

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ЧАЙКА ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.7.016.2

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ
ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЇХ
РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Скрябін Семен Олександрович

Вінницький національний аграрний університет,
професор кафедри машин та обладнання
сільськогосподарського виробництва.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Грушко Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри опору матеріалів та прикладної
механіки;

кандидат технічних наук
Шлик Сергій Вікторович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
доцент кафедри технології машинобудування.

Захист відбудеться « 12 » грудня 2019 р. о 13.00 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: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «08» листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. І. Сухоруков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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. Загальне 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 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. 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 гарячого вальцювання використовується 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 зазнають безпосереднього обтиснення. Це спричиняє виникнення позаконтактних зон (ПЗ), які значною мірою впливають на характер течії металу та градієнт нерівномірності 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. Цій проблемі приділено значну увагу у працях І. І. Іванова, Д. А. Матуріна, С. Г. Нікітіна, В. Ф. Пушкарьова, С. О. Скрябіна, В. С. Смірнова, А. І. Целікова та ін. 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.

Отже, удосконалення технологічних процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, яке б забезпечувало зниження градієнту нерівномірності деформації в осередку деформування (ОД), зниження зусиль деформування, покращення пластичності, а, відповідно, і підвищення якості виготовлених з них напівфабрикатів подовженої форми, є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, 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.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення якості виробів, виготовлених із заготовок з алюмінієвих сплавів, на основі визначення комплексного впливу раціональних конструктивних, геометричних та фізико-механічних параметрів процесів формозміни заготовок на експлуатаційні характеристики деталей.

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

– виконати аналіз існуючих методів та способів визначення розширення заготовок в осередку деформування 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;

– розробити загальну методикку для теоретичного дослідження параметрів процесів вальцювання та визначити технологічні можливості деформування позаконтактної зони в умовах гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів;

– розробити математичні моделі з визначення розмірів розширення та фактичного осередку деформування з урахуванням геометричних форм калібрів і заготовок, що вальцюються, на підставі 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;

– встановити метод прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок з алюмінієвих сплавів з попереднім вальцюванням на підставі результатів моделювання технологічного процесу та надати практичні рекомендації для забезпечення якості штампувань, що отримуються;

– провести експериментальні дослідження технологічних режимів 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;

– виконати узагальнення технічних рішень та розробити програмне забезпечення для розрахунку параметрів технологічного процесу вальцювання заготовок за удосконаленою методикою із урахуванням впливу позаконтактних зон та умов, наближених до ізотермічного деформування. Впровадити технологічні рекомендації на підприємствах машинобудівної галузі.

Об'єкт дослідження. Процеси гарячого вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів.

Предмет дослідження. Закономірності пластичного деформування заготовок з алюмінієвих сплавів при гарячому вальцюванні із забезпеченням раціональних технологічних параметрів процесу формозміни.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено методи математичної і прикладної теорії пластичності, МСЕ, який реалізовано в спеціалізованому програмному комплексі QForm3D, методи векторної графіки і математичної статистики.

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:

- 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;

- 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;

- 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;

- 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 позаконтактних зон.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено методика 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;

- 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;

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

– 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;

