

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Бубновської Ірини Анатоліївни «Удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском»

#### **1.Оцінка структури та змісту 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.

У **вступі** кваліфікаційної роботи 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.

В **першому розділі** проаналізовано схеми технологічного процесу виготовлення суцільних довгомірних виробів в залежності від конструктивних особливостей, призначення, геометричних і технологічних параметрів, способів формоутворення. Окремо розглянуті процеси холодного та гарячого вальцювання, їх переваги і недоліки. Викладено результати проведеного аналізу аналітичних і експериментально-розрахункових методів дослідження напружено-деформованого стану заготовок, дослідження пластичності металів та обґрунтовано вибір напряму дослідження. Геометрична складність і нестационарність пластичного деформування, можливість виготовляти не характерні для прокатки заготовки (криволінійні, різної товщини по перетину), вальцюванням вимагає додаткових досліджень для попередження руйнування матеріалу та втрати стійкості елементів заготовки в процесі формозмінення.

Розглянуті існуючі критерії деформовності металів, та випадки їх застосування, зроблено висновок про необхідність розроблення методики для оцінки деформовності для двохетапного немонотонного деформування.

**У другому розділі** були розглянуті властивості та галузі застосування алюмінієвих сплавів у зв'язку з тенденціями заміни сталі легкими сплавами в машинобудуванні, транспорті, приладобудуванні. Приведена класифікація за міцністю і пластичністю, а також фізичні властивості алюмінієвих сплавів, що підлягають деформуванню, на основі цього авторкою обґрунтовано вибір холодного чи гарячого вальцювання для виробництва необхідних деталей. Розглянуто ефект зміцнення алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні та методи побудови кривих зміцнення. Наведені побудовані криві зміцнення алюмінієвих сплавів АМц, АД1, АД31 при холодному деформуванні та криві деформаційного зміцнення алюмінієвих сплавів АК6, АК8, АМг3 при гарячому деформуванні.

Розглянуто пластичність алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні із визначенням проблем дослідження пластичності металів, що пов'язані з відсутністю способів побудови «єдиної» кривої граничних деформацій та можливістю забезпечення сталих значень показників напруженого стану. Описано та проаналізовано недоліки способу прокатки зразків на клин прямокутного або складно профільованого поперечного перерізу на двохвалковому стані.

Запропоновано спосіб вальцювання циліндричного зразка на клин валками, радіуси яких зростають в процесі вальцювання та приведено його переваги. На основі цього способу визначені траєкторії шляхів деформування криволінійного зразка.

**Третій розділ** присвячений дослідженням теплових процесів і термічних деформацій при вальцюванні круглих заготовок з алюмінієвих сплавів. Авторкою було застосовано для дослідження математичні моделі конвективного і променистого теплообміну між поверхнею нагрітої заготовки і довкіллям, контактного теплообміну між нагрітою заготовкою і елементами вальцювального устаткування в процесі деформування; нелінійного тепломасоперенесення,

кондуктивного і дифузійного перенесення тепла в об'ємі заготовок при вальцюванні на кувальних вальцях за схемами "круг-овал", "овал-ромб", "ромб-квадрат", "овал-квадрат"; квазістаціонарного деформованого стану при термічному навантаженні моделей об'ємів круглих заготовок з алюмінієвого сплаву АК6, нагрітих до температури 450°C, з урахуванням гіпотези про нестискуваність матеріалу.

Обчислювальний експеримент з визначення нестационарних теплових процесів і термічних деформацій при формозміні різних моделей об'ємів заготовок, нагрітих до температур 450°C, проведений із застосуванням розробленого алгоритму автоматизованого розрахунку в універсальній програмній системі скінчено-елементного аналізу ANSYS. В результаті його проведення визначені закономірності розподілу температур та полів поздовжніх та поперечних термічних деформацій осередку деформації при вальцюванні заготовок для різних технологічних режимів. Визначено, що оксидна плівка, якою вкрита поверхня нагрітої заготовки, зменшує перепад температур в поперечному перерізі овальної заготовки до 60 %, внесок термічної складової коефіцієнтів розширення та випередження матеріалу заготовок з алюмінієвого сплаву АК6 при високотемпературному вальцюванні для різних схем вальцювання складає від 38% до 45% в коефіцієнти нерівномірності.

У **четвертому розділі** проведено аналіз напружено-деформованого стану 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.

