

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**БУБНОВСЬКА ІРИНА АНАТОЛІЇВНА**

УДК 621.7.016.2

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВАЛЬЦЮВАННЯ НА  
ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОЗМІНЕННЯ  
ЗАГОТОВОК**

05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Гулько Ірина Василівна,**  
Вінницький національний аграрний університет,  
проректор з науково-педагогічної та навчальної роботи.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Грушко Олександр Володимирович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
в. о. завідувача кафедри опору матеріалів та прикладної механіки;

кандидат технічних наук, доцент  
**Тітов Андрій Вячеславович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки.

Захист відбудеться «23» березня 2021 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.03 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210, ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «19» лютого 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. І. Сухоруков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Ефективність виробництва є нагальною вимогою сучасного машинобудування, в якому удосконалення процесів виготовлення заготовок здійснюється ще на стадії первинного формоутворення деталей. Максимальна економія матеріальних, трудових та фінансових ресурсів може відбуватися за рахунок мінімальних розбіжностей між геометричними параметрами заготовок та розмірами готових деталей за умови забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей.

У номенклатурі штампованих заготовок значний обсяг займають деталі складних видів профілів. Як підготовчу операцію перед об'ємним штампуванням таких деталей з метою рівномірного перерозподілу металу початкової заготовки, усунення надмірної нерівномірності деформації, досягнення високих ступенів деформації, виготовлення якісних виробів без дефектів з високим коефіцієнтом використання металу, застосовують вальцювання. Для процесу вальцювання характерним є локальне нестационарне деформування, що дозволяє отримувати складно профільні заготовки при значних ступенях деформації. Для низки пластичних металів цей процес доцільно здійснювати в умовах холодного деформування.

Останнім часом вивченню питань розвитку процесів холодного пластичного деформування металів на основі оцінки їх деформовності присвячено низку робіт. В основному, це роботи з калібрувального холодного вальцювання важкодеформованих титанових та хромонікелевих сплавів. В машинобудуванні, особливо в авіаційному, виробляється значна кількість складно профільних деталей із алюмінієвих сплавів. Разом з тим, широке застосування холодного вальцювання алюмінієвих сплавів, особливо при виробництві криволінійних деталей, обмежується недостатнім розвитком розрахункового апарату оцінки деформовності матеріалу заготовок, величини використаного ресурсу пластичності для запобігання їх руйнуванню, а також недосконалістю існуючих способів виготовлення заготовок значної кривизни. Тому розроблення нових схем і режимів вальцювання на основі аналізу формозмінення заготовок є актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає «Стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету міністрів України від 27. 12. 2008 р., за № 1656-р. Робота виконана в рамках науково-дослідних робіт 2010-2018 р. р. на інженерно-технологічному факультеті Вінницького національного аграрного університету (№ 0112U006703, №0117U006830).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності процесів вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів за рахунок їх удосконалення шляхом розроблення нових схем і режимів вальцювання на основі аналізу формозмінення заготовок, напружено-деформованого стану матеріалу та оцінки його деформовності.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати стан розвитку технології вальцювання, можливість використання як гарячого так і холодного вальцювання для виробництва деталей на підставі класифікації за міцністю, пластичністю, фізичними властивостями алюмінієвих сплавів. Розробити метод експериментального дослідження пластичності металів для забезпечення сталих значень показників напруженого стану;
- провести аналіз існуючих та встановити нові закономірності процесу формоутворення заготовок вальцюванням для керування течією матеріалу і отримання заготовок заданої форми;
- дослідити процеси теплообміну, тепломасоперенесення і деформованого стану нагрітих заготовок при вальцюванні в умовах контактної взаємодії з валками;
- дослідити моделі контактної взаємодії інструменту з заготовкою та формоутворення заготовок залежно від параметрів процесу вальцювання;
- розробити методику оцінки деформовності матеріалу заготовок при холодному вальцюванні з урахуванням особливостей зміни напружено-деформованого стану при різних схемах формоутворення;
- узагальнити результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів вальцювання для практичного застосування і впровадити у практику промислового виробництва.

**Об'єкт дослідження.** Процеси вальцювання заготовок.

**Предмет дослідження.** Закономірності пластичної течії, напружено-деформованого стану і деформовності металу при формозмінні заготовок з алюмінієвих сплавів в процесі вальцювання.

**Методи дослідження.** Для дослідження процесів вальцювання використано методи: теоретичні (застосування математичного аналізу) – для розроблення математичних моделей; експериментально-розрахункові (ділільних сіток, мікроструктурний) і чисельний (метод скінчених елементів) – для аналізу механіки формоутворення заготовок, напружено-деформованого стану матеріалу, теплових та термомеханічних полів. В основу дослідження деформовності металів покладено феноменологічну теорію деформовності. Експериментальні дослідження проводились у лабораторних і промислових умовах на натурних зразках та моделях із застосуванням сучасних приладів. Обробка експериментальних даних здійснювалась методами математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше встановлені закономірності впливу активних сил тертя, викликаних зміною діаметра валка в осьовому напрямі та його поворотом, на кінематику формозмінення, напружено-деформований стан і деформовність заготовок в процесі холодного вальцювання, що дозволило керувати течією матеріалу і отримувати криволінійні заготовки під штампування;
- вперше на основі розробленої моделі контактної взаємодії інструменту з заготовкою побудована залежність між відносним стисненням заготовки та накопиченою деформацією на її вільній бічній поверхні, що дало можливість контролювати граничну до руйнування товщину заготовки;

- отримав подальшого розвитку метод визначення пластичності металів, який, на відміну від існуючих, забезпечує можливість випробовування циліндричних зразків при сталому напруженому стані та отримання двох значень показника пластичності на різних бічних поверхнях заготовки за одне випробування шляхом вальцювання заготовок на клин;

- отримала подальший розвиток модель накопичення пошкоджень матеріалу заготовки, яка, на відміну від існуючої, надає можливість визначати величину використаного ресурсу пластичності за однопрохідного холодного та немонотонного двохетапного вальцювання зі складним деформуванням на другому етапі;

- розвинуто теорію теплових процесів за рахунок використання математичної моделі процесів теплообміну, тепломасоперенесення і термічних деформацій при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів, за допомогою якої оцінено внесок температурної складової в коефіцієнти розширення та випередження, вплив оксидної плівки на тепловий стан в осередку деформації та встановлено рекомендований температурний інтервал нагріву валків.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено спосіб вальцювання циліндричної заготовки на клин за допомогою валків із зростаючим радіусом, що забезпечує можливість випробовування циліндричних зразків при сталому напруженому стані та дозволяє отримувати значення пластичності алюмінієвих сплавів в умовах одновісного розтягу.

2. Отримана залежність між відносним стисненням та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні циліндричної заготовки, що дозволяє наперед визначати граничну до руйнування товщину заготовки і скоротити терміни підготовки виробництва та забезпечити належну якість виробів через обмеження величини використаного ресурсу пластичності.

3. Розроблено спосіб виготовлення криволінійних заготовок двохетапним вальцюванням, який полягає у вальцюванні конічними валками з наступним кантуванням на 90 градусів, що дозволяє отримувати заготовки значної кривизни. Новизну технічних рішень захищено патентами України.

4. Результати роботи впроваджено на підприємстві ДП «45 експериментальний механічний завод» (м. Вінниця) та в навчальний процес Вінницького національного аграрного університету.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи здобувачем отримано особисто. Постановку задач, розроблення методичних підходів до виконання досліджень, аналіз і трактування отриманих результатів виконано спільно з науковим керівником. У технічних рішеннях частка всіх співавторів однакова. Внесок здобувачки в роботах, опублікованих разом зі співавторами, наявний в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

#### **Апробація матеріалів дисертації.**

Основні результати роботи доповідались на конференціях та наукових семінарах: XI Міжнародній науково-технічній конференції (МНТК) «Прогресивна техніка і технологія» (м. Київ, 2010 р.); МНТК «Теоретичні і

прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (м. Вінниця, 2011 р.); XIV, XVIII МНТК «Досягнення та проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2011, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Формування конкурентоспроможної економіки: теоретичні, методичні та практичні засади» (м. Тернопіль, 2012 р.); VII, VIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. Херсон 2016, 2017 р.); Міжуніверситетському науково-практичному семінарі «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском» (м. Вінниця, 2017 р.); Міжнародній науково-методичній інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (м. Вінниця, 2018 р.); Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Від науки до практики» (м. Вінниця, 2019, 2020 р.); розширеного наукового семінару у ВНТУ 2020 р.

**Публікації.** За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі: 9 статей у спеціалізованих фахових виданнях України; 2 статті в іноземних виданнях, 2 в збірниках, виданих за матеріалами науково-технічної конференції, 3 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях, отримано 3 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, 5 додатків. Повний обсяг дисертації становить 242 сторінки, з них 160 основної частини, 93 рисунка і 22 таблиці. Список використаних джерел містить 102 найменування.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, предмет і методи досліджень, а також подано наукову новизну та практичне значення результатів, отриманих при виконанні роботи, інформацію з апробації, структури та обсягу роботи.

