

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Чайки Дмитра Сергійовича «Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів із забезпеченням їх раціональних технологічних параметрів», 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, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та шести додатків. Список використаних джерел містить 171 найменування, додатки складаються з 25 сторінок. Обсяг основного тексту дисертації містить 131 сторінку, а також 107 малюнків і 17 таблиць.

У **вступі** кваліфікаційної роботи наведено її загальну характеристику, обґрунтовано актуальність теми, а також показано відповідність роботи до стратегій розвитку та відродження вітчизняного авіабудування, наведено мету і задачі досліджень, дана характеристика об'єкта, предмета та методів дослідження. Описано особистий внесок здобувача. Визначено наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів, та наведено відомості щодо апробації роботи.

В **першому розділі** обґрунтовано вибір напряму дослідження, наведено види та параметри розширення при вальцюванні, а також викладено результати аналізу існуючих робіт з дослідження явища розширення при прокатуванні та вальцюванні. Надано докладний опис переваг та недоліків методів, що було розроблено при розвитку теорії розширення, за якими виконується розрахунок розширення під час вальцювання заготовок на гладких валках та в калібрах. Докладно розкрито джерела, що стосуються впливу, який надають позаконтактні зони на параметри осередку деформування при гарячому вальцюванні, як з точки зору геометрії заготовок та інструменту, так і з точки зору їх впливу на енергосилові параметри процесу. Показано методи, що було розроблено для дослідження розмірів фактичному осередку деформування.

Визначено загальні переваги проведення операції вальцювання в наближених до ізотермічних умовах деформування та показано їх вплив на розширення.

Проаналізовано існуючі системи автоматизованої розробки технологічного процесу вальцювання, а також сучасні системи моделювання процесів обробки металів тиском. Обґрунтовано необхідність розробки нової системи автоматизованого проектування із забезпеченням раціональних технологічних параметрів процесу вальцювання.

**У другому розділі** автор визначався з напрямками подальшої роботи, а також з методами що будуть використані для дослідження параметрів технологічного процесу вальцювання з забезпеченням його раціональних технологічних параметрів. Моделювання процесу обробки тиском в дисертації засновано на використанні програми QForm3D, робота якої описана на початку розділа та базуються на використанні методу скінчених елементів. Також показано процес отримання геометрії перерізу заготовки, а також фактичного осередку деформації та їхню конвертацію в векторний формат з подальшим аналізом у програмному комплексі AutoCad та подальшої розробки удосконалених залежностей, що описують розрахунок загальних параметрів процесу вальцювання, за допомогою програмного комплексу Statistika. Окремо виділені методи, які автор планує використовувати для дослідження впливу позаконтактних зон на поперечну деформацію під час вальцювання прямокутних заготовок в гладких валках та циліндричних заготовок в гладких валках та калібрах. Також описано метод, що використовується для визначення температурного коефіцієнту розширення при вальцюванні в умовах наближених до ізотермічних.

Для оцінки показників пластичності заготовок, що вальцюються, було розраховано ступень деформації зсуву та загальний показник напруженого стану для операцій вальцювання циліндричних заготовка в овальних калібрах. Чисельна ознака схеми напруженого стану, що відображає вплив відносного гідростатичного тиску на пластичність розраховувалась для точки в області позаконтактних зон на кожному кроці розрахунку. Після інтерполяції значень до

MathCad, отримувалась формула для опису шляху деформування поліномової залежності. Оцінювання деформовності металу у позаконтактних зонах для розрахунку значень використаного ресурсу пластичності було виконано на підставі лінійного критерію В. Л. Колмогорова та нелінійного модифікованого В. А. Огороднікова.

Розроблено методику з розрахунку середнього питомого зусилля за використанням теорії подібності через використання відомих даних за сплавом АК6, а також даних для алюмінієвих сплавів, що досліджуються.

**Третій розділ** присвячений дослідженням і вивченню механіки впливу позаконтактних зон на розширення. Автором було проаналізовано вальцювання заготовок прямокутного перерізу в гладких валках з різними розмірами та формою позаконтактних зон, для яких розкрито причини виникнення утягнення в позаконтактних зонах. Також було підтверджено, що найбільше розширення спостерігається в заготовках, обсяг позаконтактних зон яких рівномірно розподілений по всій ширині, та перевищує у декілька разів розширення позаконтактних зон, що мають форму перерізу, наближену до трикутної, яка є найбільш схильною до утягнення.

