

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ЗЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

ТОВ «Ай Ті Артіль», м. Київ

**Анотація.** В роботі розглянуто актуальність науково-технічної задачі удосконалення технологічних процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів. Визначені потрібні для цього дослідження мета та завдання. Описані методи, що використовуються для проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

За підсумками виконання роботи показані наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, на основі чого наведені загальні висновки.

**Ключові слова:** вальцювання, штампування, розширення, позаконтактні зони, метод скінчених елементів, апроксимація, деформовність, заготовка

**Abstract.** The paper considers the relevance of the scientific and technical problem of improving the technological processes of hot rolling of billets from aluminum alloys. Required for researches targets and tasks are determined. Described methods for theoretical and experimental researches.

According to the results of the work, the scientific novelty and practical value of obtained results are shown, on the basis of which general conclusions are given.

**Keywords:** rolling, stamping, broadening, non-contact zones, finite element method, approximation, deformability, workpiece

На сучасному етапі розвитку машинобудування одним із найважливіших резервів підвищення ефективності виробництва, максимальної економії матеріальних, трудових і енергетичних ресурсів, є вдосконалення заготівельної фази виробничого процесу. Основне завдання цієї стадії полягає в максимальному наближенні 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.

У номенклатурі штампованих заготовок значний обсяг займають деталі подовженої форми зі змінним поперечним перерізом уздовж осі (важелі, качалки, ручки, кронштейни і т. д.). Як основні 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 ГKM. Недоліком першої є недостатня продуктивність, висока трудомісткість, підвищена витрата металу, низька якість поверхні, а другої – занадто висока вірогідність виникнення задирок на торцях та по лінії роз'єму матриці, а також утворення гофрованої поверхні в місцях переходу від висадженої головки до вихідного перерізу прутка. Це вимагає передбачити в технологічному процесі операції зачищення, що значно подовжує цикл виготовлення і збільшує вартість деталі. Натомість, операція гарячого вальцювання є більш досконалим способом підготування заготовок під наступне штампування на машинобудівних підприємствах.

Технологія гарячої вальцювання застосовується для отримання фасонних заготовок з площами поперечних перерізів, які максимально наближені до розмірів і форми штампованих поковок, що дозволяє знизити норму витрати металу, підвищити стійкість штампів і 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 піддаються безпосередньому обтисненню. 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 виробках і зниження їх довговічності. Цій проблемі приділено значну увагу у працях Скрябіна С.А., Целікова А.І, Смірнова В.С, Іванова І.І., Пушкарьова В.Ф, Матурина Д.А, Нікітина С.Г. та інших. Тому, дослідження маловивченого механізму впливу позаконтактних зон на розширення при отриманні вальцьованих

заготовок є актуальним завданням, зважаючи на необхідність його врахування при їх проектуванні, а також розрахунку і конструюванні калібрів та вальцювальних секторів [1].

Отже, удосконалення технологічних процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, яке б забезпечувало зниження нерівномірності деформації в осередку деформування та підвищення довговічності виготовлених з них виробів деталей подовженої форми, є актуальною науково-технічною задачею.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення довговічності виробів подовженої форми, виготовлених із заготовок з алюмінієвих сплавів, на основі визначення раціональних конструктивних, геометричних та фізико-механічних параметрів процесів формозміни та їх комплексного впливу на технологічні характеристики деталей.

Для досягнення зазначеної мети, необхідно розв'язати такі задачі:

1. Виконати аналіз існуючих методів та способів визначення розширення в осередку деформації при вальцюванні, а також впливу на нього наявності в заготовці позаконтактних зон і ізотермічних умов деформування, та зробити вибір програмного забезпечення для моделювання та аналізу процесу деформування.

2. Розробити загальну методику для теоретичного дослідження параметрів процесів вальцювання та визначити технологічні можливості деформування ПЗ в умовах гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів.

3. Уточнити математичні моделі визначення розмірів розширення та фактичного осередку деформування з урахуванням геометричних форм калібрів і заготовок що вальцюються, на основі теоретичного аналізу нерівномірності деформації та впливу позаконтактних зон при вальцюванні заготовок в гладких валках і овальних калібрах у звичайних умовах та наближених до ізотермічного деформування [2, 3].

4. Встановити метод прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок з алюмінієвих сплавів з попереднім вальцюванням на основі результатів моделювання технологічного процесу та надати практичні рекомендації для забезпечення його раціональних технологічних параметрів.

5. Провести експериментальні дослідження технологічних параметрів вальцювання, які встановлені за отриманими аналітичними залежностями при виготовленні різних груп типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються для операції штампування на кувальних вальцях.

6. Розробити програмне забезпечення для розрахунку параметрів технологічного процесу вальцювання заготовок деформування і створення тривимірних моделей вальцювальних секторів із урахуванням впливу ПЗ та умов наближених до ізотермічного.