– 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 у вигляді рекомендацій з моделювання операцій обробки тиском складних заготовок були запропоновані для використання на ПАТ «Енергомашспецсталь» (м. Краматорськ) для удосконалення технологій деформування та розробки заходів щодо поліпшення процесу формоутворення виробів.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в тому, що автором поставлено наукові задачі, виконано розробку основних теоретичних положень, математичних моделей, сформульовані висновки та розроблені рекомендації процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів із забезпеченням їх раціональних технологічних параметрів. Автор планував та проводив експериментальні дослідження, обробку та аналіз отриманих результатів, а також брав участь у впровадженні результатів роботи на виробництві. Внесок здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами: [1], [2] – обробка та аналіз результатів досліджень; [3], [10] – розробка елементів концепції автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання для розрахунків технологічних переходів та геометрії інструменту гарячого вальцювання; [4], [5] – моделювання процесу вальцювання та аналіз впливу поза контактних зон на розширення; [6] – розробка методики теоретичного визначення розміру фактичного осередку деформування; [7] – моделювання процесу вальцювання та виконання розрахунків підготовчого рівчака; [8], [9] – виконання випробувань з вальцювання та кування партії заготовок та обробка експериментальних даних; [11], [12] – визначення можливостей теоретичного дослідження опору деформування в осередку деформації та розробка методу з розрахунку розміру середнього питомого зусилля при; [13] – проведення апроксимації експериментальних залежностей для визначення коефіцієнтів нерівномірності деформації за допомогою нелінійного оцінювання; [14], [15] – виконання моделювання та отримання формул нелінійної залежності коефіцієнтів, що характеризують вплив на розширення параметрів вальцювання; [17] – розкриття факторів, що впливають на розширення та випередження гарячому вальцюванні; [21] – викладення методики розробки та аналізу технології автоматизованого проектування процесу гарячого вальцювання заготовок.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких наукових конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція (МНТК) «Досягнення і перспективи розвитку процесів і машин обробки тиском в металургії і машинобудуванні»(м. Краматорськ, 2009 р.); МНТК «Нові наукомісткі технології, устаткування і оснащення для обробки матеріалів тиском»(м. Краматорськ, 2010 р.); МНТК «Нові наукомісткі технології отримання матеріалів і виробів підвищеної якості методами обробки тиском»(м. Краматорськ, 2011 р.); III науково-технічної конференції молодих фахівців «Енергомашспецсталь 2011» (м. Краматорськ, 2011 р.); XV – XVIII МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2012 – 2015 рр.); IV МНТК «Земля України – потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави» (м. Вінниця, 2014 р.); Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція «Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів» (м. Вінниця, 2019 р.); I МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (м. Вінниця, 2019 р.); семінар «Моделювання процесів об'ємного штампування для автомобільної промисловості» і «Підвищення кваліфікації користувачів. Нові можливості QForm 5.0», ВАТ НВО «ЦНИИТМАШ» – ТОВ «Кванторформ» (м. Москва, 2008 р.); наукових семінарах з ОМТ ВНАУ (Вінниця, 2010 – 2019) і ВНТУ (2016, 2018 рр.)

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 21 друкованій науковій праці, зокрема: 16 статей опубліковано в журналах і збірниках наукових праць, з них одна стаття у зарубіжному виданні, 15 статей у наукових фахових виданнях України, троє тез доповідей на міжнародних конференціях та одні тези на науково-технічній конференції. Матеріали досліджень і розробок опубліковано також в одному навчальному посібнику.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і восьми додатків. Повний обсяг роботи становить 244 сторінки, в тому числі 131 сторінки основного тексту, 107 малюнків і 17 таблиць. Список використаних джерел з 170 найменувань на 19 сторінках, додатки містять 25 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано важливість та актуальність теми, сформульовані мета і задачі досліджень, надана характеристика предмету та об'єкту, показано зв'язок роботи з науковими програмами. Виділено особистий внесок здобувача, викладено основні положення та результати, що були досягнуті під час виконання дисертаційної роботи, наведено характеристику наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів, а також їх впровадження.

В першому розділі встановлено актуальність дослідження маловідходних технологічних процесів штампування та вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів та визначено, що течія металу в поперечному напрямку під час вальцювання, з появою поперечних сил тертя, спричиняє явище розширення, яке має як негативний, так і позитивний вплив на процес формоутворення. Показано, що розширення виникає як наслідок закону найменшого опору, що визначає інтенсивність витікання ме-

талу в сторони вільних поверхонь з осередку деформування за рахунок вертикального обтиску та є функцією багатьох факторів.