При визначенні залежностей впливу наявності в заготовці позаконтактних зон на розширення при вальцюванні заготовок круглого перерізу в гладких валках, показано що відсутність позаконтактних зон зменшує градієнт нерівномірності напружено-деформованого стану в осередку деформування та полегшує течію металу в поперечному напрямку. Дослідження фактичного осередку деформування показали, що в заготовках з наявністю позаконтактних зон, рівномірність напружено-деформованого стану зберігається до ступеня обтиску 23 %.

Визначення розмірів розширення з урахуванням впливу позаконтактних зон при вальцюванні циліндричних заготовок зі сплаву АК6 в овальних калібрах за допомогою математичного моделювання та обробки отриманих даних через нелінійне оцінювання, дозволило встановити, що розмір відносного відхилення показника розширення при наявності в заготовці позаконтактних зон складає 10...60 % від загального розміру розширення. Удосконалено залежність з

розрахунку розширення, яка повинна враховувати коефіцієнт впливу позаконтактних зон разом із впливом геометричних розмірів позаконтактних зон та співвідношенням розмірів калібру і заготовки. Розроблено модель, що показує нелінійне зростання розміру розширення при збільшенні кривизни калібру та діаметру заготовок та проаналізовано напружено-деформований стан в заготовці на різних етапах проходження металом осередку деформування.

Розроблено залежності для визначення температурного коефіцієнту розширення, за урахуванням якого рекомендовано виконувати визначення розміру розширення при розрахунках процесу вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах, наближених до ізотермічних.

За використанням даних з теоретичних досліджень впливу форми позаконтактних зон та наближених до ізотермічних умов деформування на розміри фактичного осередку деформації, описано зміну його розмірів за різних умов деформування та рекомендовано ступені деформування за яких є найбільш рівномірним напружено-деформований стан по всьому об'єму заготовки.

У **четвертому розділі** показано етапи проведення експериментальних досліджень раціональних технологічних параметрів при виготовленні заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях. Запропоновано метод прогнозування дефектів при виготовленні поковок з алюмінієвих сплавів з попереднім вальцюванням та штампуванням у підготовчому рівчаку, що використовує результати з напружено-деформованого стану отримані через моделювання технологічного процесу за методом скінченних елементів. Надано рекомендації, за якими для існуючої методики з розрахунку підготовчих рівчаків, надається можливість з наближення розмірів вертикальних ребер та радіусів переходів до відповідних розмірів кінцевих рівчаків, яка дозволяє краще перерозподілити метал по підготовчому рівчаку, чим покращує заповнення кінцевого рівчака з тонкими та високими ребрами, підвищуючи якість штампувань, що отримуються.

Було зроблено експериментальні дослідження, що мали на мету перевірити можливість використання удосконалених рекомендацій з розрахунку розмірів підготовчих рівчаків та розроблених залежностей, з врахуванням впливу

позаконтактних зон на розширення при вальцюванні. Результати перевірки показали збільшення відповідності розмірів підготовчого рівчака до відповідних розмірів кінцевого, за повної відсутності дефектів в після закінчення операцій штампування, а також зменшення норми витрати вихідної заготовки.

Перевірка відповідності експериментальних даних до розрахованих за удосконаленими залежностями при розробці технології виготовлення деталі «Качалка», підтвердили адекватність використання удосконаленої моделі з розрахунку розширення при вальцюванні циліндричних заготовок на гладких валках.

**В п'ятому розділі** з урахуванням теоретичних та експериментальних досліджень автора, показано розроблений ним програмно-методичний комплекс системи автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання розрахунку калібрів та створення тривимірних моделей вальцювальних секторів. Показано загальний вигляд схеми автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання розроблено у вигляді структурно-функціональної діаграми, розкрито комплекс засобів забезпечення процесу автоматизації та показано її складові у вигляді загальних послідовних модулів. Розкрито математичну модель автоматизації технологічного процесу вальцювання, що включає в себе розрахунок систем калібрів за удосконаленими залежностями та побудову тривимірних моделей вальцювальних секторів, що реалізовано у вигляді параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів та вихідної заготовки. Підтверджено економічну ефективність провадження розробленого комплексу у виробництво.

Кожний розділ дисертаційної роботи закінчується висновками до нього. Також в роботі містяться загальні висновки до з виконаних завдань.

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

**Додатки** містять в собі довідникові дані з довідникової інформації та моделювання, а також алгоритми, що використовуються для автоматизації, та акти впровадження результатів роботи.