**Методи дослідження.** В основу теоретичних досліджень покладено методи математичної і прикладної теорії пластичності, метод скінчених елементів (МСЕ), який реалізовано в спеціалізованому програмному комплексі QForm3D, методи векторної графіки і математичної статистики [2].

Експериментальні дослідження процесу проводилися з використанням методів фізичного моделювання і тензометрії, оптичної і електронної мікроскопії. Для оцінки точності отриманих результатів теоретичних і експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше встановлено вплив позаконтактних зон циліндричних заготовок на геометричні характеристики процесу гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в овальних калібрах [4].

2. Отримав подальший розвиток метод теоретичного дослідження опору деформування в осередку деформації при гарячому об'ємному деформуванні з визначенням величини середнього питомого зусилля для випадків вальцювання заготовок з різних марок алюмінієвих сплавів [5, 6].

3. Удосконалено математичну модель опису кінцевого формозмінення при гарячому вальцюванні, що полягає у розрахунку ступеня впливу позаконтактних зон на геометричні параметри розширення і отриманні залежностей для визначення величини розширення з урахуванням впливу позаконтактних зон і температурного коефіцієнта розширення для зниження нерівномірності деформації в осередку деформування [7, 8]; розроблений метод для теоретичного визначення розміру фактичного осередку деформування при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів [9, 10].

4. Отримав подальший розвиток метод оцінки деформовності металу на основі визначення показників напруженого стану та використаного ресурсу пластичності в умовах гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів [11].

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

1. Розроблена методика розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу гарячого вальцювання із врахуванням впливу на розмір розширення позаконтактних зон та ізотермічних умов деформування при розрахунках геометричних параметрів калібру, яка дозволяє краще перерозподілити метал та зменшити нерівномірність деформації по об'єму заготовки [12, 13].

2. На основі визначення напружено-деформованого стану та використаного ресурсу пластичності надані рекомендації з прогнозування технологічних можливостей деформування в умовах гарячого вальцювання заготовок.

3. Запропоновано методику прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок з попереднім вальцюванням заготовок із алюмінієвих сплавів [14].

4. Розроблено програмно-методичний комплекс автоматизації процесу побудови епюри перерізів штапованої поковки, розрахунку технологічних параметрів вальцювальних калібрів і побудови тривимірних моделей вальцювальних секторів з урахуванням впливу позаконтактних зон і ізотермічних умов деформування на процес вальцювання [15-17].

**Висновки.** У роботі вирішена науково-технічне завдання щодо підвищення довговічності виробів подовженої форми із алюмінієвих сплавів на основі визначення раціональних конструктивних, геометричних та фізико-механічних параметрів процесів гарячого вальцювання та їх комплексного впливу на технологічні характеристики виробів за допомогою дослідження механізму впливу позаконтактних зон заготовок, що вальцюються з алюмінієвих сплавів та наближених до ізотермічних умов деформування на розширення. За результатами досліджень були зроблені наступні висновки:

1. На основі аналізу сучасного стану методів по визначенню впливу різних технологічних параметрів на розширення при вальцюванні, було визначено наявність значних відхилень, які дають результати експериментів, розрахованих за раніше розробленими формулами розширення. Істотною причиною невідповідності результатів, є відсутність в методах розрахунків розширень врахування впливу, що надають позаконтактні зони та наближені до ізотермічних умови деформування. Це відбувається через те, що основна маса дослідників враховує вплив позаконтактних зон тільки при оцінці енергосилових параметрів, що не може бути використано в розрахунках геометричних розмірів вальцюваних заготовок. А для наближених до ізотермічних умов деформування не було розраховано коефіцієнта, який можна використовувати в промислових розрахунках.

2. Розроблено методику розрахунку розширення, геометричних параметрів калібрів, коефіцієнту впливу позаконтактних зон та температурного коефіцієнту розширення за використанням апроксимаційних моделей при прокатці заготовок в гладких валках, а також вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах.

Оцінювання деформовності при гарячому вальцюванні щодо використаного ресурсу пластичності за критерієм Огороднікова, підтвердило що у вальцюваних заготовках відбувається заліковування дефектів у діапазоні деформацій  $\varepsilon_{np} = 0,4...0,5$  при кривизні траєкторій деформування

$d^2\eta/d\varepsilon_i^2 > 2$ , яка властива для області позаконтактних зон.

Визначення розрахункових розмірів фактичного осередку деформування при вальцюванні, відбувається за обрахунком величини поля швидкостей деформації, яке отримується у вигляді ізоліній що змінюються від 0 до 11  $s^{-1}$  в меридіональному та горизонтальному перерізах заготовки, деформування якої моделюється у програмі QForm3D.

