Д. И. Исследование эффективности калибровки сортовых профилей с помощью программы DEFORM-3D [Электронный ре-

- курс] / Д. И. Кинзин, С. С. Рычков. – 2 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es10\\_maggtu1.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_maggtu1.pdf).
88. Ковка и штамповка : справочник : в 4-х т. / Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1985 – Т. 1 : материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е. И. Семенова. – 1985. – 568 с.
  89. Ковка и штамповка : справочник : в 4-х т. / Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1987 – Т. 3. Холодная объемная штамповка – 1987. – 384 с.
  90. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.
  91. Колмогоров В. Л. О сверхглубоком проникании частицы в упругопластическую среду / В. Л. Колмогоров, А. Г. Залазинский, Е. А. Залазинская // Доклады конференции «Забабахинские научные чтения» – Снежинск, 2003. – С. 243.
  92. Комбинированное выдавливание полых деталей с фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, С. В. Мартынов, Б. С. Мороз // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 231–236.
  93. Комп'ютерне моделювання процесу витягування прямокутних коробчастих виробів у середовищі DEFORM-3D [Електронний ресурс] / М. В. Орлюк, О. В. Холявік, Д. М. Савченко, К. Лукасик // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування. – НТУ «КПІ». – № 60. – С. 81–83. – [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/VKPI\\_mash/2010\\_60/doc/81-83.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/VKPI_mash/2010_60/doc/81-83.pdf).
  94. Коробова Н. В. Исследование влияния схемы комбинированного выдавливания на разностенность [Електронний ресурс] / Н. В. Коробова, Т. В. Денищев. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es10\\_mgtu1.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_mgtu1.pdf).
  95. Косенко М. В. Деформированное состояние полых конических деталей при комбинированном выдавливании / М. В. Косенко,

- И. С. Алиев, И. В. Нагорская // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 105–110.
96. Коцюбивская Е. И. Определение напряжений и деформируемости заготовок при радиальном выдавливании / Е. И. Коцюбивская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 359–364.
97. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации : справочник / В. А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1980. – 157 с.
98. Кузьмина О. М. Применение метода стержней к анализу напряженно-деформированного состояния при осадке [Электронный ресурс] / О. М. Кузьмина // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – 3 с. – Режим доступу до журн.: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2004-h/pdfs/050.pdf>
99. Кухарь В. В. Напряженно-деформированное состояние и степень использования запаса пластичности на боковой поверхности осажённых заготовок при различных условиях на контакте / В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло, В. А. Бурко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 157–162.
100. Кухарь В. В. Смещённые объёмы при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми плитами / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – №1(19). – С. 177–182.
101. Кухарь В. В. Численные расчёты параметров формоизменения при профилировании заготовок продольным изгибом [Электронный ресурс] / В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – 4 с. – Режим доступу до роботи: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2004-h/pdfs/091.pdf>.



102. Кушнарев А. В. Особенности формоизменения металла при осадке и черновой штамповке непрерывно литых заготовок при производстве железнодорожных колес [Электронный ресурс] / А. В. Кушнарев, В. А. Кропотов, А. А. Богатов. – 2 с. – Режим доступа до работы: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es09\\_nmtk.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_nmtk.pdf).
103. Лебедев А. А. Деформирование и прочность легированных сталей при низких температурах в условиях сложного напряженного состояния / А. А. Лебедев, В. П. Ламашевский, И. В. Маковецкий // Пробл. прочности. – 2010. – № 4. – С. 28–37.
104. Лебедев А. А. Методы испытаний и механика разрушения листовых материалов при двухосном растяжении / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка. – Луцк : Надстырье, 2002. – 214 с.
105. Лебедев А. А. Модель накопления поврежденности в металлических материалах при сложном напряженном состоянии / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич // Проблемы прочности. – 1997. – № 3. – С. 55–63.
106. Лебедев А. А. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов – К. : Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. – 133 с.
107. 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.
108. Леванов А. Н. Технологическая эффективность осадки и штамповки с активным действием сил трения / А. Н. Леванов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1995. – № 2. – С. 6–8.
109. Леонидов А. Н. Моделирование в Q-form технологии горячей объемной штамповки фланца [Электронный ресурс] / А. Н. Леонидов // – Режим доступа до работы: [http://www.qform3d.ru/db\\_files/471/1077.pdf](http://www.qform3d.ru/db_files/471/1077.pdf).
110. Лепин Г. Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности / Г. Ф. Лепин. – М. : Metallurgy, 1976. – 344 с.

