

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, О. І. Тютюнник

**МОДЕЛІ НАКОПИЧЕННЯ
ПОШКОДЖЕНЬ В ІЗОТРОПНИХ
МАТЕРІАЛАХ ПРИ ХОЛОДНОМУ
ДВОХЕТАПНОМУ ДЕФОРМУВАННІ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2024

УДК 539.3

М 69

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 30.04.2024 р.)

Рецензенти:

С. О. Пискунов, доктор технічних наук, професор

Л. К. Поліщук, доктор технічних наук, професор

Р. І. Сивак, доктор технічних наук, професор

Михалевич, В. М.

М 69 Моделі накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах при холодному двохетапному деформуванні : монографія [Електронний ресурс] / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, О. І. Тютюнник. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – (PDF, 121 с.)

ISBN 978-617-8163-11-2

В монографії проведено аналітичне дослідження моделі накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах при холодному двохетапному деформуванні. Визначено математично допустимі значення параметрів критеріального співвідношення тензорно-нелінійної моделі. Здійснена комп'ютерна реалізація математичної моделі та розрахунків залишкового ресурсу при двохетапному деформуванні в середовищі математичної системи Maple 9. Розроблена програма для проведення розрахунків ресурсу пластичності.

Здійснено чисельне дослідження закономірності накопичення пошкоджень, використовуючи різні значення параметрів. Виконана перевірка адекватності моделі при зіставленні з наявними експериментальними даними. Розроблено рекомендації для підвищення деформованості та якості заготовок за умови окремих випадків холодної обробки тиском малопластичних матеріалів.

УДК 539.3

ISBN 978-617-8163-11-2

© М. Михалевич, Ю. Добранюк, О. Тютюнник, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	8
1.1. Поняття обробки металів тиском	8
1.2. Процеси холодного видавлювання	9
1.3. Оцінка здатності матеріалів до пластичної деформації	14
1.3.1. Оцінка пластичності матеріалів під час стаціонарного деформування.	14
1.3.2. Накопичення пошкоджень при пластичній деформації. Критерії руйнування.	15
1.4. Висновки. Задачі дослідження.....	23
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ГРАНИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ	24
2.1. Функції пошкодженості.....	24
2.2. Двохетапне деформування	28
2.3. Висновки	38
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ ДВОХЕТАПНОМУ ДЕФОРМУВАННІ	40
3.1. Аналітичне дослідження моделі накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах під час холодного двохетапного деформування	40
3.2. Комп'ютерна реалізація досліджувальної математичної моделі та розрахунків залишкового ресурсу при двохетапному деформуванні в середовищі математичної системи Maple 9.....	48
3.3 Чисельне дослідження закономірності накопичення пошкоджень за допомогою математичної моделі при різних значеннях параметрів.....	60
3.4 Перевірка адекватності моделі накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах під час холодного двохетапного деформування при зіставленні з наявними експериментальними даними	80

3.5. Розробка рекомендацій для підвищення деформованості та якості заготовок за умови окремих випадків холодної обробки тиском малопластичних матеріалів.....	81
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106

ВСТУП

В сучасному машинобудівному виробництві високого розвитку та застосування набули процеси обробки металів тиском. Ці процеси, незалежно від їх видів, як правило, не супроводжуються монотонною деформацією. Тобто будь-який процес виготовлення деталей тиском супроводжується декількома видами пластичних деформацій, або змінами їх напрямку. А питання міцності виготовлених деталей залишаються на першому місці.

Питання дослідження накопичення пошкоджень і оцінки ресурсу пластичності металів при холодному деформуванні є надзвичайно актуальними, оскільки визначають аналіз можливості інтенсифікації методів обробки металів тиском і забезпечення необхідних службових характеристик виробів. Досить важливим питанням обробки металів тиском є оцінка здатності матеріалів сприймати пластичну деформацію без руйнування.

Двохетапне деформування є важливим класом деформування завдяки декількох важливих причин. По-перше, вказаний клас деформування є одним із найпростіших представників немонотонного пластичного деформування, якому притаманні численні яскраво виражені ефекти в залежностях для граничних деформацій. По-друге, в значній кількості випадків напружено-деформований стан у заготовках під час обробки матеріалів тиском можна взагалі розглядати (при певному наближенні) як двохетапне деформування. По-третє, двохетапне деформування порівняно легко реалізувати експериментально, а моделі, які описують ці процеси, набувають гарного аналітичного вигляду, що полегшує їх дослідження. У такому разі спрощується аналіз придатності заготовки сприймати певну технологічну операцію.

Роботу виконано згідно до плану кафедри вищої математики Вінницького національного технічного університету у рамках держдоговірної теми 1001 – «Розробка рекомендацій по впровадженню процесу ротаційної витяжки циліндричних та конусних оболонок», держреєстрація № 0108U004403.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає в використанні моделей накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах при холодному двохетапному деформуванні для покращення оцінки технологічних процесів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані **наступні задачі роботи дослідження:**

- аналітично дослідити модель накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах під час холодного двохетапного деформування;
- здійснити комп'ютерну реалізацію досліджувальної математичної моделі в середовищі математичної системи Maple 9;
- чисельно дослідити закономірності накопичення пошкоджень за допомогою математичної моделі;
- перевірити адекватність моделі накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах під час холодного двохетапного деформування при зіставленні з наявними експериментальними даними;
- розробити рекомендації для підвищення деформованості та якості заготовок за умови окремих випадків холодної обробки тиском малопластичних матеріалів.