**У першому розділі** проаналізовано схеми технологічного процесу виготовлення суцільних довгомірних виробів в залежності від конструктивних особливостей, призначення, геометричних і технологічних параметрів, способів формоутворення та технологічних процесів вальцювання заготовок.

При розробленні та вдосконаленні процесів вальцювання особливо важливою є інформація про напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок і вплив на нього різних технологічних параметрів. На підставі такої інформації можна визначати силові параметри процесу, проводити оцінку деформованості матеріалу заготовок і стійкості інструментального оснащення, цілеспрямовано розширювати технологічні можливості процесу, що розробляється, прогнозувати службові характеристики виробів. Найбільш об'єктивними є результати дослідження НДС матеріалу заготовок, отримані із застосуванням різних відомих методів досліджень. У розроблення яких та їх розвиток вагомий внесок зробили вітчизняні і зарубіжні учені І. С. Алієв, М. Я. Бровман, К. О. Гогаєв, С. І. Губкін, Г. Д. Дель, С. М. Жучков, Г. М. Закс,

Т. Карман, О. П. Максименко, В. А. Матвійчук, В. С. Медведєв, О. О. Низков, В. А. Огородніков, І. П. Ренне, М. В. Сторожев.

Процес вальцювання в своїй основі є процесом поздовжньої прокатки, теоретичні аспекти якого достатньою мірою розроблені. Проте процес вальцювання не є стаціонарним, що не дозволяє для його математичного моделювання застосувати відомі аналітичні залежності, характерні для прокатки. Геометрична складність і нестаціонарність пластичного деформування при холодному вальцюванні зміцнюваного матеріалу дозволяє використовувати класичне застосування теорії прокатки лише як методологічну основу при дослідженні процесу. Процес вальцювання дозволяє виготовляти не характерні для прокатки заготовки (криволінійні, різної товщини по перетину), що вимагає додаткових досліджень.

При оцінці напруженого стану та деформовності матеріалів особливо важливим є визначення показників напруженого стану. Вибором і обґрунтуванням інваріантів напруженого стану при вирішенні завдань пластичного деформування займались О. В. Грушко, С. І. Губкін, В. Л. Колмогоров, В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, В. А. Огородніков, І. О. Сивак, Г. О. Смірнов-Аляєв. Використання існуючих технологічних способів випробування металів призводить до розбіжностей в значеннях пластичності. Тому актуальним постає розроблення нового методу випробувань, який дозволив би забезпечити постійність напруженого стану протягом всього процесу деформування.

Оскільки існує тенденція заміни сталі легкими сплавами в машинобудуванні, транспорті, приладобудуванні, то було розглянуто процес деформування заготовок із алюмінієвих сплавів, властивості якого є недостатньо вивченими.

В результаті аналізу літературного огляду зроблені висновки та сформовано завдання дисертаційного дослідження.

**У другому розділі** розглянуті механічні характеристики алюмінієвих сплавів, що підлягають деформуванню, для обґрунтованого вибору процесу холодного або гарячого вальцювання при виробництві необхідних деталей.

Розглянуто ефект зміцнення алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні та методи побудови кривих зміцнення, а також приведені криві зміцнення алюмінієвих сплавів АМц, АД1, АДЗ1 при холодному деформуванні і криві деформаційного зміцнення алюмінієвих сплавів АК6, АК8, АМг3 при гарячому деформуванні.

Особливості структури алюмінієвих сплавів залежать від технології виробництва напівфабрикатів, яка обумовлює: тривалість нагріву і температуру деформації; схему, ступінь, швидкість і тривалість деформації. Тому деформовані напівфабрикати (листи, профілі, штамповки та ін.), отримані з одного сплаву, після однакової кінцевої термічної обробки можуть суттєво відрізнятися за механічними та іншими параметрами.

Для алюмінієвих сплавів досліджено: базисний тиск при вальцюванні заготовок; залежності опору деформації в осередку деформації від температури нагріву вальцювального обладнання. Встановлено, що при температурі валків нижче 200 °С опір деформації заготовки в місці контакту з валком більше, ніж в

її центральній частині. Під впливом нагрівання валків  $t_{\text{вал}} \geq 200^\circ\text{C}$ , опір деформації металу в місці контакту з інструментом для поперечного перерізу середини геометричного осередку деформації значно знижується і стає меншим, ніж в середині заготовки і позаконтактних зонах (рис.1,2).

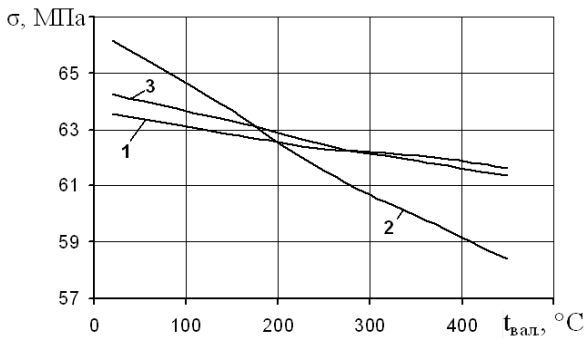


Рисунок 1 – Залежність опору деформації від температури нагріву валків в: середині заготовки (1); місці контакту заготовки з валками (2); у позаконтактних зонах (3)

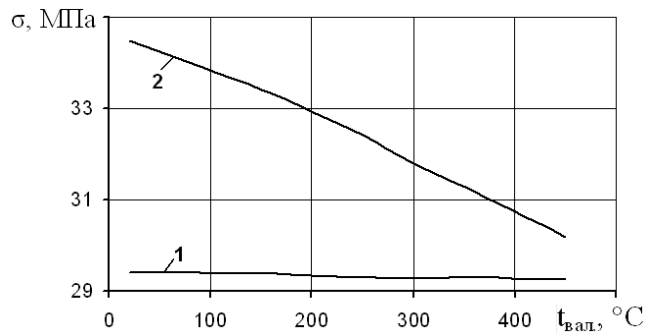


Рисунок 2 – Залежність опору деформації від температури нагріву валків: на вході (1); на виході з осередку деформації (2)

Цим пояснюється зменшення зусиль, що витрачаються на деформування, а також те, що метал краще тече в поздовжньому напрямі, чим в поперечному, де вищий опір деформації в позаконтактних зонах.

З аналізу рис. 1, 2, видно, що опір деформації заготовки після виходу з осередку деформації нижче у заготовок, що виготовляються при нагрітих валках.

При холодному вальцюванні важливим фактором, що обмежує технологічні можливості процесу, є недостатня пластичність матеріалу заготовки. Проблеми дослідження пластичності металів обумовлюються тим, що наразі не розроблений комплекс способів побудови «єдиної» кривої граничних деформацій. Складнощі полягають у тому, що при традиційних способах дослідження зразків на розтяг у переважній більшості випадків неможливо забезпечити сталість їх напруженого стану протягом всього процесу деформування внаслідок появи шийки на певній стадії розтягу. Така втрата стійкості порушує сталість значень показників напруженого стану та призводить до «аномального» підвищення пластичності металів, у порівнянні з більш жорсткими схемами напруженого стану.

Нами розроблено спосіб, згідно з яким деформування вільної бічної поверхні циліндричного зразка при його вальцюванні відбувається в умовах одновісного розтягу, що унеможливує появу шийки, а збільшення ступеня деформації та доведення матеріалу до руйнування забезпечується валками із зростаючим радіусом.

На рис. 3 показано вальцювання циліндричного зразка 1, закріпленого в утримувачі 3 на клин валками із зростаючим радіусом 2. Пластичність визначається за величиною деформації в момент появи тріщин на вільній поверхні зразка.

У випадку необхідності отримання за одне випробування двох значень пластичності металу на різних бічних поверхнях заготовки, для кожної з яких



свій постійний в процесі деформування показник напруженого стану  $\eta$ , здійснюють вальцювання на клин криволінійного зразка. Для цього вальцювання проводять конічними валками складної геометрії, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. При цьому менше деформована внутрішня бічна поверхня зразка матиме менше значення показника  $\eta$ , а більше деформована зовнішня поверхня зразка – більше значення показника  $\eta$ , що видно з рис. 4, на якому зображені шляхи деформування точок в координатах: «інтенсивність деформацій  $e_u$  – показник напруженого стану  $\eta$ », де  $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$ , а  $I_1(T_\sigma)$  і  $I_2(D_\sigma)$  – відповідно перший інваріант тензора та другий інваріант девіатора напружень.