111. Лепихин Петр Павлович. Структура определяющих соотношений вязкоупругопластического состояния материалов : дис. ... доктора физ.-мат. наук : 01.02.04 / Лепихин Петр Павлович ; НАН Украины, Институт проблем прочности. – К., 1997. – 351 с.
112. Лепихин П. П. Построение определяющих соотношений изотропных упрочняющихся упругопластических материалов дифференциального типа сложности п. Сообщение 1. Конечные деформации. / Лепихин П.П. // Пробл. прочности. – 2009. – № 2. – С. 27–42.
113. Лепихин П. П. Теоретическое построение начальной и последующих поверхностей нагружения изотропных упрочняющихся упругопластических материалов дифференциального типа / Лепихин П. П. // Пробл. прочности. – 2010. – № 5. – С. 165–173.
114. Литвинов Р. А. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Электронный ресурс] / Р. А. Литвинов, В. А. Шилов, Д. Л. Шварц. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es09\\_ugtu1.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_ugtu1.pdf).
115. Литвинов Р. А. Моделирование формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Электронный ресурс] / Р. А. Литвинов, Д. Л. Шварц, В. А. Шилов. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es09\\_ugtu2.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_ugtu2.pdf).
116. Локощенко А. М. Осадка круговых цилиндров с учетом бочкообразования / А. М. Локощенко, П. А. Моссаковский, В. В. Носов // Ломоносовские чтения : тезисы докладов научной конференции ; секция механики: (апрель 2008 г., Москва) / МГУ им. М. В. Ломоносова. – М. : Изд-во Московского университета, 2008. – С. 120–121.
117. Маковецкий А. В. Анализ напряженно-деформированного состояния поковок из титановых сплавов при горячей штамповке / А. В. Маковецкий, В. В. Маковецкий // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – № 2Е (10). – С. 121–128.

118. Маковецкий А. В. Использование конечно-элементного моделирования в ряде задач обработки металлов давлением / А. В. Маковецкий, А. В. Маковецкий // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – №1(19). – С. 61–66.
119. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.
120. Мамутов В. С. Расчеты процессов листовой штамповки при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA 3D / В. С. Мамутов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 11–15.
121. Матвийчук В. А. Математическая модель повреждаемости металлов при сложном двухэтапном деформировании / В. А. Матвийчук // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 126–130.
122. Матвийчук В. А. Построение математической модели накопления повреждаемости в металлах при немонотонном деформировании для комбинации сдвиг – сжатие / В. А. Матвийчук // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – №1(20). – С. 13–18.
123. 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.
124. Матвийчук В. А. Способы испытания металлов на пластичность / В. А. Матвийчук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2008. – № 6. Ч. 2. – С. 156–161.
125. Матвийчук В. А. Розробка маловідходних процесів формування тонкостінних циліндричних деталей / В. А. Матвийчук, В. М. Михалевич, В. О. Краєвський // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 281–286.

126. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии : справочник / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский. – К. : Наука думка, 1983. – 336 с.
127. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский. – К. : Ин Юре, 2003. – 540 с.
128. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В. Т. Трощенко, А. А. Лебедев, В. А. Стрижало [и др.]. – К. : Логос, 2000. – 570 с.
129. Михайленко Ф. П. Исследования напряженно-деформированного состояния и удельных нагрузок при осадке с кручением и без кручения образцов из алюминиевых сплавов / Ф. П. Михайленко, Д. А. Щербатов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2008. – № 10. – С. 3–13.
130. 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.
131. Михалевич В. М. Апроксимація залежностей між компонентами деформацій на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38309 від 11 травня 2011 р.
132. Михалевич В. М. Визначення граничних деформацій бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження за допомогою імітаційного моделювання / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, Є. А. Трач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : тематичний випуск : нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 45 – С. 104–107.
133. Михалевич В. М. Визначення за початковою ділянкою траєкторії деформацій граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження / В. М. Михалевич,