Об'єктом дослідження є процес холодного двохетапного деформування.

Предмет дослідження – модель накопичення пошкоджень при холодному двохетапному деформуванні.

Методи для проведення дослідження. Методологічною основою виконання дослідження є положення феноменологічної теорії деформованості металів без руйнування та математичної теорії пластичності. Для досягнення поставленої мети були використані наступні теоретичні методи проведення дослідження: застосування математичного аналізу при створенні та аналізі математичних моделей, аналітичної геометрії, елементів апарату тензорного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше створено пакет прикладних програм у середовищі Maple для здійснення теоретичного дослідження математичної моделі накопичення пошкоджень, проведення розрахунків залишкового ресурсу пластичності при двохетапному пластичному деформуванні та побудови графіків залежності ресурсу пластичності на другому етапі від уже використаного ресурсу пластичності на першому етапі двохетапного деформування;
- вперше визначено математично допустимі зміни параметрів моделі, що входять в її критеріальне співвідношення і за яких вона набуває лише дійсних значень.

Практичне значення отриманих авторами результатів:

- створено пакет прикладних програм у середовищі Maple для визначення залишкового ресурсу пластичності при двохетапному пластичному деформуванні з графічною візуалізацією відповідних залежностей;
- визначено аналітично допустимі межі зміни параметрів математичної моделі накопичення пошкоджень при двохетапному деформуванні;
- визначено діапазони зміни параметрів моделі накопичення пошкоджень при описанні поведінки реальних матеріалів за умови окремих класів двохетапного деформування;
- виявлено додаткові закономірності накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах для двохетапного деформування розтяг-стиск;
- розроблено рекомендації для підвищення деформованості та якості заготовок за умови окремих випадків холодної обробки тиском малопластичних матеріалів.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Поняття обробки металів тиском

Розвиток народного господарства країни значною мірою визначається зростанням об'єму виробництва металів, розширенням сортаменту виробів з металів і сплавів та підвищенням їх якісних показників [1], [2], [3], що значною мірою залежить від умов їх виготовлення за допомогою пластичної обробки [1], [4], [5], [6]. Знання основних закономірностей, що використовуються під час обробки металів тиском [7], [8], надає можливість вибирати найбільш оптимальні режими основних технологічних процесів [1], [2], [9], [10], необхідне для процесів як основне, так і допоміжне устаткування, а також технічно грамотно його використовувати під час виробництва [1], [3], [11], [12].

На виробництві широко використовується здатність металів приймати значну пластичну деформацію в гарячому і холодному стані без руйнування [1], [2], [3]. Під час виробничого процесу виготовлення деталей тиском [4], [5], [6], [7], зміна форми виробу виконується в основному за допомогою тиснучого на метал інструменту [8], [9], [10]. Тому отриманий виріб у такий спосіб називають обробкою металів тиском або пластичною обробкою [11], [12].

Обробка металів тиском представляє собою важливий технологічний процес виробництва деталей в машинобудуванні. При цьому забезпечується не тільки задання заготовці необхідних розмірів та форми, але також спільно із іншими основними видами обробки металів тиском значно покращуються як механічні, так і інші основні властивості металів [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [11], [12].

Прокатування, осадження, волочіння, вальцювання, пресування, розкочування, кування, витяжка, штампування представляють собою різні види процесів виготовлення деталей за допомогою обробки металів тиском в пластичному стані [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [11], [12].

Для розуміння особливостей та проблем обробки металів тиском та постановки задач дослідження потрібно більш детально розглянути нові різновиди обробки тиском, які постійно вдосконалюються. Це процеси холодного видавлювання [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [11], [12].

1.2. Процеси холодного видавлювання

Холодна об'ємна штамповка видавлюванням та висадкою являється високопродуктивними способами виготовлення найбільш точних заготовок і напівфабрикатів. Деформаційне зміцнення, яке має місце при холодній пластичній деформації, дозволяє отримувати вироби з покращеними механічними характеристиками, що підвищує їх якість та зменшує затрати на виробництво. Сприятлива макро- і мікроструктура, оптимальний мікрорельєф оброблюваних поверхонь, стабільні та мінімальні відхилення розмірів і форм виробів дозволяють звести до мінімуму, а в деяких випадках і повністю виключити подальшу обробку деталей різанням [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [11], [12].

Незважаючи на очевидні переваги та перспективність процесів обробки металів тиском, зокрема і процесів видавлювання, темпи й об'єми освоєння технологій у промисловості не високі. Це зумовлено в основному тим, що недостатньо вивчено вплив історії навантаження на пластичність, якісні та експлуатаційні характеристики виробів. Тому в наш час малопластичні сплави практично не використовуються для холодного видавлювання [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [11], [12].

Для аналізу та побудови моделей процесів видавлювання використовуються різні методи теорії обробки металів тиском: ліній ковзання [1], сумісного розв'язку наближених рівнянь рівноваги й пластичності [4], [5], верхньої оцінки [6], балансу робіт і потужностей [7], [8], кінцевих елементів [12], [13], [14] і інші.

Важливу роль при розв'язку краєвих задач видавлювання відіграють сили тертя. Знання сил тертя необхідно також для визначення навантажень деформування. Існує багато методів дослідження тертя в процесах обробки тиском. Найбільш відомі методи непрямого визначення констант тертя, дослідження сил тертя безпосередньо в самих процесах деформування, моделювання умов тертя на спеціальних установках [1], [2], [3]. Найбільш достовірні дані отримують при дослідженні тертя безпосередньо в технологічних процесах.