Для обчислень повного зусилля вальцювання та автоматизованому вибору за ним моделі кувальних вальців, визначена величина поправочного коефіцієнта відносно даних для сплаву АК6 та розраховано залежності середнього питомого зусилля для сплавів АК8, АМГ і АМЦ при температурах  $t = 420^\circ C$  та  $470^\circ C$ .

3. Комп'ютерне моделювання прокатки прямокутних заготовок з позаконтактними зонами різної форми показало, що найбільше розширення спостерігається в тих заготовках, обсяг ПЗ яких рівномірно розподілений по всій ширині ПЗ (прямокутні) та перевищує в 2...4 рази розширення при найбільш нерівномірній трикутній ПЗ. Зі зростанням площі перерізу ПЗ з 50 до 200  $mm^2$ , зростає ступінь деформації, при якій спостерігається утягнення з 10 до 40 % для трикутних та з 20 до 63 % для прямокутних ПЗ, після чого при великих обтисненнях, розширення центральних зон починає перевищувати утягнення і загальна ширина зразка збільшується по відношенню до вихідної ширини.

Найкращі умови для деформування будуть при ступенях деформування 20...40 %, коли площа фактичного осередку деформування майже в 1,5...2 рази більше геометричного.

Виявлено, що для операцій по вальцюванню заготовок циліндричного перерізу в гладких валках при ступенях деформації не вище 40...50% - наявність позаконтактних зон погіршує рівномірність напружено-деформованого стану в осередку деформування, що ускладнює течію металу в поперечному напрямку. Натомість, при ступенях деформації від 40 до 70%, коли в заготовках без ПЗ утворюється позаконтактна зона, що викликає появу поперечних сил зчеплення - кращі умови прокатування будуть у заготовках з ПЗ, які будуть гальмувати поздовжню деформацію і сприяти поперечній витяжці. Дослідження розмірів фактичного осередку деформування виявило що в заготовках з ПЗ, до ступені обтиску 23% відсутня позаконтактна зона, це говорить про найкращі умови деформування саме в цьому проміжку.

Вимірювання розмірів розширення після комп'ютерного моделювання, показали його зростання зі збільшенням кривизни калібру і діаметру заготовок при вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках. Встановлено, що в рекомендованих для вальцювання за схемою круг-овал інтервалах  $1,25 \leq \lambda \leq 1,8$ , коефіцієнт впливу ПЗ на розширення ( $K_{\text{ущ.ов.}}^{B3}$ ) становить від 10 до 60% величини загального коефіцієнта нерівномірності деформації. Удосконалена залежність для розрахунку розміру розширення з урахуванням коефіцієнта впливу ПЗ, на який впливають фактори зміни геометричних розмірів ПЗ та співвідношення розмірів калібру і заготовки, що вальцюється в ньому. Відносне відхилення величини розширення при розрахунку за удосконаленою формулою перевищує статистичну похибку в 10% при деформаціях з коефіцієнтом витяжки  $\lambda < 1,45$ .

Для випадків вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах, наближених до ізотермічних, розроблені усереднені залежності для практичного застосування у виробництві по отриманню температурного коефіцієнта розширення, за якими рекомендовано проводити визначення величини розширення в інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів 250...350°C. Моделювання показало зниження нерівномірності розподілу температури між центральними та позаконтактними зонами на 5...20°C, що дає вирівнювання напружено-деформованого стану по всьому об'єму заготовки та збільшення розмірів фактичного осередку деформування на 3...5%. При вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках найкращі умови деформування спостерігаються при ступенях деформації 10...40% за найбільшого розміру фактичного осередку деформування.

4. Запропоновано методику прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок із алюмінієвих сплавів в остаточному ривчаку після декількох операцій вальцювання та деформування в підготовчому ривчаку. Факт утворення дефекту при перевищенні граничних умов побудування розмірів підготовчого ривчака, було перевірено на партії експериментальних деталей та показано, що при виконанні методики можна отримувати на 95% бездефектне штампування. За методикою, надані рекомендації для забезпечення раціональних технологічних параметрів деформуючого інструменту та зниженню вимог до геометрії підготовчого ривчака.

5. Експериментальна перевірка впливу технологічних параметрів вальцювання на розширення та геометричні розміри деформуючого інструменту при виготовленні невеликих партій (15-20 штук) виробів з різних груп типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях, показала правомірність використання удосконалених аналітичних залежностей. Це забезпечує більш глибоке проникнення деформації в центральні зони заготовки, що вальцюється, що дозволяє краще перерозподілити метал в калібрі, тим самим більш точно заповнювати металом підготовчі ривчаки. Штампування в остаточному ривчаку у досліджуваній партії було виконане на 100% без наявності дефектів, що є на 10% вищим за попередні показники, та пройшло перевірку на відповідність механічних властивостей вальцюваних заготовок і виготовлених з них штампвок вимогам технічної документації: межа міцності  $\sigma_B = 390 \dots 415$  МПа; відносне подовження  $\delta = 16 \dots 19$  %. Для дослідженої партії були зменшені норма витрати матеріалу вихідної заготовки на 11%, час технологічної підготовки процесу на 55% та собівартість виготовлення штампувальних поковок на 8%.