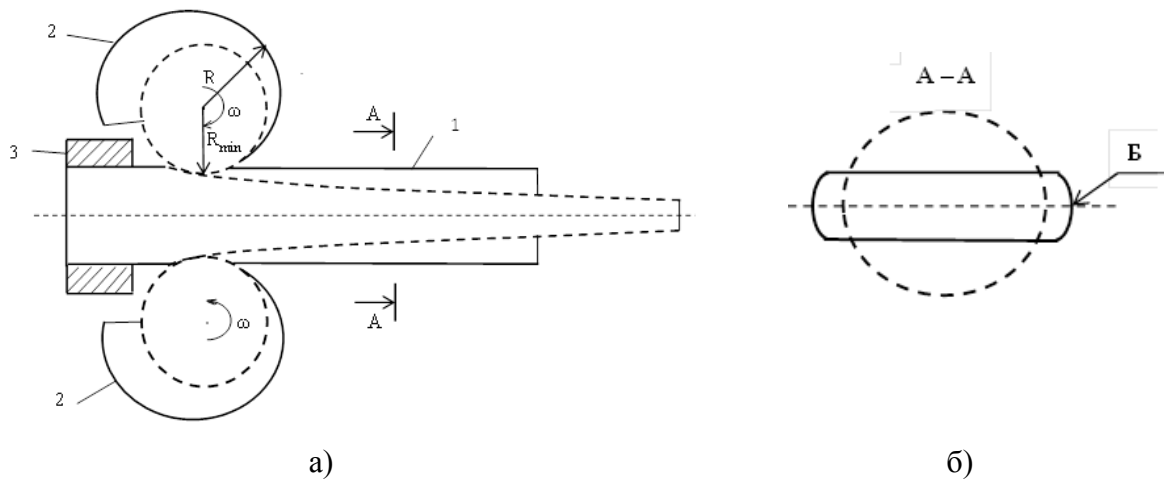


Рисунок 3 – Схематичне зображення процесу вальцювання на клин а); переріз деформованої заготовки б); Б – поверхня контролю за деформаціями і руйнуванням

Побудовані за приведеною методикою, включаючи визначення пластичності вальцюванням, діаграми пластичності низки алюмінієвих сплавів (3) та шляхи деформування точок заготовки на зовнішній (1) і на внутрішній (2) поверхнях циліндричного зразка наведено на рис. 5.

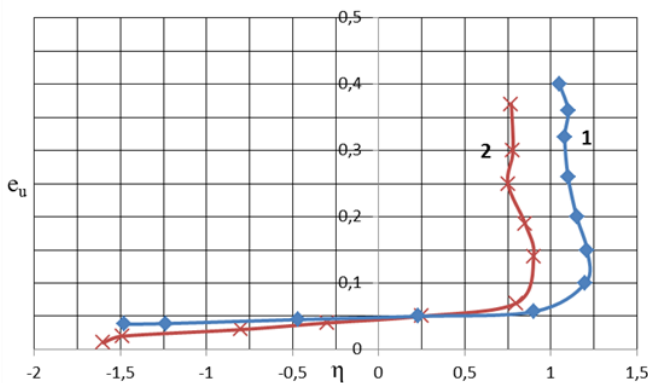


Рисунок 4 – Шляхи деформування точок зовнішньої (1) та внутрішньої (2) вільних бічних поверхонь заготовки

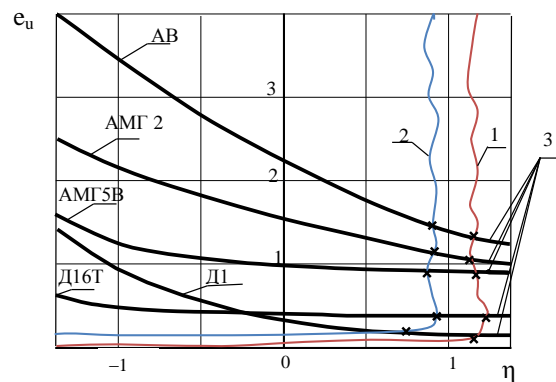


Рисунок 5 – Діаграми пластичності (3) для різних алюмінієвих сплавів та шляхи деформування точок заготовки на поверхнях (1), (2)

Оскільки при оцінці деформованості матеріалу заготовок проблемними є протиріччя значень пластичності, що отримані при різних видах випробовувань,

то запропоноване нами визначення пластичності металу в умовах одновісного розтягу, без втрати стійкості деформування, є певним вирішенням відзначених протиріч.

**У третьому розділі** надано результати дослідження впливу технологічних факторів і параметрів термосилового навантаження в процесах вальцювання на характер розподілу полів температур і термічних деформацій в пластичній зоні заготовки. За об'єкт дослідження вибрано вальцювання заготовок із алюмінієвого сплаву АК6 діаметрами 25 мм, 35 мм, 50 мм, 65 мм за схемами «круг-овал», «овал-ромб», «ромб-квадрат», «овал-квадрат». Обчислювальний експеримент з визначення нестационарних теплових процесів і термічних деформацій при формозміні об'ємів заготовок різних типорозмірів, нагрітих до температур 450°C в процесі вальцювання, проведений із застосуванням розробленого автоматизованого алгоритму розрахунку термомеханічного стану осередку деформації.

На основі обчислювального експерименту визначені закономірності розподілу температур та полів поздовжніх та поперечних термічних деформацій осередку деформації при вальцюванні заготовок для різних технологічних режимів.

Було розроблено низку імітаційних моделей нестационарних нелінійних процесів різної фізичної природи для зони деформованої вальцьованої заготовки в умовах контактної взаємодії з інструментом. Розрахунково-теоретичними дослідженнями встановлено, що нерівномірна течія металу при формозміні вальцюванням супроводжується нерівномірним розподілом температури у напрямі осі заготовки і ортогональної площини, який викликаний геометричним співвідношенням форми калібру і заготовки, площею контакту між заготовкою та інструментом, ступенем обтискання, опором деформацій, тертям, температурою заготовки і поверхні інструменту.

В зв'язку з тим, що при гарячому вальцюванні на поверхні заготовки із алюмінієвого сплаву АК-6 утворюється плівка оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ), була зроблена оцінка коефіцієнта теплопровідності. Були розраховані початкові термічні умови для 10 заготовок із алюмінієвих сплавів, нагрітих до 450°C з різним діапазоном температур валків, на основі яких досліджено термомеханічний стан. Результати засвідчили про більш рівномірний розподіл теплового стану в осередку деформації заготовки внаслідок впливу ізолюючих властивостей плівки оксиду алюмінію.

При дослідженні термомеханічного стану для знаходження термічної складової коефіцієнтів деформації проведено розрахунок середніх величин компонент вектора термічної деформації для осередку деформації різних типорозмірів заготовок системи «круг-овал» в декартових координатах.

Значення коефіцієнтів розширення і випередження при об'ємній високотемпературній пластичній деформації заготовок обчислювалися за формулами:

$$K_p = \sqrt{0,0582i^2 - 0,02123i + 0,2015} + 0,2265i - 0,049, \quad (1)$$

$$K_e = \sqrt{270,569i^2 - 516,265i + 248,728} - 16,455i + 15,714, \quad (2)$$

де  $i = \frac{R_k}{R_3}$ ,  $R_k$  – радіус овального калібру,  $R_3$  – радіус заготовки, мм.

Для кожного типорозміру заготовок здійснювали розрахунок термічної складової коефіцієнтів розширення і випередження при об'ємній високотемпературній пластичній деформації. В результаті методами статистичної обробки даних встановили, що її величини складають при вальцюванні за схемою «круг-овал»:  $K_p^T = 0,42K_p$ ,  $K_e^T = 0,45K_e$ ; «овал-ромб»:  $K_p^T = 0,394K_p$ ,  $K_e^T = 0,399K_e$ ; «ромб-квадрат»:  $K_p^T = 0,380K_p$ ,  $K_e^T = 0,382K_e$ ; «овал-квадрат»:  $K_p^T = 0,393K_p$ ,  $K_e^T = 0,393K_e$ .

У четвертому розділі надано результати проведеного в дисертаційній роботі аналізу НДС матеріалу заготовок при вальцюванні.

Теоретичний аналіз напруженого стану матеріалу проведено шляхом сумісного розв'язання рівнянь рівноваги, умови пластичності в зонах плоскої деформації та рівнянь зв'язку компонент тензора напружень і тензора швидкості деформацій при вальцюванні заготовок. Для аналізу використано циліндричну систему координат  $(r, \alpha, y)$ .

За результатами аналізу отримано вирази для визначення середнього гідростатичного напруження і компонент тензора напружень. На їх основі отримано вираз для показника напруженого стану у кожній точці в зоні пластичної деформації вальцьованої заготовки:

$$\eta = \frac{3\sigma_0}{\sigma_u} = \sqrt{3} \left( C \cdot r^n - 2C_1 \pm \frac{1}{\alpha_1 n} \right), \quad (3)$$

де  $C, C_1$  – сталі інтегрування, які визначаються з граничних умов на вході і виході із зони пластичної деформації відповідно.

На поверхні контакту валка з заготовкою, деформований стан матеріалу заготовки може бути визначений експериментально і показник напруженого стану описується залежністю:

$$\eta = \sqrt{3} \left( \frac{2r^n}{(r_1^n - r_2^n) \alpha_1 n} \mp \frac{1}{\alpha_1 n} - 1 \right), \quad (4)$$

де  $n$  – показник зміцнення матеріалу,  $r_1, r_2$  – радіуси, які обмежують зону контакту валків із заготовкою,  $\alpha_1$  – кут між хордою дуги контакту валка із заготовкою та віссю симетрії заготовки.