- Ю. В. Добранюк, Є. А. Трач // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2 – С. 163–167.
134. Михалевич В. М. Вісесиметрична осадка циліндричних заготовок / В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, Ю. В. Добранюк // Наукові нотатки : міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк, 2009. – Випуск 25, ч. 1. – С. 241–249.
135. 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.
136. Михалевич В. М. Моделирование предельных деформаций на свободной поверхности при осесимметричной осадке / В. М. Михалевич, В. А. Краевский, Ю. В. Добранюк // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением : мат. междунаrod. науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб, 2009. – С. 108–112.
137. Михалевич В. М. Моделирование предельных деформаций на свободной поверхности и оптимизация ступенчатого деформирования / В. М. Михалевич, В. А. Краевский, Ю. В. Добранюк // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств : сборник докладов и материалов X конгресса «Кузнец–2010». – Рязань, 2010. – С. 367–378.
138. Михалевич В. М. Моделирование циклической осесимметричной осадки цилиндрических образцов / В. М. Михалевич, В. О. Краевский, Ю. В. Добранюк // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія : технічні науки. – Вінниця, 2009. – Випуск 2. – С. 26–31.
139. Михалевич В. М. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Частина 1. Апроксимація деформацій / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 97–102.
140. Михалевич В. М. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісеси-

метричного осадження. Частина 2. Визначення накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій на основі різних апроксимацій / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 3. – С. 99–102.

141. Михалевич В. М. Моделювання граничних пластичних деформацій при нестационарних процесах та задачі оптимізації / В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, Ю. В. Добранюк // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : тематичний випуск : нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 31. – С. 64–70.
142. Михалевич В. М. Накопичена деформація та інтенсивність логарифмічних деформацій при осадці циліндричних зразків з бочкоутворенням / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1(20). – С. 129–134.
143. Михалевич В. М. Необхідні та достатні умови опуклості функції пошкоджень під час нестационарних процесів / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, О. В. Михалевич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 113–117.
144. Михалевич В. М. Побудова ефективних обчислювальних схем у Maple під час розв'язання задачі визначення граничних деформацій за умов складного деформування [Електронний ресурс] / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, О. В. Михалевич // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2009. – №2. – 7 с. – Режим доступу до журн.: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009\\_2/2009-2.htm](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009_2/2009-2.htm).
145. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. – 195 с.
146. Михалевич В. М. Удосконалення експериментальної частини експериментально-аналітичної методики дослідження напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричної осадки [Електронний ресурс] / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, Є. А. Трач // Наукові праці

- Вінницького національного технічного університету. – 2011. – №4. – 8 с. – Режим доступу до журн.: [http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011\\_4/2011-4.files/uk/11vmmwas\\_ua.pdf](http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_4/2011-4.files/uk/11vmmwas_ua.pdf).
147. Михалевич В. М. Экспериментально-аналитическая методика и математические модели деформированного состояния на свободной боковой поверхности цилиндрических образцов при осесимметричной осадке / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. — Краматорск : ДГМА, 2010. – №1(22). – С. 114–119.
148. Михеенко Д. Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния металла при формировании механической связи методом конечных элементов / Д. Ю. Михеенко, А. А. Сатонин, В. В. Шевченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 505–507.
149. Мишулин А. А. Тензорно-нелинейная модель накопления повреждений / А. А. Мишулин, В. М. Михалевич // Обработка металлов давлением. – Свердловск, 1985. – С. 10–14.
150. Моделирование осадки заготовок в оболочках / Н. А. Шестаков, В. А. Демин, В. Н. Субич, Л. Г. Лобастов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 25–29.
151. Моделирование процесса выдавливания методом конечных элементов / В. Н. Иванов, К. М. Иванов, Е. А. Пригорский, Д. В. Усманов // Инструмент и технологии. – СПб., 2006. – Вып. 23. – С. 94–102.
152. Мороз Б. С. Некоторые результаты моделирования прессования с помощью конечно-элементной программы QForm / Б. С. Мороз // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 184–187.
153. Москвитин В. В. Сопротивление вязко-упругих материалов / В. В. Москвитин. – М. : Наука, 1972. – 327 с.