Широкі можливості процесів об'ємної штамповки відкривають нові процеси комбінованої дії: штамповка з крученням, осадка із зсувом [5], [15], [16] деякі схеми штамповки з корисним використанням

сил тертя, схеми деформування в рівноканальній матриці (процес простого зсуву). Більшість процесів комбінованої дії можуть бути представлені як комбінації двохетапного деформування.

Особливістю технології радіального видавлювання є можливість регулювання деформаційних та силових параметрів процесу за допомогою вимірювання кінематики руху формоутворюючого інструменту. На рис. 1.1 приведена класифікація кінематичних варіантів радіального видавлювання, розроблена на основі робіт, виконаних в ЕНІ-КМаші та інших організаціях [15], [16], [17], [18], [19], [20].

Найпростіші кінематичні схеми реалізуються при радіальному видавлюванні з односторонньою подачею металу в робочу порожнину нерухомої матриці. По 1-му варіанту доцільно виготовляти деталі із фланцями, а по 2-му – із стовщеннями різних конфігурацій. Розглянемо особливості формозміни по цих схемам шляхом їх співставлення з варіантом видавлювання з двохстороннім деформуванням заготовки. Поперечне видавлювання з сполученою двохсторонньою подачею металу здійснюється зустрічним рухом пуансонів і примусовим переміщенням матриці із швидкістю v_2 (4-й варіант), меншою приблизно в 2 рази швидкості руху пуансона v_1 . Основна перевага двохстороннього видавлювання полягає в помітному зниженні зусиль деформування та покращення форми виробів. По 5-му варіанту передбачено прискорене по відношенню до пуансона переміщення матриці, яке сприяє зниженню нерівномірності деформації, а по 6-му варіанту матриця на першій стадії процесу нерухома, але уже на другій стадії вона переміщується вниз синхронно з пуансоном із швидкістю v_2 . Таким способом здійснюється видавлювання з послідовною двохсторонньою подачею металу, забезпечуючи краще заповнення поперечної порожнини [20].

Для 1 – 6-го варіантів характерно радіальне видавлювання в порожнину незмінної висоти, в той час як по 7 – 9-му варіантах передбачено зміна висоти приймаючої кругової порожнини. Тим самим забезпечують інтенсивну формозміну в області видавлюваного фланцю (стовщення) із зменшенням осередків накопичення пошкоджень, що доцільно для отримання фланців правильної або складної форми. По 7-му варіанту одночасно з радіальним видавлюванням або з відповідної стадії процесу виконують висадку фланця зустрічним рухом проти пуансона із швидкістю v_2 . Це дозволяє отримати фланці з складним зовнішнім контуром [20].

ВИСНОВКИ

Розробка математичних моделей накопичення пошкоджень при обробці металів тиском є надзвичайно необхідною для розв'язку важливих задач сучасного машинобудування. Із уже розроблених математичних моделей накопичення пошкоджень, тензорні найкраще описують немонотонне деформування. В результаті проведення дослідження отримано такі науково-практичні результати:

1. Здійснено аналітичне дослідження моделі накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах під час холодного двохетапного деформування, досліджено особливості виведення, будови та складу математичної моделі, визначено математично допустимі значення параметрів критеріального співвідношення тензорно-нелінійної моделі, які зображенні у вигляді системи нерівностей.

2. Для проведення розрахунків залишкового ресурсу при двохетапному деформуванні в середовищі математичної системи Maple 9 здійснена комп'ютерна реалізація математичної моделі, тобто розроблена програма для проведення розрахунків ресурсу пластичності, побудовано графічне зображення залежностей між ресурсами, а також використовуючи елементи програмування в Maple 9, було розроблено маплет для полегшення роботи із моделлю в середовищі Maple 9.

3. За допомогою розробленої програми та маплета виконано чисельне дослідження закономірностей накопичення пошкоджень при різних значеннях параметрів моделі, результати якого зображенні у вигляді графіків залежностей між ресурсами пластичності на певних етапах. Під час дослідження визначено екстремальні і небезпечні зони двохетапного деформування та значення параметрів, при яких математична модель набуває комплексних значень.

4. Здійснена перевірка адекватності моделі накопичення пошкоджень в ізотропних матеріалах під час холодного двохетапного деформування при зіставленні з наявними експериментальними даними. Результати розрахунків та експериментальні дані зобразили в координатах $\varepsilon_{*u}(\psi_1)$ та $\psi_{*2}(\psi_1)$, що дозволило краще оцінити адекватність. Дана перевірка вказала на добру якісну і кількісну відповідність розрахункових та експериментальних даних.

5. За результатами досліджень холодного двохетапного деформування стиску-розтягу та розтягу-стиску малопластичних матеріалів

розроблені рекомендації для підвищення деформованості та якості заготовок, отриманих даними видами деформування.

Робота має безперечне прикладне значення, оскільки цілий ряд технологічних процесів можна представити у вигляді набору двух-, трьохетапного деформування зі зміною монотонності. До таких процесів відносяться: методи комбінованого деформування, в т. ч. зі зміною напрямку течії металу і схеми напружено-деформованого стану на наступному етапі деформування заготовок, отриманих пластичним розділом; деформування заготовок сформованих методами ОМТ і т. п.