Для дослідження базового процесу вальцювання циліндричних заготовок між циліндричними валками було проведено імітаційне моделювання за допомогою методу скінчених елементів. Досліджуваний зразок моделювався із забезпеченням лінійних розмірів заготовки: довжина  $l = 30$  мм, висота до вальцювання  $H = 5$  мм, висота після вальцювання  $h = 2$  мм.

В результаті чисельного моделювання отримано НДС матеріалу заготовки: розподілення по об'єму заготовки накопиченої деформації (рис. 6) і інтенсивності напружень (рис. 7) на кінцевих стадіях вальцювання, які використовувались при оцінці деформовності матеріалу.

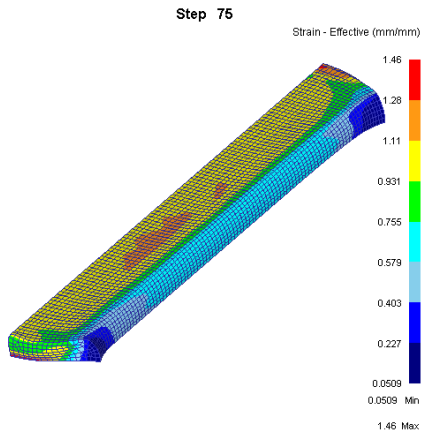


Рисунок 6 – Розподілення інтенсивності деформацій в циліндричному зразку

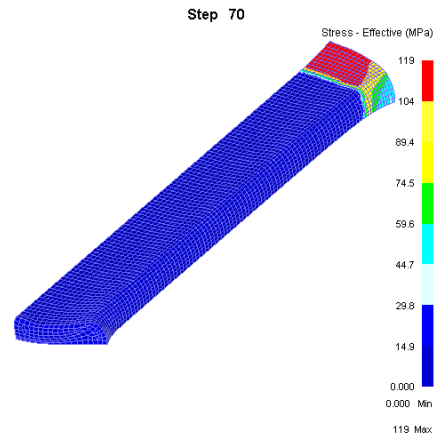


Рисунок 7 – Розподілення інтенсивності напружень в циліндричному зразку

Було досліджено зв'язок між інтенсивністю деформації та ступенем обтиснення заготовок при вальцюванні, що дало можливість визначення граничної на момент руйнування товщини вальцьованої заготовки. Для побудови цієї залежності вибирали точки на вільній бічній поверхні заготовки  $P_1$  та на вершині, яка знаходиться під валком під час вальцювання  $P_1^*$  (рис.8).

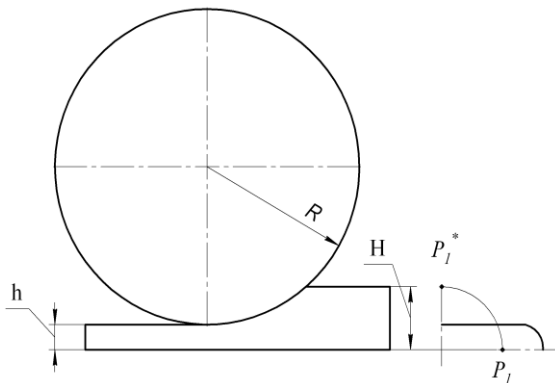


Рисунок 8 – Схема процесу вальцювання заготовок

Висоту певної точки заготовки визначали із її геометричних параметрів за формулою:

$$h = H - R - \sqrt{R^2 - d}, \quad (5)$$

де  $H$  – початкова висота заготовки;  $R$  – радіус деформуючого валка, який дорівнює 20 мм;  $d$  – горизонтальна відстань від центра валка до поточної досліджуваної точки.

Отримані залежності для зручності використання були апроксимовані. При деформаціях  $e_u \geq 0,1$  зв'язок між інтенсивністю деформацій і відносним стисненням має лінійну залежність:

$$\frac{h_{\sigma}}{D} = 0,818 - 0,723e_u \quad (6)$$

де  $h_{\sigma}$  – товщина вальцьованої заготовки поблизу вільної бічної поверхні,  $D$  – діаметр вихідної заготовки.

Для дослідження процесів НДС при гарячому вальцюванні у якості розрахункової схеми обрано схему «круг-овал», як найбільш розповсюджену і для якої характерна наявність жорстких схем напружено-деформованого стану заготовки.

За результатами розрахунків визначено НДС заготовок, зокрема характер розподілу інтенсивності деформацій  $e_u$  та інтенсивності напружень  $\sigma_u$  для

заготовок діаметром 25 мм та 35 мм в момент початку деформації, на проміжному етапі та на сталій стадії.

На рис. 9 показаний розподіл інтенсивності деформації  $e_u$  в поздовжньому перерізі та умовно відображено місця, в яких взято поперечні перерізи осередку деформації.

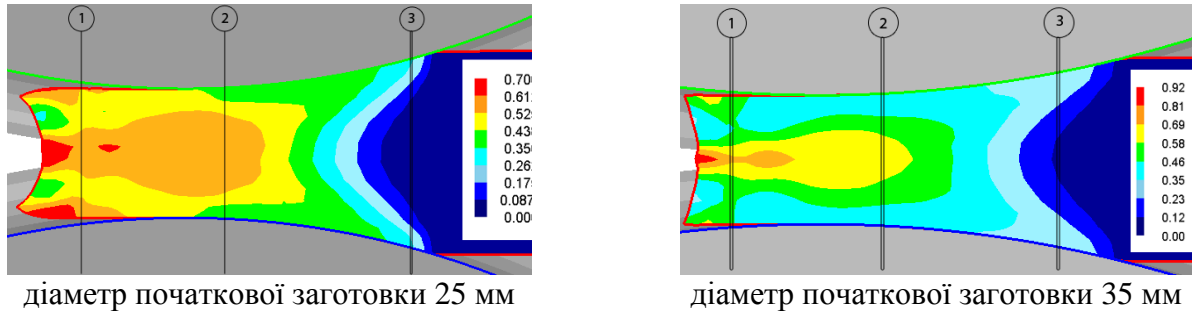


Рисунок 9 – Характер розподілу інтенсивності деформації  $e_u$  : (1) – переріз сталій стадії; (2) – переріз переходу; (3) – переріз зростання осередку деформації

В результаті моделювання визначено, що характер розподілу температури в поздовжньому перерізі по осі заготовки відповідає характеру розподілу інтенсивності деформації.

Для побудови залежності інтенсивності деформації від лінійних розмірів овалу брали 10 точок по ширині та висоті овалу. Таким чином, було побудовано для заготовки діаметром 25 мм розподіл інтенсивності деформації  $e_u$  в перерізах у напрямі осі X (рис. 10, а) і осі Y (рис. 10, б).

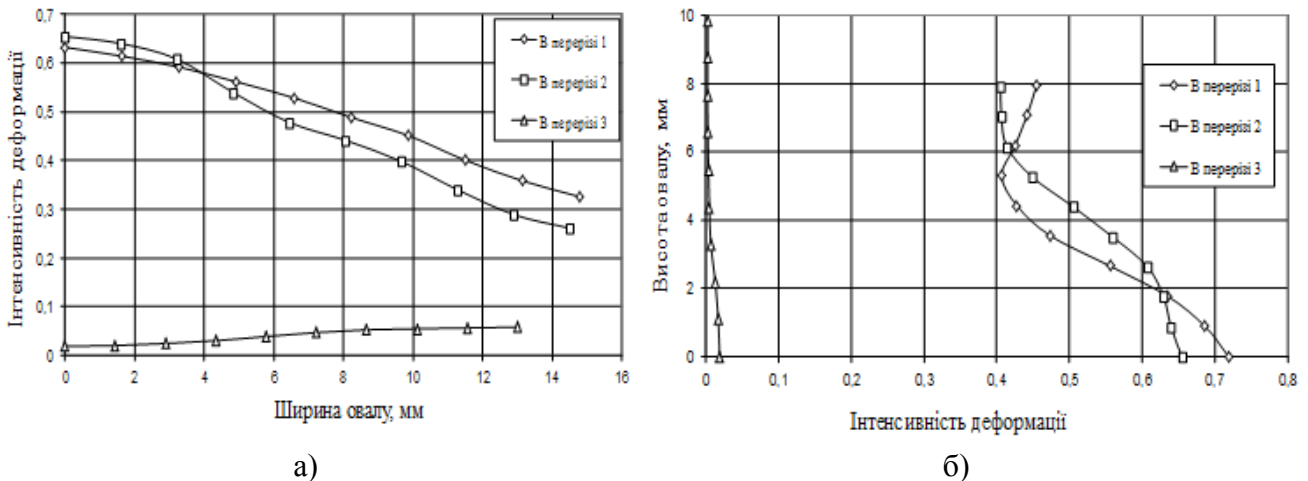


Рисунок 10 – Розподіл інтенсивності деформації  $e_u$  для заготовки діаметром 25 мм в перерізах: а) у напрямі осі X; б) у напрямі осі Y.