## **2. Актуальність теми дисертаційного дослідження**

Вдосконалення заготівельної фази виробничого процесу є одним із найважливіших резервів підвищення ефективності виробництва, максимальної економії матеріальних, трудових і енергетичних ресурсів. Саме для цього на виробництві потрібно намагатися створювати умови для максимального наближення форми і розмірів заготовки до форми і розмірів готових деталей, забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей та їх раціонального виконання, максимальної економії матеріальних, трудових і грошових ресурсів. Значний обсяг в номенклатурі штампованих заготовок займають деталі подовженої форми зі змінним поперечним перерізом уздовж осі (важелі, качалки, ручки, кронштейни і т. д.). Як загальні підготовчі операції перед штампуванням деталей подовженої форми з алюмінієвих сплавів, які широко використовуються в авіа- та автомобілебудуванні, застосовують операції протягування під час кування або висаджування головок на горизонтально-кувальних машинах, а також вальцювання на кувальних вальцях. Гаряче вальцювання використовується для отримання фасонних заготовок з площами поперечних перерізів, які максимально наближені до розмірів та форми штампованих поковок, що дозволяє знизити норму витрати металу, підвищити стійкість штампів, а також скоротити витрату штампової сталі та електроенергії на виконання операції штампування. Крім того, зменшується трудомісткість виготовлення штампованих поковок і підвищується норма виробітку. Проте, при вальцюванні спостерігається неповне охоплення периметру поперечного перерізу заготовки, тому її бічні ділянки не зазнають безпосереднього обтиснення. Це спричиняє виникнення позаконтактних зон, які значною мірою впливають на характер течії металу та нерівномірність напружено-деформованого стану в заготовці, що призводить до появи дефектів у штампованих виробах і зниження їх якості. Рівномірний процес деформування заготовки за відсутності зон з ускладненою деформацією забезпечить всебічну проробку структури та, як наслідок, зменшить різницю властивостей по об'єму заготовки. Тому, дослідження маловивченого механізму впливу позаконтактних зон на розширення при отриманні заготовок, що вальцюються, є актуальним завданням, зважаючи на необхідність його врахування при їх проектуванні, а також розрахунку і конструюванні калібрів та вальцювальних секторів.

З цієї точки зору, дисертація Чайки Д.С., удосконалення технологічних процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, яке б забезпечувало зниження нерівномірності деформації в осередку деформування, зниження зусиль деформування, покращення пластичності, а, відповідно, і підвищення якості виготовлених з них напівфабрикатів подовженої форми, є актуальною науково-технічною задачею.

**Зв'язок з державними науковими програмами, планами та темами:** дисертаційна робота виконувалася відповідно до «Стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету міністрів України від 27.12.2008р., № 1656 – р. та «Стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2022 року», схваленої розпорядженням Кабінету міністрів України від 10.05.2018р., № 429 – р.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації в роботі є цілком обґрунтованими як з наукової так і з практичної точки зору. Для отримання імітаційних та теоретичних результатів, використано програму яка надає достовірні дані з обробки тиском за використанням методу скінчених елементів. Достовірність статистичної обробки отриманих в роботі результатів підтверджено через використання для цього програми зі статистичної обробки даних Statistika.

Експериментальні дослідження та лабораторний аналіз виконувались на промисловому обладнанні авіаційного підприємства КиАЗ «Авіант». Перевірка вірності виконання математичних моделей, розроблених для удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, виконана через спеціальними експериментальними дослідженнями, які за регресійним та кореляційним аналізами підтвердили актуальність їх використання.

### **4 Наукова новизна отриманих результатів**

В дисертації містяться положення, що характеризуються наступною новизною:

1. Вперше встановлено, як результат експериментально-імітаційних досліджень, вплив позаконтактних зон на розміри розширення та фактичного осередку деформування, а також рівномірність розподілу напружено-деформованого стану в процесах гарячого вальцювання циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в овальних калібрах.

2. Аналітичним шляхом отримав подальший розвиток метод теоретичного дослідження опору деформування в осередку деформування при гарячому вальцюванні, який відрізняється від існуючих тим, що для розрахунку повного зусилля вальцювання для сплаву, який досліджується, використовується визначені дані з розміру середнього питомого зусилля для базового сплаву, а також співвідношення даних з відносного подовження, межі пластичності та міцності для базового та досліджуваного сплаву.