Основна із цінностей досліджувальної моделі полягає в тому, що за її допомогою можна значно вдосконалити процес пластичної обробки деталей, збільшити якість і точність виготовлення, надійність і довговічність роботи деталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] О. В. Нахайчук, О. О. Розенберг, В. А. Огородніков, А. Д. Крицький, В. В. Мельниченко, та С. Ф. Студенець, *Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008, 158 с.
- [2] В. О. Краєвський, «Удосконалення процесів холодного торцевого розкочування та ротаційної витяжки на основі математичного моделювання механіки формоутворення.» дис. канд. техн. наук, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2005.
- [3] В. М. Михалевич, та В. О. Краєвський, *Математичне моделювання механіки формоутворення при холодному торцевому розкочуванні та ротаційній витяжці [Текст]: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008, 188 с.
- [4] В. А. Огородніков, В. І. Музичук, та О. В. Нахайчук, *Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007, 179 с.
- [5] Р. І. Сивак, та В. А. Огородніков, *Холодне комбіноване видавлювання: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, 180 с.
- [6] В. А. Огородніков, О. Ю. Співак, та О. В. Грушко, *Деформація волочінням і фізико-механічні властивості тонких термопарних дротів: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2014, 112 с.
- [7] В. А. Огородніков, І. Ю. Кириця, та В. Є. Перлов, *Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015, 164 с.
- [8] В. В. Савуляк, І. О. Сивак, та В. І. Савуляк, *Пластичне деформування тонколистового матеріалу в умовах значних локалізацій деформацій та напружень: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008, 150 с.
- [9] Л. К. Поліщук, *Динаміка вмонтованого гідроприводу конвеєрів мобільних машин [Текст]: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2018, 240 с.
- [10] Л. К. Поліщук, та О. О. Адлер, *Вмонтовані гідравлічні приводи конвеєрів з гнучким тяговим органом, чутливі до зміни наван-*

таження [Текст]: монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010, 184 с.

[11] В. М. Михалевич, *Тензорні моделі накопичення пошкоджень*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998, 195 с.

[12] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, *Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2013, 180 с.

[13] Y. Bao, and T. Wierzbicki, «On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space,» *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, № 1, pp. 81-98, 2004.

[14] M. G. Cocroft, and D. J. Latham, «Ductility and the workability of metals,» *Journal of the Institute of metals*, vol. 96, pp. 33-39, 1968.

[15] I. Aliiev, Y. Zhbakov, and S. Martynov, «Forging of shafts, discs and rings from blanks with inhomogeneous temperature field,» *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51 (4), pp. 393-400, 2016.

[16] I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, and I. Zhbakov, «Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion,» *Metallurgical and Mining Industry*, 3 (7), pp. 17-22, 2011.

[17] I. S. Aliiev, R. I. Sivak, O. E. Markov, and V. N. Levchenko, «The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129 (3-4), pp. 1345-1353, 2023.

[18] L. I. Aliieva, O. E. Markov, I. S. Aliiev, N. S. Hrudkina, V. N. Levchenko, and K. V. Malii, «Analysis of Power Parameters of Combined Three-Direction Deformation of Parts with Flange,» *FME Transactions*, 49 (2), pp. 344-355, 2021.

[19] L. I. Aliieva, O. E. Markov, I. S. Aliiev, N. S. Hrudkina, V. N. Levchenko, and K. V. Malii, «Analysis of Power Parameters of Combined Three-Direction Deformation of Parts with Flange,» *FME Transactions*, 49 (2), pp. 344-355, 2021.

[20] L. Allieva, N. Hrudkina, I. Aliiev, I. Zhbakov, and O. Markov, «Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression,» *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1-104), pp. 15-22, 2020.

[21] М. М. Вірник, Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Ю. В. Добранюк, «Формувальна машина,» № 31169 Україна, МПК В 22 С 15/00, Березень 25, 2008.

[22] С. Гожій, та Л. Кривда, «Штапування обкочуванням як засіб ресурсозбереження,» *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, Т. 46, № 2, с. 55-60, 2006.

[23] V. Matvijchuk, A. Shtuts, M. Kolisnyk, I. Kupchuk, and I. Derevenko «Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation,» *Key Engineering Materials. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, № 66 (1), pp. 51-58, 2022.

[24] V. A. Ogorodnikov, and T. F. Arkhipova, «Prediction of the Mechanical Properties of Metals After Cold Pressing,» *Materials Science*, 55 (1), pp. 63-68, 2019.

[25] V. A. Ogorodnikov, N. S. Grechanyuk, and A. V. Gubanov, «Energy Criterion of the Reliability of Structural Elements in Vehicles,» *Materials Science*, 53 (5), pp. 645-65, 2018.

[26] O. Rubanenko, O. Kazmiruk, V. Bandura, V. Matvijchuk, and O. Rubanenko, «Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters,» *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3-88), pp. 66-79, 2017.

[27] A. Shtuts, M. Kolisnyk, A. Vydmysh, O. Voznyak, S. Baraban, and P. Kulakov, «Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research,» *Key Engineering Materials*, Vol. 844. pp. 168-181, 2020.

[28] S. Y. Sheykin, O. V. Grushko, V. V. Melnichenko, S. F. Studenets, I. Y. Rostotskyi, D. V. Iefrosinin et al., «On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products,» *Journal of Superhard Materials*, 43 (3), pp. 222-230, 2021.