Аналогічно для заготовки діаметром 25 мм визначена нерівномірність розподілу температури в перерізах у напрямі осі X і осі Y. За такою ж схемою визначені відповідні характеристики для заготовок діаметром 35 мм.

За результатами досліджень отримані кореляційні залежності розподілу інтенсивності деформацій та температури в перерізах осередку деформацій при вальцюванні за схемою «круг-овал».

Розроблено спосіб виготовлення криволінійних заготовок двоетапним вальцюванням. Відповідно способу, вальцювання на першому етапі здійснюється на гладку бочку конічними валками, а на другому етапі проводиться вальцювання заготовки в калібрах циліндричних валків.

Використання конічних валків, при паралельному розташуванні їх поздовжніх осей, дозволяє змінювати швидкості деформацій і ступінь обтискування по ширині заготовки, забезпечуючи цим її криволінійність (рис. 11).

В результаті моделювання отримано моделі формозміни заготовки (рис. 12), а також розподіл інтенсивності деформацій і інтенсивності напружень в криволінійній заготовці на різних стадіях вальцювання.

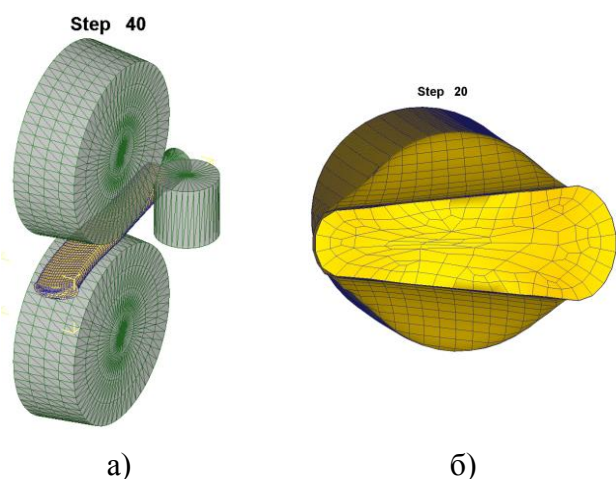


Рисунок 11 – Схема вальцювання заготовки конічними валками а) та форма поперечного перетину вальцьованої ділянки б)

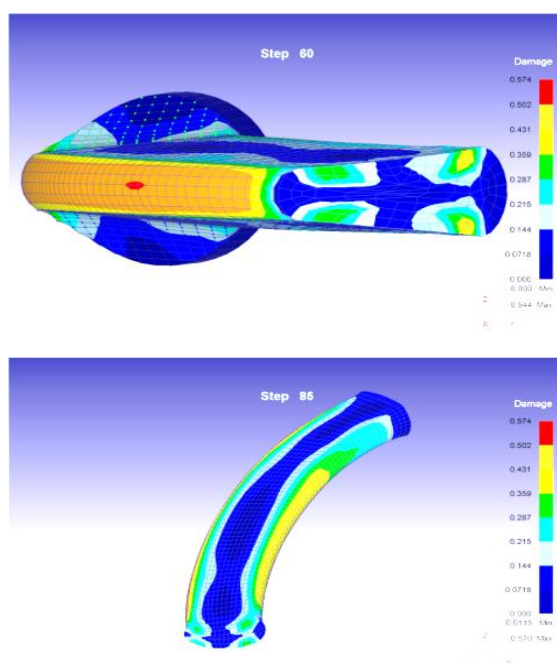


Рисунок 12 – Переміщення матеріалу криволінійної заготовки на різних стадіях вальцювання

При розрахунках НДС пластичної зони вальцьованої заготовки застосовано методу, основу на методах ліній току, функцій напружень і теорії  $R$ -функцій.

В результаті було встановлено, що показник напруженого стану в зоні деформації змінюється від величин  $\eta=1$  на вході в контакт з валками, до величин під валками  $\eta = -3... -5$ .

Встановлено, що частки матеріалу вільної поверхні заготовки, зміна НДС яких на першому етапі описується шляхами деформування, наданими на рис. 4, на другому етапі деформуватимуться за схемою НДС, яка для поздовжнього перерізу середини заготовки може бути описана шляхом деформування, рівняння якого має вигляд:

$$e_u = -0,071\eta + 0,1517, \quad (7)$$

а ті частки, що на першому етапі деформувалися при «м'яких» схемах НДС (рис. 13), на другому етапі підлягають «жорстким» умовам деформування. При цьому спостерігається немонотонне деформування.

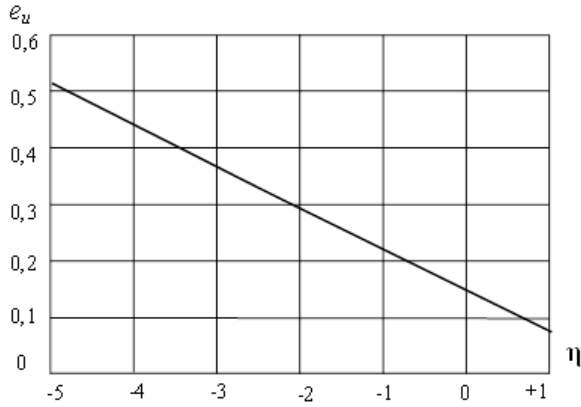


Рисунок 13 – Шлях деформування частинки матеріалу в зоні деформації

У п'ятому розділі наведено оцінку деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні та розроблені рекомендації щодо побудови раціональних технологічних процесів вальцювання.

При одноетапному вальцюванні, або вальцюванні без кантування заготовки, використаний ресурс пластичності та граничні деформації для точок найбільш небезпечних зон бічних поверхонь заготовки визначали з використанням критерію деформовності В. А. Огороднікова.

Для побудови математичної моделі шляхи деформування в аналітичному вигляді визначено функціями:

$$\eta = \eta(e_u). \quad (8)$$

Структура функції має вигляд:

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + a_1 \cdot e_u^s, & e_i \leq e_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1)), & e_i > e_1 \end{cases}, \quad (9)$$

де  $\eta_0$  – значення показника напруженого стану на початку деформування;  $(e_1, \eta_1)$  – координати точки переходу від першої до другої стадії деформування;  $a_1, a, s, \omega$  – параметри функції.

Із умови неперервності функції (9) в точці  $\eta = \eta_1$  випливає співвідношення:

$$a_1 = \frac{\eta_1 - \eta_0}{e_1^s}, \quad (10)$$

з урахуванням якого математична модель шляхів деформування точок зовнішньої та внутрішньої поверхонь криволінійної заготовки під час процесу вальцювання матиме вигляд:

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0), & e_i \leq e_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1)), & e_i > e_1 \end{cases}. \quad (11)$$

Отже, з урахуванням (11), критерій В. А. Огороднікова набуває вигляду: при  $e_p \leq e_1$

$$\psi(e_p) = \int_0^{e_p} h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) - 1}}{e_p \left[ \eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u = 1, \quad (12)$$

де

$$e_p(\eta) = e_p(\eta=0) \cdot \exp \left[ -\eta \cdot \ln \left( \frac{(1-\eta) \cdot e_p(\eta=-1)}{2 \cdot e_p(\eta=0)} + \frac{(1+\eta) \cdot e_p(\eta=0)}{2 \cdot e_p(\eta=1)} \right) \right],$$

$$h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) = 1 + 0.2 \cdot \arctg \left( \frac{s}{e_1} \cdot \left( \frac{e_u}{e_1} \right)^{s-1} \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right),$$

$$h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) = 1 + 0.2 \cdot \arctg \left( \pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1)) \right).$$

$e_p(\eta=-1), e_p(\eta=0), e_p(\eta=1)$  – гранична пластична деформація за умов рівномірного стиску, зсуву та розтягу відповідно.

Аналогічно отриманий вираз  $\psi(e_p)$  для значень  $e_p > e_1$ .

Для оцінки деформовності заготовок при вальцюванні з їх кантуванням нами використано критерій В. М. Михалевича. При цьому шлях деформування подано в загальному та зручному для подальших побудов та позначень вигляді:

$$\eta(e_u) = \frac{e_u(\eta) - e_u(\eta=0)}{e_u(\eta=1) - e_u(\eta=0)}, \quad (13)$$

де  $e_u(\eta=1), e_u(\eta=0)$  – величини накопиченої деформації згідно лінійної апроксимації шляху деформування, що відповідають вказаним значенням показника напруженого стану.

Із застосуванням тензорно-лінійного описання пошкодженості побудовано модель деформування часток матеріалу заготовки:

$$\psi_{ij} = n \cdot \sum_{k=1}^4 \int_{(e_u)_{k-1}}^{(e_u)_k} \frac{e_u^{n-1}}{e_{*c}^n [\eta(e_u)]} \cdot \beta_{ij}(e_u) \cdot de_u, \quad (14)$$

де  $e_{*c}(\eta)$  – крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні;  $(e_u)_{k-1}, (e_u)_k$  – величина накопиченої деформації відповідно на початку та в кінці  $k$ -ої ланки деформування ( $(e_u)_0 = 0, (e_u)_k < e_{*c}$ );  $\beta_{ij}$  – напрямний тензор приростів деформацій.