3. Удосконалено математичну модель опису кінцевого формозмінення заготовки при гарячому вальцюванні, яка, на відміну від існуючих, враховує вплив позаконтактних зон та температурного коефіцієнту при визначенні розміру розширення, що дає можливість зменшити градієнт нерівномірності деформації в осередку деформування заготовок, що вальцюються.

4. Отримав подальший розвиток метод оцінки деформівності металу при вальцюванні, який полягає у визначенні показників напруженого стану та використаного ресурсу пластичності в умовах гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, що дозволяє оцінювати можливість руйнування матеріалу в області поза-контактних зон.

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

Практична цінність роботи, що відображена в результатах роботи стосується розвитку обробки тиском та присутня у більшості її положень і роботи. В дисертаційній роботі розроблено декілька методів та рекомендації, що мають практичне значення для вирішення завдань з удосконалення процесу гарячого вальцювання на виробництві:



1. розроблено методику з розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу гарячого вальцювання із врахуванням впливу на розмір розширення позаконтактних зон та ізотермічних умов деформування при розрахунках геометричних параметрів калібру, використання якої дозволяє краще перерозподілити метал, зменшити нерівномірність деформації по об'єму заготовки та підвищити якість виготовлених з неї напівфабрикатів;

2. розроблено рекомендації, що полягають у визначенні розміру фактичного осередку деформування за використанням результатів математичного моделювання, та надають можливість визначення ступенів обтиску з меншим градієнтом нерівномірності при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів;

3. запропоновано методику прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок з попереднім вальцюванням заготовок із алюмінієвих сплавів;

4. надано рекомендації, за якими для існуючої методики з розрахунку підготовчих рівчаків, можливо наблизити розміри їх вертикальних ребер та радіусів переходів до відповідних розмірів кінцевих рівчаків, що покращує заповнення кінцевого рівчака з тонкими та високими ребрами, підвищуючи якість штампувань, що отримуються;

5. розроблено програмно-методичний комплекс автоматизації процесу побудови епюри перерізів штампованої поковки, розрахунку технологічних параметрів вальцювальних калібрів і побудови тривимірних моделей вальцювальних секторів з урахуванням впливу позаконтактних зон і ізотермічних умов деформування на процес вальцювання.

Основні практичні результати роботи були запропоновані для використання на ПАТ «Енергомашспецсталь» як рекомендації для виконання моделювання операцій обробки тиском складних заготовок (м. Краматорськ) з метою розробки методів для щодо поліпшення процесу формоутворення виробів. На ПП НВЦ «Ухналь» (м. Київ) використовується автоматизована система з розрахунку калібрів для вальцювання, що дозволило автоматизувати розробку технологічного процесу вальцювання.

Окремі результати дисертаційної роботи також використовувались при підготовці навчального посібника авторів С. О. Скрябіна, Д. С. Чайки та О. Є. Маркова «Методика автоматизованого проектування технологічного процесу та 3-D моделей калібрів при вальцюванні» та використовуються в навчальному процесі на кафедрах «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії при викладанні дисципліни «Гаряче об'ємне штампування».

Практичні результати можуть застосовуватись в якості підґрунтя для наукових розробок в сфері обробки тиском та промислових досліджень.

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

Результати дисертаційної роботи можуть бути ефективно використані на підприємствах авіаційної, автомобільної та інших підприємствах України, де є виробництво виробів вальцюванням заготовок з алюмінієвих сплавів. Також результати рекомендується використовувати в науково-дослідних інститутах України, в яких проводяться розробки в області штампувального виробництва.

В вищих навчальних закладах України результати можуть бути використані при підготовці фахівців в області обробки металів тиском.

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

Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 21 друкованій науковій праці, що повністю відображають її зміст. Серед них: 16 статей опубліковано в журналах і збірниках наукових праць, з яких одна стаття у зарубіжному фаховому виданні (РФ), 15 статей у наукових фахових виданнях України, три тези доповідей на міжнародних конференціях, а також теза на науково-технічній конференції. За використанням основних матеріалів досліджень, було опубліковано навчальний посібнику.

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

Результати дисертації доповідалися на 12 міжнародних і галузевих науково-

технічних та науково-практичних конференціях та семінарах. Викладення складових частин наукової роботи та їх обговорення зі спеціалістами з обробки металів тиском було виконано на наукових семінарах кафедр провідних вищих навчальних закладів України (КПІ м. Київ, ВНАУ та ВНТУ м. Вінниця).