154. Москвитин В. В. Циклические нагрузки элементов конструкций / В. В. Москвитин. – М. : Наука, 1981. – 344 с.
155. Надаи А. Пластичность и разрушение твёрдых тел / А. Надаи. – М. : Мир, 1969. – Т.2. – 863 с.
156. Нахайчук О. В. Методы расчёта процессов холодной обработки давлением [Электронный ресурс] / О. В. Нахайчук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – 5 с. – Режим доступу до роботи: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2005-h/pdfs/s2-018.pdf>.
157. Неравномерная деформация при однонаправленном течении металла в штампе / А. З. Журавлев, Н. А. Ивченко, Г. Н. Баклаг [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. – 2007. – Т. 7, № 4(35). – С. 451–458.
158. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування : монографія / О. В. Нахайчук, О. О. Розенберг, В. А. Огородников [та ін.]. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с.
159. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
160. Огородников В. А. Деформируемость металла при ротационном обжатии. / В. А. Огородников, Н. А. Шестаков // Изв. вузов: Машиностроение, 1975. – № 9. – С. 147–152.
161. Огородников В. А. Диаграммы пластичности и особенности их построения / В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, В. И. Музычук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 251–255.
162. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Выща шк., 1983. – 200 с.
163. Огородников В. А. Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації :



- монографія / В. А. Огородников, В. І. Музичук, О. В. Нахайчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 179 с.
164. Охрименко Я. М. Технологическая неравномерность деформации / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 12. – С. 3–7.
165. Оценка деформируемости заготовок при радиальном выдавливании с противодавлением / Е. И. Коцюбивская, И. О. Сивак, Л. И. Алиева, С. В. Куценко // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – №1(19). – С. 29–33.
166. Оценка точности экспериментально-теоретического определения напряженно-деформированного состояния в процессах обработки металлов давлением / А. В. Лясников, К. М. Иванов, Д. П. Кузнецов, В. А. Кузнецов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1995. – № 1. – С. 10–13.
167. Панин П. М. Напряженно деформированное состояние кольцевых заготовок при осадке со сдвигом / П. М. Панин, Д. В. Хван, Н. А. Евдокимова // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2(23). – С. 103–106.
168. Параметры модели, формирующей карту материала в процессах обработки давлением / В. А. Огородников, Л. И. Алиева, В. М. Кожушаный, И. А. Деревенько // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – №1(26). – С. 91–98.
169. Пат. 81037 Україна, МПК G01N 3/00, G01N 3/28. Спосіб оцінки впливу динамічних перевантажень на питому роботу руйнування пластичного матеріалу / Чаусов М. Г., Пилипенко А. П. ; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. – № а200511732 ; заявл. 09.12.05 ; опубл. 26.11.07, бюл. № 19.
170. Песин А. М. Моделирование формоизменения поверхностных трещин непрерывно литого сляба при черновой прокатке на широкополосном стане [Электронный ресурс] / А. М. Песин, В. М. Салганик, Д. О. Пустовойтов. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es10\\_maggtu2.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_maggtu2.pdf).

171. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К. : Наукова думка, 1976. – 415 с.
172. Писаренко Г. С. Пластичность и прочность материалов при нестационарных нагружениях / Г. С. Писаренко, Н. С. Можаровский, Е. А. Антипов. – К. : Наукова думка, 1984. – 216 с.
173. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров [и др.] – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.
174. Погорильчук А. Я. Моделирование технологического процесса радиальной ковки в программном комплексе DEFORM 3D [Электронный ресурс] / А. Я. Погорильчук. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es09\\_mgtu2.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_mgtu2.pdf).
175. Постановка и решение частного случая основной задачи теории суммирования повреждений / В. М. Михалевич, В. А. Матвийчук, Е. А. Трач [и др.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : тематичний випуск : нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 47(953) – С. 67–71.
176. Потапова Л. Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? / Л. Б. Потапова, В. П. Ярцев. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 244 с.
177. Применение способа осадки слитков кольцами в процессах ковки валов / И. С. Алиев, О. Е. Марков, М. В. Олешко, В. Н. Злыгорев // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2(23). – С. 94–98.
178. Применение траекторий перемещения частиц для прогнозирования структуры металла при осадке / Г. П. Жигулёв, М. Н. Скрипаленко, А. М. Широких, М. М. Скрипаленко // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – №1(22). – С. 32–37.
179. Прогнозирование разрушения металла при холодной объемной штамповке с помощью адаптивной модели разрушения / Н. В. Биба, С. А. Стебунов, С. В. Смирнов, Д. И. Вичужанин //

- Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2003. – № 3. – С. 39–44.
180. Прогнозування граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні / В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, Ю. В. Добранюк, Є. А. Трач // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012 – № 1(30) – С. 24–30.
181. Прочность материалов и конструкций / Под ред. В. Т. Трощенко. – К. : Академперіодика, 2005. – 1088 с.
182. Прочность материалов и конструкций : серия монографий в 3 т. Т. 1. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей / В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский, Е. В. Воробьев ; под общей редакцией В. Т. Трощенко. – К. : Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 504 с.
183. Прочность материалов и конструкций : серия монографий в 3 т. Т. 3. Прочность толстостенных оболочек вращения при импульсном нагружении / П. П. Лепихин, В. А. Ромашенко ; под общей редакцией В. Т. Трощенко. – К. : Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2010. – 320 с.
184. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твёрдого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
185. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1966. – 752 с.
186. Раздача с осадкой кольцевых заготовок с использованием жидкого наполнителя / А. М. Шнейберг, Ф. П. Михайленко, А. С. Пудов, О. С. Кошелев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. – № 3. – С. 12–19.
187. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов : метод испытания на сжатие : ГОСТ 25.503-97. – [Чинний від 1999-07-01]. – Минск. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 20 с. – (Госстандарт Украины).
188. Рябичева Л. А. Компьютерное моделирование потери устойчивости при осадке / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // Удосконалення

- процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 91–96.
189. Савуляк В. В. Пластичне деформування тонколистового матеріалу в умовах значних локалізацій деформацій та напружень : монографія / В. В. Савуляк, І. О. Сивак, В. І. Савуляк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 150 с.
190. Самоорганизация структур листовых материалов при динамических неравновесных процессах. / Н. Г. Чаусов, Е. Э. Засимчук, А. П. Пилипенко, Е. М. Полохнюк. // Вестник Тамбовского Университета, серия: естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15, вып. 3. – С. 892–894.
191. Сивак И. О. Влияние неравномерности напряженного состояния на пластичность [Электронный ресурс] / И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, Е. И. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – 5 с. – Режим доступу до журн.: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2003-o/pdfs/059.pdf>.
192. Сивак И. О. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбивская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 73–76.
193. Сидоров А. Настоящее и будущее моделирования процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс] / А. Сидоров. – 3 с. – Режим доступу до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_sapr1007.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_sapr1007.pdf)
194. Сидоров А. Определение волокнистого строения в поковках типа стержня с полусферическим фланцем [Электронный ресурс] / А. Сидоров. – 6 с. – Режим доступу до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_zag0509.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_zag0509.pdf).
195. Сидоров А. А. Исследование процессов прямого и обратного выдавливания деталей типа стакан с использованием программного комплекса DEFORM 2D [Электронный ресурс] / А. А. Сидоров. –

10 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es08\\_mgtu.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es08_mgtu.pdf).

196. Скрябин С. А. Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках / С. А. Скрябин, В. Л. Калюжный, Д. С. Чайка // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 147–155.
197. Смирнов С. В. Поврежденность металлических материалов при пластической деформации. / С. В. Смирнов // Труды Всероссийской научной конференции. Часть 1. Математические модели механики, прочность и надежность конструкций, матем. моделирование и краев. задачи. – Самара : СамГТУ, 2004. – С. 203–206.
198. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов / Г. А. Смирнов-Аляев. – М. – Л. : Машгиз, 1961. – 463 с.
199. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формоизменения материалов. / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
200. Смирнов-Аляев Г. А. Теория пластических деформаций металлов / Г. А. Смирнов-Аляев, В. М. Розенберг. – Механика конечного формоизменения. – М. – Л. : Машгиз, 1956. – 367 с.
201. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 367 с.
202. Совершенствование технологииковки осесимметричных поковок / [О. Е. Марков, Л. Н. Соколов, С. В. Янчук, П. Абхари] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 295–298.
203. Соколов Л. Д. Сопротивление металлов пластической деформации / Л. Д. Соколов. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 278 с.

204. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением // Ю. Г. Калпин, В. И. Перфилов, П. А. Петров [и др.]. – М. : МГТУ «МАМИ», 2007. – 118 с.
205. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Ю. Г. Калпин, В. И. Перфилов, П. А. Петров [и др.]. – М. : Машиностроение, 2011. – 244 с.
206. Стрижало В. А. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях / В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский, Е. В. Воробьев – К. : Наукова думка, 1990. – 160 с.
207. Ступка А. Г. Осадка с приложением вибронагрузки [Электронный ресурс] / А. Г. Ступка, А. Г. Кияшко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – 3 с. – Режим доступу до журн.: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2004-h/pdfs/046.pdf>.
208. Токарев А. В. Влияние холодной пластической осадки на структурное состояние инструментальной стали / А. В. Токарев, Д. В. Хван, А. А. Воропаев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 270–272.
209. Третьяков А. В. Механические свойства сталей и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.
210. Третьяков А. В. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. Карманный справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянова. – Машиностроение, 1971. – 64 с.
211. Трофимов В. Н. Модель накопления поврежденности при пластической деформации / В. Н. Трофимов // Вестник МГТУ. – 2007. – №1. – С. 47–50.
212. Трошин В. Г. Анализ силового режима процессов осадки и поперечного выдавливания / В. Г. Трошин, Д. В. Усманов, С. В. Даниленко // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – №1(19). – С. 77–80.