Оскільки матеріальні точки вільної бічної поверхні заготовки при немонотонному деформуванні зазнають різних типів напруженого стану в процесі деформування, то модель побудовано у вигляді окремих послідовних ланок, для відображення характерних етапів зміни напруженого стану відповідно технологічного процесу виготовлення заготовок, що слідує одна за однією: 1 – напружений стан одновісного розтягу; 2 – напружений стан одновісного розтягу з крученням; 3 – напружений стан одновісного стиску з крученням; 4 – напружений стан одновісного стиску та всебічний рівномірний стиск.

Для кожної ланки було отримано вираз для визначення використаного ресурсу пластичності.

За міру пошкоджень обрано другий інваріант девіатора пошкоджень:

$$\psi_u = \psi_{ij} \cdot \psi_{ij}, \quad 0 \leq \psi_u \leq 1. \quad (15)$$



У вихідному стані  $\psi_u(e_u=0)=0$ , а досягнення граничного стану визначається умовою:

$$\psi_u(e_u=e_*)=1. \quad (16)$$

Під час деформування на першій ланці згідно (16), отримаємо:

$$\psi_u(e_u)=\left(\frac{e_u}{e_{*c}(\eta=1)}\right)^{2n}, \quad 0 \leq e_u \leq (e_u)_1. \quad (17)$$

Стосовно деформування на другій ланці отримати скінчену залежність, що аналогічна (17), вже не вдається. Тому в цьому випадку із застосуванням методу числового інтегрування знаходили значення кожної компоненти девіатора пошкоджень:

$$\psi_{11}(e_u)=\frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \left[ \left( \frac{e_u(\eta=1)}{e_{*c}(\eta=1)} \right)^n + n \cdot \int_{e_u(\eta=1)}^{e_u} \frac{e_u^{n-1}}{e_{*c}^n[\eta(e_u)]} \cdot \eta(e_u) \cdot de_u \right], \quad (18)$$

де  $\eta(e_u)$  визначається співвідношенням (13); крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні надана апроксимацією:

$$e_{*c}(\eta)=e_{*c}(\eta=0) \cdot \left( \frac{e_{*c}(\eta=1)}{e_{*c}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left( \frac{e_{*c}(\eta=1) \cdot e_{*c}(\eta=-1)}{e_{*c}^2(\eta=0)} \right)^{\frac{\eta^2}{2}}. \quad (19)$$

Аналогічним чином визначаємо інші компоненти девіатора пошкоджень:

$$\psi_{22}(\varepsilon_u)=\psi_{33}(\varepsilon_u)=-\frac{\sqrt{6}}{6} \cdot \left[ \left( \frac{\varepsilon_u(\eta=1)}{\varepsilon_{*c}(\eta=1)} \right)^n + n \cdot \int_{\varepsilon_u(\eta=1)}^{\varepsilon_u} \frac{\varepsilon_u^{n-1}}{\varepsilon_{*c}^n[\eta(\varepsilon_u)]} \cdot \eta(\varepsilon_u) \cdot d\varepsilon_u \right], \quad (20)$$

$$\psi_{12}(e_u)=\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot n \cdot \int_{e_u(\eta=1)}^{e_u} \frac{e_u^{n-1}}{e_{*c}^n[\eta(e_u)]} \cdot \sqrt{1-\eta^2(e_u)} \cdot de_u. \quad (21)$$

Всі обчислення здійснено в середовищі системи комп'ютерної математики Maple. Результати розрахунків зображено на рис. 14.

З метою дослідження впливу ступеня нелінійності підсумовування пошкоджень на розрахункові значення деформовності заготовки моделювання здійснювали для різних значень параметра  $n$ , який характеризує характер підсумовування: крива 4 на рис. 14 відповідає значенню  $n=1$ ; крива 14 –  $n=0,5$ . Останнє значення, згідно з (17), відповідає лінійному принципу накопичення пошкоджень.

Закономірності зміни величини пошкоджень макрочастинки матеріалу, зображені на рис. 14 показують, що найбільш інтенсивно пошкодження накопичуються під час деформування на першій ланці, а деформування на другій ланці супроводжуються різким зниженням швидкості накопичення пошкоджень з ростом деформації. Це пояснюється «пом'якшенням» схеми напруженого стану впродовж деформування на другій ланці та чутливістю граничних деформацій металів до схеми напруженого стану.

На останній стадії другої ланки швидкість накопичення пошкоджень

знижується до значень, близьких до нуля, що позбавляє нас необхідності дослідження накопичення пошкоджень під час третьої та четвертої ланок.

На рис. 15 закономірності накопичення пошкоджень зображено в залежності від величини накопиченої деформації, що дає можливість наочно порівняти швидкість накопичення пошкоджень протягом двох ланок для різних значень  $n$ .

Для досліджуваних траєкторій найбільш жорсткий прогноз граничних деформацій відповідає лінійному принципу накопичення пошкоджень. Збільшенню параметра  $n$ , що характеризує збільшення нелінійного характеру накопичення пошкоджень, відповідає зменшення швидкості накопичення пошкоджень на початковій стадії першої ланки. А з подальшим ростом накопиченої деформації швидкість накопичення пошкоджень стає практично інваріантною до параметра  $n$ .

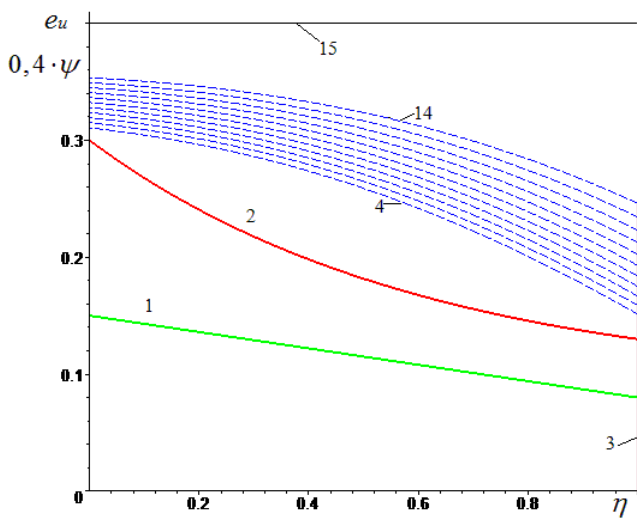


Рисунок 14 – Шлях деформування 1; крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні 2; накопичення пошкоджень на першій ланці 3, на другій ланці 4÷14; масштабоване граничне значення інтенсивності пошкоджень 15.

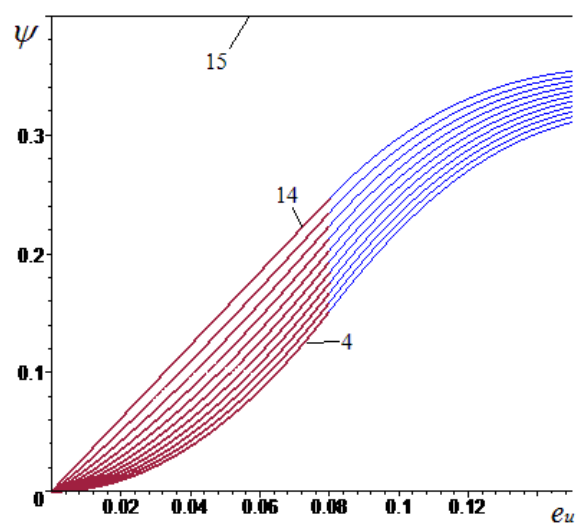


Рисунок 15 – Накопичення пошкоджень з ростом накопиченої деформації під час деформування на першій (товсті лінії) та другій (тонкі лінії) ланках.

Модель накопичення пошкоджень (14) – (21) дозволяє визначати величину використаного ресурсу пластичності при немонотонному двохетапному деформуванні, коли на другому етапі спостерігається складне деформування.

В роботі обґрунтовано перехід операцій протягування куванням і висаджування на ГKM на операції вальцювання, перехід з гарячого вальцювання на холодне.

Застосування вальцювання, як підготовчої операції до штампування, для максимального наближення форми заготовки до форми виробу, дозволяє підвищувати коефіцієнт використання матеріалу і продуктивність виробництва шляхом скорочення кількості операцій штампування. Перехід із гарячого вальцювання на холодне приводить до зменшення енергоємності виробництва при забезпеченні високої якості виробів.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена актуальним науково-технічним завданням з удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок. Дослідження спрямовані на підвищення ефективності виробництва заготовок, у тому числі для деталей складних профілів, шляхом раціонального проектування технології з використанням максимального ресурсу пластичності матеріалу.

1. Проаналізовано можливість використання як гарячого так і холодного вальцювання для виробництва деталей на підставі приведеної класифікації за міцністю, пластичністю, фізичними властивостями алюмінієвих сплавів, що підлягають деформуванню. Розглянута пластичність алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні та запропоновано спосіб вальцювання циліндричного зразка на клин валками, радіуси яких зростають в процесі вальцювання, що дозволяє проводити дослідження пластичності металів за умови напруженого стану одновісного розтягу без утворення шийки з притаманним їй «аномальним» підвищенням пластичності.