[29] A. Shtuts, M. Kolisnyk, and V. Yavdyk, «Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation,» *Motrol*, Vol. 20, №1, pp. 19-25, 2018.

[30] R. Sivak, «Evaluation of metal plasticity and research on the mechanics of pressure treatment processes under complex loading,» *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7-90), pp. 34-41, 2017.

[31] О. В. Грушко, та О. В. Гуцалюк, «Моделювання процесу редукування циліндричних заготовок з визначенням основних параметрів деформованого стану,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*, № 1, с. 57-62, 2016.

[32] О. В. Грушко, В. А. Огородніков, та Ю. О. Слободянюк «Деформовності маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного волочіння,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 103-110, 2019.

[33] О. В. Грушко, та Ю. О. Слободянюк, «Особливості формування показників якості обмідненого зварювального маловуглецевого дроту,» *Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 47, с. 25-28, 2015.

[34] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та Краєвський В. О., «Пристрій для давильних робіт,» № 20031213282, Жовтень 15, 2004.

[35] V. A. Matviychuk, and L. I. Aliyeva, «Development of technological process of flanges upsetting on tubular billets by face rolling,» in *Produkcy a i Zarzadzanie w Hutnictwie. XIV Miedzynarodowa Konferencya Naukowo-Techniczna : Politechnika Czestochowska*, Szczyrk, 28 czerwca. - 1 lipca, 2006, pp. 132-136.

[36] В. О. Краєвський, В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Математична модель згинання смуги змінної товщини та ширини,» у зб.: «Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні». *Тематичний збірник наукових праць*, Краматорськ, Україна: ДДМА, 2008, с. 171-176.

[37] А. А. Штуць, «Комп'ютерне моделювання процесу штампування обкочуванням циліндричних та трубчастих заготовок з використанням програмного комплексу Deform-3d,» *Вібрації в техніці та технологіях*, № 4 (99), с. 101-113, 2020.

[38] А. А. Штуць, та В. А. Матвійчук, «Комп'ютерне моделювання процесу штампування обкочуванням трубчастих заготовок,» *Збірник наукових праць ВНАУ. Технічні науки*, № 1 (95), с. 178-184, 2016.

[39] І. В. Гунько, «Оцінка деформівності матеріалу заготовок при холодному вальцюванні,» *Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія машинобудування*, № 64, с. 196-200, 2012.

[40] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, «Аналіз схем технологічного процесу виготовлення компресорних лопаток із застосуванням операції гарячого вальцювання,» *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 3 (95), с. 160-165, 2016.

[41] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Вісесиметрична осадка циліндричних заготовок,» *Наукові нотатки: міжвузівський збірник за напрямом інженерна механіка*, № 5, с. 241-249, 2009.

[42] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Удосконалення методу розв'язування двовимірної задачі пресування штаби,» *Вісник НТУУ «КПІ»*, № 2, с. 79-88, 2016.

[43] І. В. Севостьянов, Ю. В. Добранюк, та І. А. Бубновська, «Розвиток процесів вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2, с. 150-157, 2017.

[44] О. В. Сердюк, С. І. Сухоруков, В. В. Сердюк, та О. А. Корчинський, «Дослідження процесу обкочування роликком із гвинтовою робочою поверхнею,» *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*, № 5, с. 66-68, 2021.

[45] А. А. Штуць, та М. О. Служалюк, «Дослідження процесів штампування обкочуванням з використанням поверхневого нагріву заготовок,» *Вібрації в техніці та технологіях*, № 2 (97), с. 138-148, 2020.

[46] А. А. Штуць, «Дослідження процесів штампування обкочуванням плоских кільцевих і фланцевих заготовок із листа,» *Технічні науки: Збірник наукових праць. Хмельницького національного університету*, №2 (235), с. 167-171, 2016.

[47] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та В. О. Краєвський, «Розробка маловідходних процесів формування тонкостінних циліндричних деталей,» у зб.: «Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні». Тематичний збірник наукових праць, Краматорськ, Україна: ДДМА, 2004, с. 281-286.

[48] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Удосконалення методу розв'язування двовимірної задачі пресування штаби,» *Вісник НТУУ «КПІ». Серія "Машинобудування"*, № 2 (77), с. 79-88, 2016.

[49] В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Дослідження пластичності металів способами осаджування та вальцювання,» у *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і фахової освіти: Тези доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції*, Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2014, с. 58-59.

[50] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк, та Ю. О. Слободянюк, «Спосіб відбору партій сталеві малоуглецевої катанки для волочіння дроту з прогнозованими механічними характеристиками,» №123757. *G01N 3/08 (2006/01). G01N 3/28 (2006/01)*, Березень 12, 2018.

[51] В. А. Матвійчук, О. О. Рубаненко, та І. А. Бубновська, «Спосіб виготовлення криволінійних заготовок вальцюванням,» *МПК G01N 3/08 (2006/01). № 120472*, Листопад 10, 2017.

[52] В. А. Матвійчук, В. В. Явдик, та А. А. Штуць, «Патент на винахід. Спосіб виготовлення вісесиметричних виробів з днищами і горловинами штампуванням обкочуванням,» № 116672 *Україна. МПК((2006.01). B21D 37/12 (2018.01)*, Квітень 25, 2018.

[53] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Ю. В. Добранюк, та Н. Р. Веселовська, «Вібраційна установка для обробки деталей,» № 40983 *Україна, МПК B 24 B 31/00*, Квітень 27, 2009.