213. Успехи механики. Издание в 6-ти томах / под редакцией А. Н. Гузя. Том 1. – К. : А.С.К., 2005. – 776 с.
214. Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы : монография / О. А. Розенберг, В. А. Огородников, А. В. Грушко [и др.]. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 140 с.
215. 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 : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 221–225.
216. Фридман Я. Б. Механические свойства материалов, т. 1 и 2. / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974.
217. Харитонов А. О. Численное моделирование осадки материала с выдавливанием в полость штампа под ребро жесткости / А. О. Харитонов, О. А. Никитина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2003. – № 11. – С. 39–41.
218. Харламов А DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс] / А. Харламов, А. Уваров // САПР и графика. Инструменты конструктора-технолога. – 2003. – 5 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_sapr0603.pdf](http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_sapr0603.pdf).
219. Харченко В. В. Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом вязкопластических эффектов / В. В. Харченко. – К., 1999. – 280 с.
220. Хван А. Д. Пластическая обработка плоских заготовок осадкой со сдвигом / А. Д. Хван, А. Д. Попов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 10. – С. 35–37.
221. Хван А. Д. Устойчивость длинномерных цилиндрических заготовок при осадке с кручением / А. Д. Хван, А. А. Воропаев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 12. – С. 10–13.

222. Хван Д. В. Изготовление длинномерных ступенчатых поковок осадкой / Д. В. Хван, С. В. Пешков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1995. – № 3. – С. 17–18.
223. Хван Д. В. Пластическая осадка длинномерных заготовок в условиях немонотонного нагружения / Д. В. Хван, А. В. Токарев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 192–194.
224. Хван Д. В. Пластическая осадка кольцевых заготовок / Д. В. Хван, П. М. Панин, Н. А. Евдокимова // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением : мат. международ. науч.-техн. конф. – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2009. – С. 153–157.
225. Хван Д. В. Применение процессов осадки для восстановления длинномерных деталей / Д. В. Хван, С. В. Пешков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1993. – № 9. – С. 23.
226. Холодная объёмная штамповка / под ред. Г. А. Навроцкого. – М. : Машиностроение, 1973. – 495 с.
227. Хомяков И. А. Технологическая эффективность осадки и штамповки с активным действием сил трения / И. А. Хомяков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1997. – № 11. – С. 12–15.
228. Церна И. А. Использование системы DEFORM для моделирования штамповки обкатыванием на специальном винтовом прессе [Электронный ресурс] / И. А. Церна, А. А. Сидоров. – 3 с. – Режим доступа до роботи: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es10\\_dongtu.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_dongtu.pdf).
229. Чаусов Н. Г. Влияние динамических перегрузок на кинетику разрушения конструкционных материалов / Н. Г. Чаусов, А. П. Пилипенко // Надежность и долговечность машин и сооружений : международный научно-технический сборник. – 2006. – Вып. 27. – С. 131–137.



230. Чаусов Н. Г. Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения / Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, А. П. Пилипенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 3. – С. 16–21.
231. Чаусов Н. Г. Методы управления механизмами пластического течения металлов / Н. Г. Чаусов, А. П. Пилипенко, В. М. Параца // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : сборник статей по материалам II Межд. конф. – М. : Intercontact-Наука, 2007. – С. 71–73.
232. Чаусов Н. Г. Эволюция поля деформации на поверхности листовой нержавеющей стали при динамических неравновесных процессах. / Н. Г. Чаусов, В. Г. Березин // Вісник національного технічного університету України «КПІ», серія : Машинобудування. – 2011. – № 63. – С. 253–257.
233. Чаусов Н. Г. Эффекты проявления кратковременного разупрочнения пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения / Н. Г. Чаусов, А. П. Пилипенко, В. М. Параца // Актуальные проблемы прочности : сборник материалов 46 Межд. конф. – Витебск : УО ВГТУ, 2007. – Ч. 1. – С. 207–212.
234. Шевченко Ю. Н. Термовязкоупругопластические процессы деформирования элементов твердого тела (обзор) / Ю. Н. Шевченко // Прикл. механика. – 1994. – № 3. – С. 3–24.
235. Шестаков Н. А. Моделирование потери устойчивости пластической деформации / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, А. В. Власов // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1(20). – С. 9–12.
236. Шестаков Н. А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, В. А. Демин. – М. : Физматлит, 2011. – 264 с.
237. Шишков М. М. Марочник сталей и сплавов : справочник / М. М. Шишков. – 3-е изд., дополненное. – Донецк : Юго-Восток, 2002. – 456 с.
238. Шнейберг А. М. Гидравлическое моделирование температурного поля в зоне контактного трения «инструментальная сталь – алюминий» при комбинированном нагружении / А. М. Шнейберг,