3. В результаті аналізу закономірностей процесу формоутворення при вальцюванні встановлено, що деформований стан заготовки близький до плоского, тобто найбільшими є поздовжні деформації та деформації по товщині. Збільшуючи обтиснення по поперечному перерізу заготовки можна досягнути переважного подовження відповідних ділянок. На основі цього розроблено спосіб виготовлення криволінійних заготовок двохетапним вальцюванням, за яким на першому етапі вальцювання здійснюється на гладку бочку з керуванням деформованим станом заготовки конічними валками, на другому – заготовка повертається на 90 градусів і вальцюється в калібрах циліндричних валків.

4. Побудовані об'ємні геометричні та дискретні моделі з використанням математичного апарату опису процесів теплообміну, тепломасоперенесення і деформованого стану в умовах контактної взаємодії заготовки з валками за різними схемами вальцювання шляхом проведення чисельного експерименту в універсальній програмній системі скінчено-елементного аналізу ANSYS.

Встановлено, що для рівномірного розподілу температур всередині заготовки, нагрітої до 450°C з метою отримання рівнозернистості структури та уникнення мікротріщин малопластичних сплавів доцільно нагрівати валки в інтервалі температур від 250 °C до 450°C. Наявність оксидної плівки забезпечує додатковий рівномірний розподіл теплового стану в осередку деформації завдяки її ізолюючим властивостям, зменшуючи перепад температур на 60%. Визначено, що внесок значень термічної складової в коефіцієнти розширення та випередження в залежності від схем вальцювання (для алюмінієвого сплаву АК6 при високотемпературному вальцюванні) складають: «круг-овал» – 42 %, 45 %; «овал-ромб» – 39,4 %, 39,9 %; «ромб-квадрат» – 38 %, 38,2 %; «овал-квадрат» – 39,3 %, 39,3 %).

5. Встановлено суттєву неоднорідність НДС в зоні деформування за результатами імітаційного моделювання НДС циліндричних заготовок при холодному вальцюванні. Найбільш жорстким НДС спостерігається на вільних

бічних поверхнях заготовки ( $\eta \approx 1$ ). Отримана залежність між відносним стисненням та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні циліндричної заготовки з алюмінієвого сплаву, показник напруженого стану який відповідає одновісному розтягу, що дозволяє підвищити ефективність розроблення технологічних процесів холодного вальцювання, надаючи можливість наперед визначати граничну на момент руйнування товщину заготовки при різних її діаметрах, як  $h_* = (0,818 - 0,723 \cdot e_*) \cdot D$ .

6. У результаті проведеної оцінки деформовності алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні, з використанням діаграм пластичності та скалярного і тензорного критеріїв деформовності, визначено граничні до руйнування значення інтенсивності деформацій та виявлено низку закономірностей, а саме: для матеріалів із вищим ступенем нелінійності характеру накопичення пошкоджень спостерігається зменшення швидкості накопичення пошкоджень; процес часткового «заліковування» пошкоджень можливий під час безперервної зміни напрямків приростів деформацій на тлі збільшення накопиченої деформації.

Проведена оцінка деформовності сплавів дозволила: обґрунтувати можливість переходу з гарячого на холодне вальцювання з метою підвищення енергоощадності процесів вальцювання; визначати максимальну до руйнування деформацію заготовок або величину використаного ресурсу пластичності на проміжних етапах.

Розроблено моделі накопичення пошкоджень, які дозволяють визначати величину використаного ресурсу пластичності при немонотонному двохетапному вальцюванні, коли на другому етапі спостерігається складне деформування.

7. Експериментально встановлено, що застосування процесу вальцювання заготовок як підготовчої операції до об'ємного штампування є альтернативою традиційним операціям протягування заготовок на кувальних молотах, операціям, які виконуються набором потовщень на ГKM, при штампуванні поковок подовженої форми, крім того забезпечує зниження норми витрати початкової заготовки на 10 – 25 %, зменшення трудомісткості на 15 – 35 %, збільшення стійкості штампів на 25 – 35 %, підвищення міцності заготовок на 9 – 12 % і пластичності на 13 – 38 %, поліпшення якості поверхні і структури металу заготовок під штампування.

Результати роботи впроваджені в розроблення технологічного процесу вальцювання у вигляді обґрунтування температурних режимів гарячого вальцювання в процесі формоутворення; визначення граничної до руйнування інтенсивності деформації при холодному вальцюванні заготовок в залежності від їх геометричних параметрів; удосконалення процесу формозміни криволінійних заготовок шляхом використання технології двохетапного вальцювання на підприємстві ДП «45 експериментальний механічний завод» (м. Вінниця), що забезпечило підвищення металоощадності технологічного процесу вальцювання до 15 %, збільшення кривизни заготовки при двохетапному вальцюванні до 10 %, підвищення рівномірності та рівнозернистості структури матеріалу заготовки під час гарячого вальцювання.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджені в навчальний процес з підготовки студентів інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] С. О. Скрябін, І. В. Гунько, та І. А. Бубновська, "Визначення поля температур у зоні контакту вальцьованих заготовок", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 108-112, 2010.

*Автором описано вимоги до нагрівання заготовок та висвітлено негативні наслідки їх невиконання, здійснено підбір аналітичних залежностей та розрахунок значень параметрів осередку деформації і температурного поля.*

[2] С. А. Скрябін, І. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Методы подготовки под штамповку заготовок из алюминиевых сплавов и всесторонний анализ качества изготовленных из них штампованных поковок", *Технологические системы*, № 2, с. 70-77, 2011.

*Автором проаналізовано недоліки та переваги існуючих методів підготовки заготовок під штамповку. Виконані експериментальні дослідження вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів під наступне штампування.*

[3] С. А. Скрябін, І. В. Гунько, Д. С. Чайка, и И. А. Бубновская, "Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок", *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. № 6, с. 101-107, 2011.

*Автором запропоновано методика розрахунку поправочного коефіцієнта для знаходження базисного тиску при вальцюванні заготовок із різних алюмінієвих сплавів.*

[4] С. А. Скрябін, І. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Теплообмен между поверхностью деформируемого металла и окружающей средой", *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. № 4, с. 60-65, 2010.

*Автором проаналізовано фактори, що впливають на характер розподілу температури по перерізу заготовки та між заготовкою та докільям.*

[5] С. А. Скрябін, Н. Г. Кришук, І. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Исследование тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах", *Обработка материалов давлением*, Краматорск: ДГМА, № 2(27). с. 84-88, 2011.

*Автором проведено розрахунки теплового стану зони деформування, статистичну обробку результатів, оцінено вплив оксидної плівки на розподіл температур по перерізу заготовки.*

[6] С. А. Скрябін, І. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Распределение скоростей перемещения металла по сечениям вальцуемой заготовки", *Технологические системы*, № 2, с. 46-49, 2012.

*Автором проведено аналіз розподілу швидкостей переміщення металу при вальцюванні по поздовжньому та поперечному перерізах заготовки.*

[7] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою «круг-овал»", *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, № 1(40), с. 35-39, 2015.

*Автором проведено геометричну інтерпретацію та аналіз термомеханічних характеристик.*

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

*Автором обґрунтовано можливість застосування гарячого вальцювання при виготовленні компресорних лопаток.*

[9] І. В. Севостьянов, Ю. В. Добранюк, та І. А. Бубновська, "Розвиток процесів вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів", *Вісник машинобудування та транспорту, ВНТУ*, № 2 (6), с. 150-157, 2017. Режим доступу: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/7>.

*Здобуто аналітичний вираз для визначення граничної до руйнування висоти заготовки на основі апроксимації залежності між ступенем обтиснення та інтенсивністю деформацій.*

[10] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу криволінійних заготовок при холодному вальцюванні", *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, Вінниця, № 4 (99), с. 92- 96, 2017.

*Автором проведено оцінку деформованості заготовки для випадку двохетапного деформування.*

[11] І. А. Бубновська, "Аналіз напруженого стану заготовок при вальцюванні", *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця. № 2 (105), с. 80-85, 2019.

[12] С. А. Скрыбин, и И. А. Бубновская, "Исследование нестационарных тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах", *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 10, с. 32-36, 2013. Режим доступу: <https://www.kshp-omd.ru/ru/archivru/2013/kshp-omd-10-2013/211-soderzhanie>

*Автором виконано розробку методики чисельного аналізу процесів теплообміну та тепломасоперенесення для визначення полів розподілу температур і температурних деформацій.*

[13] І. А. Бубновська, "Дослідження напружено-деформованого стану заготовок при вальцюванні", *The scientific heritage*, Budapest, Kossuth Lajos utca 84,1204, № 47, P.1. с. 31-37, 2020.

[14] 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, Верес. 26, 2016.

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

[16] В. А. Матвійчук, О. О. Рубаненко, та І. А. Бубновська, "Спосіб оцінки технологічних можливостей плющення циліндричних заготовок вальцюванням", *МПК G01N 3/08 (2006/01), B21B1/22(2006.1). № 122547*, Січ. 10, 2018.