[54] В. А. Матвійчук, А. А. Штуць, та В. В. Явдик, «Розвиток технологічних можливостей процесів штампування обкочуванням,» *Технічні науки: Збірник наукових праць. ВНАУ*, № 1 (89), с. 27-32, 2015.

[55] Ю. В. Добранюк, Л. І. Алієва, та В. М. Михалевич, «Моделювання за допомогою програмного комплексу DEFORM-3D напружено-деформованого стану на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць* : Краматорськ : ДГМА. № 4, с. 3-10, 2010.

[56] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Аналітичне представлення максимального радіуса циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження із бочкоутворенням,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 1, с. 59-66, 2015.

[57] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Аналітичний опис динаміки формозміни циліндричних заготовок під час торцевого стищення,» *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*, № 47, с. 53-56, 2015.

[58] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Частина 1. Апроксимація деформацій,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 97-102, 2010.

[59] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Частина 2. Визначення накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій на основі різних апроксимацій,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 99-102, 2010.

[60] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Моделювання циклічної вісесиметричної осідання циліндричних зразків,» *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 26-31, 2009.

[61] V. M. Mikhalevich, Yu. V. Dobranuk, V. A. Kraevsky, and O. V. Mikhalevich, «Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression,» *Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi, Tomul LIV(LVIII), Fasc. 3-4*, pp. 49-53, 2008.

[62] V. M. Mikhalevich, A. A. Lebedev, and Yu. V. Dobranuk, «Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression,» *Strength of Materials*, 43 (6). pp. 591-603, 2011. DOI: 10.1007/s11223-011-9332-7.

[63] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Удосконалення експериментальної частини експериментально-аналітичної методики дослідження напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричної осадки,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 4, 2011, 8 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/304>. Дата звернення: Березень 01, 2024.

[64] A. A. Lebedev, V. M. Mykhalevych, and Yu. V. Dodranuk, «Model of material plastic deformation in axisymmetric compression of cylindrical specimens,» *Metalurgija*, vol. 49, br. 3, pp. 228, 2010.

[65] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Визначення граничних деформацій бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження за допомогою імітаційного моделювання,» *Вісник Національного технічного університету "ХПІ": збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях*, № 45, с. 104-107, 2011.

[66] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Визначення за початковою ділянкою траєкторії деформацій граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 163-167, 2012.

[67] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Накопичена деформація та інтенсивність логарифмічних деформацій при осадці циліндричних зразків з бочкоутворенням,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*, № 1 (20), с. 129-134, 2009.

[68] В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Прогнозування граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*, № 1 (30), с. 24-30, 2012.

[69] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Аналітичне представлення радіуса торців циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*, № 2 (41), с. 56-62, 2015.

[70] Ю. В. Добранюк, «Аналітичне представлення максимально-го радіуса циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження із бочкоутворенням,» *Науковий пошук молодих дослідників: збірник наукових праць студентів, магістрантів та викладачів*, Житомир, Україна: ЖДУ ім. І. Я. Франка, Вип. 10, с. 12-17, 2017.

[71] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Моделювання граничних деформацій на вільній бічній поверхні під час високотемпературного торцевого осадження,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2, с. 54-60, 2015.

[72] Ю. В. Добранюк, та І. А. Кохан, «Побудова узагальненої математичної моделі деформованого стану циліндричного зразка під

час торцевого стиснення на основі математичного аналізу,» у *Математика та інформатика у вищій школі: виклики сучасності: зб. наук. праць за матеріалами Всеукр. наук.-практ. конф., 15-16 травня 2019 р.*, Вінниця, Україна: ВДПУ ім. Михайла Коцюбинського, 2019, с. 45-50.

[73] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Моделювання граничних деформацій на вільній поверхні при осесиметричній осідання,» у *Прогресивні методи та технологічне оснащення процесів обробки металів тиском: мат. міжнарод. наук.-техн. конф.*, 2009, с. 108-112.

[74] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «НДС бічної поверхні циліндричної заготовки при вісесиметричному осадженні,» у *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і фахової освіти: V Міжнародної науково-технічної конференції*, Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2014, с. 17-18.

[75] Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Моделювання за допомогою програмного комплексу Deform-3D напружено-деформованого стану циліндричних зразків під час торцевого стиснення,» у *Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз: Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції "ВНТУ-2011"*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, с. 222-224.

[76] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Залежність максимального діаметру заготовки від ступеня деформування під час вісесиметричного осадження,» у *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: Тези доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції*, Одеса, Україна: НТУУ «КПІ», 2015, с. 83-84.

[77] Ю. В. Добранюк, та Я. Д. Лебідь, «Побудова математичної моделі максимального діаметру циліндричного зразка під час торцевого стиснення на основі математичного аналізу,» у *Матеріалах XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2018, 5 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2018/paper/view/4918>. Дата звернення: Березень 01, 2024.

[78] Ю. В. Добранюк, та А. Р. Козуб, «Порівняльний аналіз накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій бічної поверхні циліндричних зразків під час торцевого стиснення із використанням СКМ Maple,» у *Матеріали XLIX науково-технічної*

конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2020, 5 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2020/paper/view/9464>. Дата звернення: Березень 01, 2024. р.

[79] A. V. Titov, V. M. Mykhalevych, P. Popiel, and K. Musabekov, «Statement and solution of new problems of deformability theory,» *Proc. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 108085E, October, 2018.