- Ф. П. Михайленко, Д. А. Щербатов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2009. – № 11. – С. 33–42.
239. Шнейберг А. М. Исследование процесса осадки при однокомпонентном и комбинированном нагружении посредством компьютерного моделирования / А. М. Шнейберг, А. С. Пудов, О. С. Кошелев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 8. – С. 31–40.
240. Шнейберг А. М. Приближенный аналитический метод оценки силы деформирования при осадке цилиндрических образцов с кручением / А. М. Шнейберг, Ф. П. Михайленко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 9. – С. 7–15.
241. Шнейберг А. М. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса раздачи кольцевых заготовок при осадке с кручением / А. М. Шнейберг, Ф. П. Михайленко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 2. – С. 3–7.
242. Шнейберг А. М. Экспериментальное определение крутящего момента при осадке с осевым вращением деформирующего инструмента / А. М. Шнейберг, Ф. П. Михайленко, Д. А. Щербатов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2008. – № 9. – С. 3–10.
243. Шнейберг А. М. Экспериментальное определение температурных параметров при осадке с кручением и обратным выдавливанием / А. М. Шнейберг, Ф. П. Михайленко, Д. А. Щербатов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2009. – № 7. – С. 3–9.
244. Штамп для осадки длинномерных цилиндрических заготовок [Электронный ресурс] / А. Д. Хван, Д., В. Хван, А. А. Воропаев, А. Н. Анисимов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – 3 с. – Режим доступу до журн.: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/omd/2004-h/pdfs/012.pdf>.

245. Штерн М. Б. К теории пластичности пористых тел и уплотняемых порошков / М. Б. Штерн // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов : сборник научных трудов. – К. : Наукова думка, 1985. – С. 12–23.
246. Ayada T. Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials / T. Ayada, Higashino, K. Mori // Proceedings of 1<sup>st</sup> ICTP, Advanced Technology of Plasticity. – 1984. – V. 1. – P. 553–558.
247. Babich D. V. Deformation of damaged elastic-brittle isotropic materials with a fixed concentration of microdefects at complex stress state / D. V. Babich, V. N. Bastun // J. Strain Analyses. – 2011. – № 1. – P. 67–72.
248. Bhattacharya B. Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation / B. Bhattacharya, B. Ellingwood // International Journal of Fatigue . – № 20(9). P. 631–639.
249. Bonora N. Identification and measurement of ductile damage parameters / N. Bonora // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 1999. – № 34(6). – P. 63–78.
250. Brozzo P. A new method for the prediction of formability limits of metal sheets / P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina // Proceeding of the 7<sup>th</sup> biennial congress of International Deep Drawing Research Group. – 1972.
251. Chausov M. G. Laws of deformation processes and fracture of plastic steel from the point of view of dynamic overloading / M. G. Chausov, A. P. Pylypenko // Mechanika. – 2005. – № 4(54). – P. 24–29.
252. Cocroft M. G. Ductility and the workability of metais / M. G. Cocroft, D. J. Latham // Journal of the Institute of metals. – 1968. – V. 96. – P. 33–39.
253. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression / V. M. Mikhalevich, Y. V. Dobranuk, V. A. Kraevsky, O. V. Mikhalevich // Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi. – Iasi, 2008. – V. 54(58), №. 3–4. – P. 49–53.
254. Evaluation of MSC. SuperForge for 3D Simulation of Streamlined and Shear Extrusion Dies [Электронный ресурс] / Bhavin V. Mehta, Ibrahim Al-Zkeri, Jay S. Gunasekera [etc.]. – 3 с. – Режим доступа