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 вальцюваної заготовки.

Для дослідження базового процесу вальцювання циліндричних заготовок між циліндричними валками було проведено імітаційне моделювання за допомогою методу скінчених елементів. В результаті моделювання отримано НДС матеріалу заготовки: розподілення по об'єму заготовки накопиченої деформації і інтенсивності напружень на різних стадіях вальцювання, які використовувались при оцінці деформовності матеріалу.

Був досліджений зв'язок між інтенсивністю деформації та ступенем обтиснення заготовок при вальцюванні із застосуванням 2 підходів, які показали ідентичність результатів. З використанням програмного забезпечення Mathcad апроксимовано залежність між відносним стисненням та інтенсивністю деформацій. Отримане рівняння дозволяє наперед визначати граничну на момент руйнування товщину заготовки при різних її діаметрах.

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.

В результаті моделюванням визначено, що характер розподілу температури в поздовжньому перерізі по осі заготовки відповідає характеру розподілу інтенсивності деформації. 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, вальцювання на першому етапі здійснюється на гладку бочку конічними валками, а на другому етапі проводиться вальцювання заготовки в калібрах циліндричних валків. Для визначення технологічних можливостей і отримання основних закономірностей напружено-деформованого стану криволінійних заготовок при формуванні вальцюванням було проведено

імітаційне моделювання запропонованого способу, який реалізується шляхом перемінного обтискування заготовки по її ширині. За результатами моделювання визначені значення показника напруженого стану на вільних бічних (зовнішній і внутрішній) поверхнях криволінійної заготовки для різних ступенів обтискування вальцюванням та побудовано діаграми пластичності алюмінієвих сплавів.

**В п'ятому розділі** авторкою наведені розроблені методики оцінки деформовності матеріалу заготовок в процесі вальцювання, зокрема 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, а при вальцюванні з їх кантуванням використано критерій В. М. Михалевича.

З урахуванням експериментальних досліджень авторки, показано, що застосування процесу вальцювання заготовок як підготовчої операції до об'ємного штампування замість підготовки заготовок на кувальних молотах (операція протягування), операцій, які виконуються набором потовщень на ГKM, при штампуванні поковок подовженої форми забезпечує зниження норми витрати початкової заготовки на 10 – 25%, 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.

Кожний розділ дисертаційної роботи закінчується висновками до нього. В роботі надано загальні висновки відповідно до поставлених та виконаних завдань.

**Список використаних джерел** є інформативним та в достатній мірі охоплює область обробки тиском щодо технології вальцювання та відображає великий обсяг оброблених джерел.

**Додатки** містять в собі список публікацій здобувачки за темою дисертації, дані з моделювання термомеханічного стану осередку деформування, програмний модуль з розрахунку параметрів НДС та оцінки граничного стану, розроблений в середовищі системи Maple та акти впровадження результатів роботи.

## **2. Актуальність теми дисертаційного 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 степенях 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 присвячена значна кількість робіт. В основному, це роботи з калібрувального холодного вальцювання важкодеформованих титанових та хромонікелевих сплавів. В машинобудуванні, особливо в авіабудуванні, 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.

З цієї точки зору, дисертація Бубновської І. А., удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок, яке б забезпечувало підвищення ефективності виробництва заготовок, в тому числі для деталей складних профілів, а саме, на підвищення якості виробів із забезпеченням високого коефіцієнту використання металу, економію матеріальних, трудових та фінансових ресурсів є актуальною науково-технічною задачею.

**Зв'язок з державними науковими програмами, планами та 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).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації та їх достовірність**

Наукові положення, висновки та рекомендації в роботі є цілком обґрунтованими з наукової та практичної точки зору. Для отримання імітаційних та теоретичних результатів, використано програму, яка надає достовірні дані з обробки тиском за використанням методу скінчених елементів.

Експериментальні дослідження та лабораторний аналіз виконувались на промисловому та лабораторному обладнанні авіаційного підприємства КиАЗ «Авіант», практичні результати роботи впроваджені на підприємстві м. Вінниця та у навчальному процесі, що підтверджено актами впровадження.

#### **4 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.

## **6. 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 двоетапним 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.

#### **7. Рекомендації з використання результатів дисертації**

Результати дисертаційної роботи можуть бути ефективно використані на підприємствах авіаційної, автомобільної, машинобудівної галузі, де є виробництво виробів, в тому числі криволінійних, з використанням технології вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів.