[80] A. A. Lebedev, and V. M. Mikhalevich, «On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics,» *Strength of Materials*, № 35, pp. 217-224, May-June, 2003.

[81] A. A. Lebedev, and V. M. Mikhalevich, «Criterial relationships for residual life assessment of materials,» *Strength of Materials*, 38 (4), pp. 348-353, 2006.

[82] V. Matviychuk, V. Mikhalevich, and A. Shtuts, «Analysis of stress-strain state (sss) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping,» *Вібрації в техніці та технологіях*, № 1 (108), с. 63-72, 2023.

[83] V. M. Mikhalevich, «Plasticity at cyclic hot straining,» *Problemy Prochnosti*, (6), pp. 10-17, 1994.

[84] О. В. Грушко, та І. Ю. Кириця, «Критерії деформівності з врахуванням властивостей матеріалу в параметрі напруженого,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*, № 1. с. 30-37, 2022.

[85] V. M. Mikhalevich, and I. V. Abramchuk «Maximum Accumulated Strain for Linear Two-Link Triangle-Like Deformation Trajectories,» *International Applied Mechanics*, 57 (6). pp. 720-736, 2021.

[86] О. В. Грушко, та Ю. О. Слободянюк, «Механічні характеристики сталей G3Si1 та СВ-08Г2,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 103-109, 2018.

[87] О. В. Грушко, Ю. О. Слободянюк, та Р. С. Ткаченко, «Криві течії катанки марок G3Si1 та СВ-08Г2С,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*, № 1, с. 207-213, 2016.

[88] V. Mykhalevych, Yu. Dobraniuk, V. Matviichuk, V. Kraievskiy, O. Tiutiunyk, S. Smailova et al., «A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture,» *Informatyka, Automatyka, Pomiaru W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, № 13, pp. 64-70, 2023. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3496>

[89] В. А. Матвійчук, М. А. Колісник, та А. А. Штуць, «Побудова кривих граничних деформацій матеріалів,» *Вібрації в техніці та технологіях*, № 2 (105), с. 84-90, 2022.

[90] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та О. В. Михалевич, «Необхідні та достатні умови опуклості функції пошкоджень під час нестационарних процесів,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 113-117, 2010.

[91] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та В. О. Краєвський, «Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2, с. 56-64, 2018.

[92] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Моделювання граничних пластичних деформацій при нестационарних процесах та задачі оптимізації,» *Вісник Національного технічного університету "ХПІ": збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях*, № 31, с. 64-70, 2009.

[93] В. А. Огородніков, О. В. Грушко, та О. В. Гуцалюк, «Історія деформування, що визначає застосування феноменологічних критеріїв руйнування у процесах обробки тиском,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 1, с. 67-77, 2015.

[94] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Аналітичне дослідження моделі залишкового ресурсу при діагностиці матеріалу,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 1, 2008, 6 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/46>. Дата звернення: Березень 01, 2024.

[95] В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, Ю. В. Добранюк, та Є. А. Трач, «Моделі підсумовування розсіяних пошкоджень в процесах пластичного деформування,» *Вісник Національного технічного університету "ХПІ": збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 43 (1086), с. 98-103, 2014.

[96] В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, та Ю. В. Добранюк, «Постановка та розв'язання оптимізаційних задач при визначенні граничного стану циліндричної заготовки під час нестационарного деформування,» у *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і фахової освіти: Тези доповідей VI Міжнародної нау-*

ково-технічної конференції, Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2015, с. 25-31.

[97] V. Matviichuk, I. Bubnovska, V. Mykhalevych, M. Kovalchuk, W. Wójcik, A. Tuleshov et al., «Tensor models of accumulation of damage in material billets during roll forging process in several stages,» *Mechatronics, Vol. II, London: Taylor Francis Group, CRC Press, Balkema book*, pp. 111-120, 2021.

[98] В. М. Михалевич, «Історія та сучасний стан тензорної теорії накопичення пошкоджень,» *Надійність і довговічність машин і споруд: Міжнар. наук.-техн. зб., Київ: ІПМіцн. ім. Г. С. Писаренка НАНУ*, Вип. 37, с. 132-140, 2013.

[99] С. О. Пискунов, О. І. Гуляр, та С. В. Мицюк, «Огляд співвідношень континуальної механіки руйнування для опису процесів повзучості і втоми,» *Опір матеріалів і теорія споруд*, № 91, с. 29-38, 2013.

[100] С. О. Пискунов, та Р. М. Остапенко, «Моделювання повзучості та розвитку зони континуального руйнування ротора парової турбіни за наявності початкової неоднорідності матеріалу,» *Моделювання процесів в металургії та машинобудуванні*, № 2, с. 140-149, 2009.

[101] С. О. Пискунов, Т. А. Бахтатаршоев, та К. І. Самофал, «Про використання критеріїв міцності анізотропних матеріалів,» *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн.*, Вип. 110, с. 496-506, 2023.

[102] V. A. Ogorodnikov, I. A. Dereven'ko, and R. I. Sivak, «On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading,» *Materials Science*, 54 (3), pp. 326-332, 2018.

[103] V. A. Ogorodnikov, T. Zyska, and S. Sundetov, «The physical model of motor vehicle destruction under shock loading for analysis of road traffic accident,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 10808, 2018.