- до работы: <http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/auto00/p07200.pdf>.
255. Finite element modeling of damage accumulation in bolted composite joints under incremental tensile loading [Электронный ресурс] / Th. Kermanidis, G. Labeas, K. I. Tserpes, Sp. Pantelakis. – 14 p. – Режим доступа до роботи: <http://ansys.net/ansys/papers/306.pdf>.
256. Freudental A. M. The inelastic behavior of engineering metals and structures / A. M. Freudental. – New York : Wiley, 1950.
257. Halford G. R. Cumulative fatigue damage modeling—crack nucleation and early growth / G. R. Halford // International Journal of Fatigue. – 1997. – P. 253–260.
258. Hofman James Prevention of ductile fracture in forward extrusion [Электронный ресурс] / James Hofman, Camille Santiago-Vega, Victor H. Vazquez. – 10 p. – Режим доступа до роботи: [http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/ref\\_110.pdf](http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/ref_110.pdf).
259. Kim Hyunkee Prediction and elimination of ductile fracture in cold forgings using FEM simulations [Электронный ресурс] / Hyun-kee Kim, Masahito Yamanaka, Taylan Altan. – 26 p. – Режим доступа до роботи: [http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/ref\\_103.pdf](http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/ref_103.pdf).
260. Lebedev A. A. Model of material plastic deformation in axisymmetric compression of cylindrical specimens / A. A. Lebedev, V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dodranuk // Metalurgija. – 2010. – V. 49, №. 3. – P. 228.
261. Lennon A. B. A stochastic model of damage accumulation in acrylic bone cement [Электронный ресурс] / A. B. Lennon // A thesis submitted to the university of Dublin in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor in philosophy. – Trinity College Dublin, 2002. – 284 p. – Режим доступа до роботи: <http://www.tcd.ie/bioengineering/documents/LennonAB-Thesis.pdf>.
262. Lepov V. V. Structural modeling of the damage accumulation: the lifetime estimation [Электронный ресурс] / V. V. Lepov, E. A. Arkhangelskaya, V. P. Larionov. – 4 p. – Режим доступа до роботи: <http://www.icf11.com/proceeding/EXTENDED/4891.pdf>.

263. Lubliner J. Plasticity theory [Электронный ресурс] / Jacob Lubliner. – University of California at Berkeley. – 540 p. – Режим доступа до работи: <http://www.ce.berkeley.edu/~coby/plas/pdf/book.pdf>.
264. McClintock F. A. A criterion for ductile fracture by the grown of holes / F. A. McClintock // J. Appl. Mech. – 1968. – P. 363—371.
265. 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. – 2011. – V. 43, № 6. – P. 591–603.
266. Osakada K. Ductile fracture of carbon steel under cold metal forming conditions: Tension and torsion tests under pressure / K. Osakada, A. Watadani, H. Sekiguchi // Buletin of ISME. – 1977 – V. 20. – P. 1557–1565.
267. Oyane M. Criteria of ductile fracture strain / M. Oyane // Buletin of ISME. – 1972. – V. 15. – P. 1507–1513.
268. Patrick Laug Automatic remeshing of deformed and damaged structures [Электронный ресурс] / Patrick Laug, Houman Borouchaki // European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. – 2004. – 20 p. – Режим доступа до работи: <http://www-rocq.inria.fr/who/Patrick.Laug/publications/laug-2004-eccomas.pdf>.
269. Rice J. R. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields / J. R. Rice, D. M. Tracey // J. Mech. Phys. Solids. – 1969. – V. 17. – P. 201–217.
270. Smirnov S. V. Definition of the form for kinetic equation of damage during the plastic deformation. / S. V. Smirnov, T. V. Domilovskaya, A. A. Bogatov // In: Advanced Methods in Materials Processing Defects. Elsevier Science B.V. – 1997. – P. 71–80.
271. Urban J. Crushing and fracture of lightweight structures / J. Urban // PhD Thesis. Technical University of Denmark. – 2003. – 242 p.

*Наукове видання*

**Михалевич Володимир Маркусович  
Добранюк Юрій Володимирович**

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО  
ТА ГРАНИЧНОГО СТАНІВ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНИХ  
ЗРАЗКІВ ПРИ ТОРЦЕВОМУ СТИСНЕННІ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Ю. Добранюком

Підписано до друку 20.06.2013 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 10,39  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) Зам № 06-05

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 ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.