6. Для впровадження результатів дослідження в навчальний і виробничий процеси, розроблено програмно-методичний комплекс автоматизованого розрахунку калібрів і створення тривимірних моделей вальцювальних секторів з урахуванням рекомендацій по забезпеченню раціональних технологічних параметрів. Результати роботи комплексу включають наступні етапи: отримання значень площ поперечних перерізів штампваної поковки; визначення параметрів вальцювальної заготовки; визначення числа переходів і вибір системи калібрів; розрахунок системи калібрів;

побудова параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів і вихідної заготовки в САД-системі.

Основні практичні результати роботи були передані до освоєння на ПАТ ЕМСС та ПП НВЦ «Ухналь». Результати теоретичних і експериментальних досліджень і відповідні програми, впроваджені в навчальний процес у вигляді навчального посібника та використовуються студентами спеціальностей «Обробка металів тиском» і «Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування» (ДДМА) при вивченні дисципліни «Гаряче об'ємне штампування».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. С. А. Скрябин. Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах. Винница, Украина: О. Власюк, 2007.
2. С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние формы и размеров внеконтактных зон вальцуемых заготовок на уширение», Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение, № 50, с. 192 – 199, 2007.
3. С. А. Скрябин, В. Л. Калужный и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках», Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, № 3Е (14), с. 47 – 55, 2008.
4. С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах», Научный вестник ДГМА, № 2 (14Е), с. 103 – 115, 2014.
5. С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка и И. А. Бубновская, «Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок», Збірник наукових праць ВНАУ. Серія «Технічні науки», -№ 6, с. 104 – 110, 2011.
6. С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок из сплавов АК6, АК8, АМГ и АМЦ», Научный вестник ДГМА, № 1 (9Е), с. 176 – 185, 2012.
7. С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Исследование методов аппроксимации зависимостей коэффициентов уширения и опережения при вальцовке в калибрах», Сборник научных трудов «Обработка материалов давлением», № 3 (36), с. 64 – 67, 2013.
8. С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Определение температурного коэффициента уширения при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в условиях приближенных к изотермическим», Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. Краматорск, Украина: ДГМА, №2 (39), с. 180 – 187, 2014.
9. С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон вальцуемых заготовок на размеры фактического очага деформации», Сборник научных трудов «Обработка металлов давлением», № 2 (21), с. 220 – 226, 2008.
10. С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Исследование размера фактического очага деформации при вальцовке заготовок в условиях изотермического деформирования», Сборник научных трудов «Обработка металлов давлением», № 3 (24), с. 25 – 30, 2010.
11. Д. С. Чайка, «Определение показателей пластичности вальцуемых заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах», Техніка, енергетика, транспорт АПК, № 1 (100), с. 158 – 165, 2018.
12. С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок удлинённой формы из алюминиевых сплавов», Сборник научных трудов «Обработка металлов давлением», № 1 (26), с. 134 – 138, 2011.
13. С. А. Скрябин, И. В. Гунько, И. А. Бубновская и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок из алюминиевых сплавов первой группы классификатора», Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением, № 8, с. 18 – 20, 2011.
14. С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок удлинённой формы из алюминиевых сплавов», Сборник научных трудов «Обработка металлов давлением», № 1 (26), с. 134 – 138, 2011.
15. С. А. Скрябин, В. Н. Полохов, Д. С. Чайка и Л. В. Швец, «Автоматизация расчета калибров для вальцовки под штамповку», Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», № 50, с. 59 – 69, 2007.
16. Д. С. Чайка, А. Ф. Тарасов, А. А. Сидоров и М. А. Винников, «Автоматизация разработки чертежа вальцованной заготовки», есурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні, збірник наукових трудов, Луганськ, с. 315 – 323, 2011.
17. С. А. Скрябин, Д. С. Чайка, О. Е. Марков, С. А. Методика автоматизированного проектирования технологического процесса и 3D-моделей для вальцовки: учебное пособие для студентов всех форм обучения специальностей «Обработка металлов давлением» и «Оборудование и технологии пластического формирования конструкций машиностроения» по дисциплине «Горячая объемная штамповка» и «Ковка и горячая штамповка». Краматорск, Украина: ДГМА, 2015.

Відомості про авторів: *Чайка Дмитро Сергійович, інженер, ТОВ «Ай Ті Артіль», м. Київ, e-mail: [chaikads82@gmail.com](mailto:chaikads82@gmail.com)*

Науковий керівник: **Скрябін С.О.**, д.т.н., професор.