[104] І. А. Бубновська, «Аналіз напруженого стану заготовок при вальцюванні,» *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 2. с. 80-85, 2019.

[105] І. А. Бубновська, «Дослідження напружено-деформованого стану заготовок при вальцюванні,» *The scientific heritage*, Budapest, № 47. с. 31-37, 2020.

[106] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, «Оцінка деформованості матеріалу криволінійних заготовок при холодному вальцюванні,» *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 4, с. 92-96, 2017.

[107] В. А. Матвійчук, М. А. Колісник, та А. А. Штуць, «Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням,» *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 3 (102), с. 77-84, 2018.

[108] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та М. А. Колісник, «Оцінка деформівності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням,» *Вібрації в техніці та технологіях*: Вінниця, № 1, с. 81-91, 2022.

[109] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та А. А. Штуць, «Аналіз напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при висаджуванні ресурсощадним методом штампування,» *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 1 (120), с. 76-85, 2023.

[110] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Напружений стан товстостінної труби під рівномірним тиском,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 1, с. 67-72, 2016.

[111] В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, «Оцінка деформівності матеріалу заготовок при вальцюванні,» *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 2, с. 56-64, 2021.

[112] В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, та М. А. Колісник, «Оцінка деформівності матеріалу при висаджуванні елементів заготовок методом штампування обкочуванням,» *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, Т. 2, № 117, с. 104-114, 2022.

[113] В. А. Огородніков, О. В. Грушко, та О. В. Гуцалюк, «Вибір критеріїв деформованості при оцінці використаного ресурсу пластичності у процесах обробки металів тиском,» *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія Інноваційні технології та устаткування обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 43, с. 127-136, 2014.

[114] І. В. Гунько, та Ю. В. Добранюк, «Оцінка напружено-деформованого стану заготовок при холодному вальцюванні,» *Міжнародний науковий журнал «Acta universitatis Pontica Euxinus»*. Спеціальний випуск, Т. 3, Варна, с. 459-462, 2013.

[115] V. O. Kraievskiy, V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk, D. Sawicki, and K. Mussabekov, «Selection of optimal path of strain rate

change in the process of multistage hot deformation under the condition of the equal duration of stages,» *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 108084T (1 October 2018), 8 p., 2018.

[116] V. Matviychuk, and A. Shtuts, «Construction of curve boundary deformations of metals,» In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*, Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2022, pp. 90-113.

[117] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та І. А. Бубновська, «Оцінка деформованості матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів,» у *Міжнародній науково-методичній Інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності»*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2018, с. 246-249. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/pmovc/pmovc/paper/viewFile/5663/4808>. Дата звернення: Березень 01, 2024.

[118] Yu. Dobranyuk, and A. Kozub, «Comparative analysis of the stress-strain state of the free surface of cylindrical samples during rolling using SCM Maple,» in *III International Scientific and Practical Internet Conference "Mathematics and Informatics in Higher Education: Challenges of Modernity", dedicated to the memory of Professors O. A. Pankov and V. S. Trokhymenko*, Vinnytsia, 2021, pp. 67-74.

[119] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та І. А. Бубновська «Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин,» *МПК G01N 3/08 (2006/01). № 109984*, Вересень 26, 2016.

[120] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, «Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою круговал,» *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*, № 1, с. 35-39, 2015.

[121] A. Kolomiets, O. Tiutiunyk, O. Stakhova, and O. Fonariuk, Yu. Dobraniuk, N. Hensitska-Antoniuk, «Professional orientation of fundamentalization of mathematical training of future technical specialists,» *AD ALTA : Journal of Interdisciplinary Research open journal*, 11/02-XXII, pp. 39-46, 2021.

[122] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та О. В. Михалевич, «Побудова ефективних обчислювальних схем у Maple під час

розв'язання задачі визначення граничних деформацій за умов складного деформування,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 2, 7 с, 2009. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/138/137>. Дата звернення: Березень 01, 2024.

[123] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та Я. В. Крупський, «Фрагменти електронних освітніх ресурсів з функції двох змінних в середовищі СКМ Maple,» у *Математика у технічному університеті XXI сторіччя: зб. наук. праць за матеріалами дистанційної всеукраїнської наукової конференції, 15-16 травня 2017 р.*, Краматорськ, Україна: ДДМА, 2017, с. 20-22.

[124] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Апроксимація залежностей між компонентами деформацій на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення,» *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38309*, Травень 11, 2011.

[125] В. М. Михалевич, та Ю. В. Добранюк, «Розрахунок граничного стану та побудова кривих граничних деформацій бічної поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення,» *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38308*, Травень 11, 2011.

[126] Ю. В. Добранюк, В. М. Михалевич, А. А. Коломієць, та О. М. Козак, «Застосування СКМ Maple для побудови 3D графіків в задачах обчислення об'єму фігур,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с. 115-123, 2022.

Наукове електронне видання

**Михалевич Володимир Маркусович
Добранюк Юрій Володимирович
Тютюнник Оксана Іванівна**

**МОДЕЛІ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ
В ІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛАХ ПРИ ХОЛОДНОМУ
ДВОХЕТАПНОМУ ДЕФОРМУВАННІ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Оригінал-макет підготовлено *Ю. Добранюком*

Оригінал-макет виготовлено у РВВ

Підписано до видання 20.05.2024
Гарнітура Times New Roman.
Зам № P2024-109.

Вінницький національний технічний університет,
редакційно видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: irvc.vntu@gmail.com.

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