## 10. Зауваження по роботі

1. Відсутня чітка постановка задачі при моделюванні процесу вальцювання МСЕ, зокрема немає інформації щодо кількості елементів, їх мінімальних розмірів, визначення граничних умов, трудомісткості та кількості окремих розрахунків (час обрахунку) тощо.

2. Незрозуміло, в який спосіб отримано залежності (зокрема, залежність (2.41), стор. 107), для визначення повного зусилля вальцювання та відповідних коригувальних коефіцієнтів для вальцювання заготовок з різних матеріалів. Є посилання на роботи попередників, а проведення власних досліджень не містить достатньої інформації, щоб зробити висновок про його коректність та фізичну змістовність отриманої залежності.

3. Визначення показника напруженого стану через вимірювання розмірів сіток кінцевих елементів (автор називає її Ланганжевою) є непотрібним, адже цей параметр можна визначити через компоненти НДС, що дає програма МСЕ. При такому підході вноситься додаткова значна похибка, до тієї, що дають чисельні розрахунки. А от проведення експерименту методом сіток відсутнє, що могло б виправдати використану автором методику.

4. Низка апроксимацій даних, отриманих на основі МСЕ, здійснена незручними функціями, в яких коефіцієнти апроксимації не містять ясного фізичного змісту (наприклад, формули (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) та інші). Варто було б застосувати більш прості функції, із фізично змістовними коефіцієнтами щодо явищ процесу вальцювання.

5. Робота пересичена різноманітними коефіцієнтами  $K$  (впливу, розширення, різних деформації тощо) якими автор оперує чи досліджує їх. При цьому низка коефіцієнтів в явному вигляді не розшифрована (наприклад, коефіцієнт  $K_{розш}^{об}$  в формулі (2.19) або (1) автореферату)), що в результаті призводить до складності сприйняття змісту та аналізу відповідних залежностей.

Фізичний зміст низки коефіцієнтів не розритий (наприклад,  $q$  в (2.22), стор. 88).

6. Чисельні шуми необхідно згладжувати, інакше вони надзвичайно сильно впливають на знак похідних, що вносить в розрахунок використаного ресурсу пластичності похибку невизначеної величини. Так, шляхи деформування, що наведені на рис. 2.20 обраховані без фільтрації „чисельних шумів”, пов’язаних із розрахунком за МСЕ та вимірюванням сітки кінцевих елементів.

7. В дисертації є зайвим висвітлення концептуальних положень МСЕ та особливостей його реалізації в QForm3D. Висвітлення рівнянь регресійного аналізу також можна було б опустити або навести їх в додатках. Теж стосується питань розрахунку економічної ефективності, статистичної перевірки отриманих моделей на адекватність тощо. Така інформація є допоміжною і не відбиває наукового чи практичного доробку автора.

8. В дисертації присутня невдала термінологія:

„градієнт нерівномірності (деформованого стану)” – треба було вжити термін нерівномірність деформації, бо градієнти в роботі взагалі не розглядаються;

„температурний коефіцієнт розширення” – це фізична константа матеріалу, а мається на увазі коефіцієнт, що враховує розширення заготовки в ізотермічних умовах;

„опір деформації” – цим терміном підписані епюри, які скоріш за все зображають розподіл напружень за Мізесом (рис. 3.5 та інші);

„негативне розширення” – краще зворотне чи ретроградне розширення;

„поправний коефіцієнт” – має бути поправочний коефіцієнт;

„лінійний критерій”, „нелінійний критерій” – невдале скорочення, краще – критерій, що враховує лінійне чи нелінійне накопичення пошкоджень;

„нерівномірність розподілу макроструктури” – незрозуміло що мається на увазі, оскільки макроструктура не є кількісним показником;

напруга – має бути напруження.

## **12. Ідентичність автореферату змісту дисертації**

Автореферат є повністю 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 Чайки Д. С. «Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів із забезпеченням їх раціональних технологічних параметрів» є завершеною науковою працею, що вирішує актуальну науково-технічну проблему в напрямку розвитку ковальсько-штампувального виробництва для удосконалення процесів гарячого 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 висуваються до кандидатських дисертацій. Зміст роботи відповідає та напрямки дослідження відповідають паспорту спеціальності. Вважаю, що автор дисертації **Чайка Дмитро Сергійович** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском».

Офіційний опонент,  
професор кафедри опору матеріалів та прикладної механіки,  
директор Інституту магістратури, аспірантури та докторантури,  
Вінницький національний технічний університет,  
доктор технічних наук, професор



Грушко О. В.