Результати можуть використовуватись при підготовці здобувачів у закладах вищої освіти інженерно-технічних спеціальностей.

#### **8. Повнота викладення основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях**

За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 13 наукових праць, що повністю відображають зміст дисертаційної роботи, 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.

#### **9. Апробація результатів дисертаційної роботи**

Результати дисертації доповідалися на 10 міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях. Викладення складових частин наукової роботи та їх обговорення відбувалось на наукових семінарах кафедр ВНАУ та ВНТУ м. Вінниця.

#### **10. Зауваження по роботі**

1. В розділі 4 авторка досліджує механіку процесу вальцювання і визначає напружено-деформований стан різними методами: аналітичним, імітаційного моделюванням, експериментально-аналітичним. Проте, не

проводиться належного порівняння результатів (компонентів тензора напружень, деформацій, показників напруженого стану), точності отриманих рівнянь і числових значень і т.д. Очевидно, що після застосування декількох методів треба було зробити висновки із рекомендаціями який метод і в якому випадку треба застосовувати, його точність тощо.

Результати експериментально-аналітичних досліджень НДС при вальцюванні (розділ 4, п. 4.4) не знайшли відображення в авторефераті.

2. Незрозуміло чому і без незалежного обґрунтування авторка використовує апроксимацію шляхів деформування у вигляді (формула (5.2), стор. 168 або ф. (9), стор. 13 в авторефераті). Варто було б застосувати більш прості функції, із фізично змістовними коефіцієнтами щодо явищ процесу вальцювання. Наприклад, в найпростішому випадку це може бути дві прямі лінії на двох етапах. Тоді значно скорочується кількість параметрів функції, що суттєво з т.з. практичного використання, при майже тій самій точності результатів обрахунку (досвід рецензента).

3. Недостатню увагу авторка приділила дослідженням фізико-механічних властивостей матеріалів (криві течії, діаграми пластичності тощо). Непрозоро подана інформація, як ці характеристики отримано в ході виконання дослідження. Варто було надати фотографії зразків і їх детальну характеристику, обладнання, результати статистичної обробки даних експериментів тощо.

Незрозуміло, які дані щодо кривих течії (функції, коефіцієнти, чисельні величини тощо) закладались в програми MCE (ANSYS, QDEFORM, DEFORM 3D) для моделювання процесів вальцювання. І як ці дані узгоджуються з властивостями конкретних матеріалів, на яких виконувались експерименти.

4. Результати розрахунків використаного ресурсу пластичності, граничних деформацій руйнування при вальцюванні не перевірені експериментально. Також відсутні результати порівняння результатів оцінки деформовності при вальцюванні, які можна було б отримати різними методами, наприклад, як відрізняються результати, отримані на основі скалярного і тензорного підходу.

5. В другому розділі п. 2.1-2.3 містять загальновідомі відомості, наприклад, щодо моделей властивостей матеріалів, а отже, їх варто було перенести в оглядовий розділ. Теж саме стосується п.п. 3.1.1, 3.1.2.

6. Формула (2.4) на стор. 70 відображає закон сталості об'єму при пластичній формозміні, втім авторка коментує її як властивість адитивності логарифмічних деформацій, що є змістовно некоректно.

## 12. Ідентичність автореферату змісту дисертації

Автореферат в цілому є відповідним до змісту і основних положень дисертації.

## 13. Загальна оцінка дисертаційної роботи

В цілому, зазначені зауваження не впливають на якість, а також загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи здобувача та можуть бути використані як побажання для подальшої роботи з наукового пошуку.

Дисертаційна робота Бубновської Ірини Анатоліївни «Удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок» є завершеною науковою працею, що вирішує актуальну науково-технічну проблему в напрямку розвитку ковальсько-штампувального виробництва для удосконалення процесів вальцювання з метою підвищення якості виготовлення напівфабрикатів подовженої форми.

Оцінюю дану роботу позитивно, вона відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, які висувуються до кандидатських дисертацій. Зміст роботи відповідає та напрямки дослідження відповідають паспорту спеціальності. Вважаю, що авторка дисертації **Бубновська Ірина Анатоліївна** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском».

Офіційний опонент,

В.о. завідувача кафедри опору матеріалів та прикладної механіки,

Вінницький національний технічний університет

доктор технічних наук, професор



Грушко О. В.