[17] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, и И.А. Бубновская, "Изготовление профилей сложного поперечного сечения в условиях изотермического деформирования", *на XI міжнародній науково-технічній конференції. Прогресивна техніка і технологія 2010*, Київ, 2010, с. 54-55.

[18] И. В. Гунько, Л. В. Швец, и И. А. Бубновская, "Коэффициенты вытяжки для вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов традиционным и изотермическим деформированием", *на всеукраїнській науково-практичній конференції «Наукові дослідження-2010»*, Миколаїв: НУК, 2010, с. 123-125.

[19] І. В. Гунько, та І. А. Бубновська, "Штампування поковок із алюмінієвих сплавів з подовженою віссю", *на міжнародній науково-технічній конференції*, Вінниця: ВНТУ, 2011, с. 178-180.

[20] І. А. Бубновська, "Дослідження процесу вальцювання заготовок з криволінійною віссю", *на Міжнародній науковій інтернет-конференції «Теоретичні і практичні проблеми теорії пластичності та обробки металів тиском»*, Вінниця, ВНТУ, 16 жовтня 2013 р., Режим доступу: [http://omdconf.vntu.edu.ua/tezu/2013/tezu\\_bubhovska.pdf](http://omdconf.vntu.edu.ua/tezu/2013/tezu_bubhovska.pdf)

[21] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Розширення технологічних можливостей процесу вальцювання виробів", *на Всеукр. наук.-практ. конф. Сучасні агротехнології: тенденції та інновації*, Вінниця: РВВ ВНАУ, 2015, с. 59 – 61.

[22] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Розвиток процесів холодного вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів", *на VII Міжнародній науково-технічній конференції. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*, Київ Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2016, с. 26-29.

[23] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу криволінійних заготовок при вальцюванні в умовах складного двоетапного деформування", *на VIII Міжнародній науково-технічній конференції, Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*, Київ-Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2017, с. 161 -164.

[24] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та І. А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів", *на міжнародній науково-методичній Інтернет-конференції "Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності"*, 2018, с. 246-249. Режим доступу: [https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018\\_netpub.pdf](https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018_netpub.pdf).

## АНОТАЦІЯ

**Бубновська І. А. Удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Дисертацію присвячено науково-технічному завданню з підвищення ефективності процесів вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів, розробленню нових схем вальцювання та методики оцінки деформовності алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні.

Отримала подальший розвиток методика оцінки деформовності матеріалу заготовок при холодному вальцюванні з урахуванням особливостей зміни напружено-деформованого стану при різних схемах формоутворення. Запропоновано модель накопичення пошкоджень матеріалу заготовки із алюмінієвих сплавів щодо визначення величини використаного ресурсу пластичності та граничних деформацій при монотонному та немонотонному холодному вальцюванні.

Встановлено закономірності впливу активних сил тертя, викликаних зміною діаметра валка в осьовому напрямі та його поворотом, на кінематику формозмінення, напружено-деформований стан і деформовність заготовок в процесі холодного вальцювання.

Розроблено метод експериментального дослідження пластичності металів із забезпеченням сталих значень показників напруженого стану.

Розроблено спосіб виготовлення криволінійних заготовок. В межах розробленої імітаційної моделі способу отримано залежності між відносним стисненням та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні для використання в якості оцінки і прогнозування можливостей руйнування заготовки.

Розвинуто теорію теплових процесів і термічних деформацій при вальцюванні заготовок із алюмінієвих сплавів, на основі чого оцінено внесок температурної складової в коефіцієнти нерівномірності, визначено вплив оксидної плівки на тепловий стан в осередку деформації та встановлено температурний інтервал нагріву валків, при якому розподіл температурного поля набуває рівномірності по перерізу заготовки.

*Ключові слова:* вальцювання, пластичність, конічні валки, напружено-деформований стан, деформовність, накопичена пластична деформація, гранична деформація до руйнування, ступінь обтиснення, тензорна модель накопичення пошкоджень, термомеханічні параметри.

## ABSTRACT

***Bubnovska I. A. Improving forge-rolling processes based on the modeling of the mechanics of shape change of blanks – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.***



Dissertation for the degree of candidate of Science in Technical Science in the Specialty 05.03.05 «Processes and Machines of Plastic Working». – Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, 2021.

The dissertation is devoted to the scientific and technical task on increase of efficiency of processes of forge-rolling of blanks from aluminum alloys, development of new schemes of forge-rolling and a technique of an estimation of deformability of aluminum alloys at cold forge-rolling.

The method of estimating the deformability of the blank's material during cold forge-rolling was further developed, taking into account the peculiarities of the change of the stress-strain state in different molding schemes. The model of accumulation of damages of the material of the blanks from aluminum alloys related to definition of size of the used resource of plasticity and boundary deformations at monotonic and nonmonotonic cold forge-rolling is offered.

The regularities of the influence of active friction forces caused by the change of the roll diameter in the axial direction and its rotation on the kinematics of shape change, stress-strain state and deformability of blanks in the process of cold forge-rolling are established.

The method of experimental research of plasticity of metals with maintenance of constant values of indicators of a stress state is developed.

A method of manufacturing curved blanks has been developed. Within the developed simulation model of the method, the dependences between the relative compression and the accumulated deformation on the free side surface are obtained for use as an assessment and prediction of the possibilities of destruction of the blank.

The theory of thermal processes and thermal deformations during forge-rolling of aluminum alloy blanks is developed, on the basis of which the contribution of temperature component to expansion and advance coefficients are estimated, influence of oxide film on thermal state in deformation center is determined and recommended temperature interval of roll heating is established.

*Keywords:* forge-rolling, plasticity, conical rolls, stress-strain state, deformation, accumulated plastic deformation, ultimate deformation to failure, degree of compression, tensor model of damage accumulation, thermomechanical parameters.

## АННОТАЦИЯ

***Бубновская И. А. Совершенствование процессов вальцевания на основе моделирования формоизменения заготовок - Квалификационный научный труд на правах рукописи.***

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2021.

Диссертация посвящена научно-техническому заданию по повышению эффективности процессов вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов, разработке новых схем и методики оценки деформируемости алюминиевых сплавов при холодной вальцовке.

Анализ применения процессов вальцовки показал, что достаточно широкое распространение получили процессы горячей вальцовки при изготовлении сплошных длинномерных изделий в виде формовочных и штамповочных операций, а развитие холодной вальцовки ограничивается опасностью разрушения материала.

Анализ закономерностей процесса формообразования при вальцовке показал, что заготовка деформируется преимущественно в продольном направлении и по толщине. Увеличивая обжатия по поперечному сечению заготовки можно достичь большего удлинения соответствующих участков. На основе этого разработан способ изготовления криволинейных заготовок двухэтапной вальцовкой, согласно которому на первом этапе вальцовка осуществляется на гладкую бочку коническими валками, на втором – заготовка поворачивается на 90 градусов и вальцуется в калибрах цилиндрических валков.

Рассмотрена пластичность алюминиевых сплавов при холодной вальцовке и предложен способ вальцовки цилиндрического образца на клин валками, радиусы которых увеличиваются по ходу вальцовки, что позволяет проводить исследования пластичности металлов в условиях напряженного состояния одноосного растяжения без образования шейки.

Установлены закономерности влияния активных сил трения, вызванных изменением диаметра валка в осевом направлении и его поворотом, на кинематику формоизменения, напряженно-деформированное состояние и деформируемость заготовок в процессе холодной вальцовки.

Получила дальнейшее развитие методика оценки деформируемости материала заготовок в процессах холодной вальцовки с учетом особенностей изменения напряженно-деформированного состояния при разных схемах формообразования. Предложена модель накопления повреждений материала заготовки из алюминиевых сплавов по определению величины использованного ресурса пластичности и предельных деформаций при монотонной и немонотонной холодной вальцовке.

В рамках разработанной имитационной модели получены зависимости между относительным сжатием и накопленной деформацией на свободной боковой поверхности заготовки для использования в качестве оценки и прогнозирования возможностей разрушения заготовки при вальцовке.

Получила развитие теория тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов, на ее основе оценен вклад температурной составляющей в коэффициенты неравномерности, определено влияние оксидной пленки на тепловое состояние в очаге деформации и установлен температурный интервал нагрева валков, при котором распределение теплового поля становится равномерным по сечению заготовки.

*Ключевые слова:* вальцовка, пластичность, конические валки, напряженно-деформированное состояние, деформируемость, накопленная пластическая деформация, предельная деформация к разрушению, степень обжатия, тензорная модель накопления повреждений, термомеханические параметры.

Підписано до друку 15.02.21 р.  
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний.  
Друк – лазерний. Ум. друк. арк. 1,4.  
Наклад 100 прим. Зам. № \_\_\_\_

---

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі  
Вінницького національного аграрного університету  
м. Вінниця, вул. Сонячна,3, 21008.  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців,  
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 5009 від 10.11.2015