Було проведено аналітичний огляд праць, що стосуються розвитку теорії розширення, за останнім етапом якої відомо, що розширення залежить від протяжності зони випередження, ступеня деформації, ширини і натягу смуги металу, що деформується. Також було відзначено, що формули для аналітичного визначення розширення на гладкій бочці, повинні враховувати наступні параметри: зміщений об'єм, який йде на розширення; вплив кривизни валків, форми та зовнішніх частин осередку деформування. Значний вклад у вирішення цих питань надали: Б. П. Бахтінов, А. Ф. Головін, А. І. Грішков, С. І. Губкін, Л. Жез, Э. Зібель, В. І. Зюзін, Р. А. Машковцев, М. С. Мутьєв, М. М. Павлов, В. Тафель, А. П. Чекмарєв та А. І. Целіков, за залежністю якого С. О. Скрябіним була розроблена регресійна модель, що визначає показник лінійного розширення, та є найбільш наближеною до експериментальних даних. Під час вальцювання циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках, зі збільшенням ступеня деформації чи діаметру валків або зі зменшенням діаметру прутка, за інших рівних умов, значення показника розширення та відносного розширення – збільшуються.

Методи розрахунку формозміни металу під час прокатування в калібрах поділяють на наступні групи: емпіричні; відповідної і наведеної полоси; метод описаних прямокутників, а також методи, що засновані на використанні законів механіки деформованого тіла. Застосування останнього методу в роботі, базується на використанні розробленої С. О. Скрябіним методики розрахунку калібрів, що враховує нерівномірність розподілу поздовжньої та поперечної деформацій при об'ємному деформуванні в залежності від співвідношення геометричних форм калібру та заготовки, що вальцюються. Розширення розглядається пропорційним обтисненню, дузі захоплення (катаючий діаметр відповідного калібру) та співвідношенню геометричних форм калібру і заготовки (d), що вальцюються в ньому. Для найбільш розповсюдженого випадку вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах, розширення розраховується за залежністю:

$$\Delta b = K_{розш}^{ов} \cdot \sqrt{(d - h_{ов}) \cdot 0,5 \cdot D_{\kappa}^{ов}} \cdot \frac{d - h_{ов}}{d}, \quad (1)$$

де $K_{розш}^{ов}$ – коефіцієнт, що враховує вплив на розширення нерівномірності деформації по ширині і висоті заготовки при вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах; $h_{ов}$ – висота овального калібру; $D_{\kappa}^{ов} = A - (2/3) \cdot h_{ов}$ – катаючий діаметр овального калібру, де A – міжцентрова відстань валків; $(d - h_{ов})/d$ – ступінь деформування заготовки.

Під час вальцювання заготовок круглого перерізу в гладких валках або в калібрах спостерігається неповне охоплення периметру поперечного перерізу заготовки. Контактна поверхня з інструментом зазвичай є трохи меншою за ширину заготовки, що прокочується, тому бічні ділянки поперечного перерізу заготовки безпосередньому обтисненню не піддаються. Ці бічні об'єми є позаконтактними зонами, що мають значний вплив на характер течії металу в осередку деформування, кінематику та динаміку процесу вальцювання. Розширення відбувається внаслідок поперечної

течії глибинних і незначно поверхневих шарів, а розширення контактних ділянок зразків, що мають ПЗ, при інших рівних умовах значно вище розширення контактних ділянок, які не мають ПЗ. Однією з причин, за якою розрахунок розширення дає значні відхилення, є відсутність в формулах для розрахунку розширення врахування впливу на нього позаконтактних зон.

На даний час, в техніці був досліджений лише той коефіцієнт впливу позаконтактних зон (n_c''), який використовується при оцінюванні енергосилових параметрів прокатування (сила прокатування, базисний тиск), що викликає необхідність проведення досліджень щодо впливу форми та розмірів позаконтактних зон на показники розширення при проектуванні заготовок, що вальцюються, а також для розрахунку і конструювання калібрів та вальцювальних секторів.

За даними огляду різних методів дослідження осередку деформування при вальцюванні, встановлено, що його фактичні розміри перевищують геометричні в 1,2...1,9 рази, що є важливим при розкритті картини переміщень металу в області показонтактних зон, визначення нерівномірності деформації та області можливої концентрації напружень.

Встановлено, що для операцій вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах наближених до ізотермічного деформування, коли температура нагріву інструменту та середовища в зоні деформування сягає 250...350 °С, нагрів призводить до зниження нерівномірності деформації в осередку деформування. Це відбувається через те, що розмір розширення та випередження за постійного ступеня обтиску практично не змінюється, а зміна ступенів деформації призводить до зміни його абсолютних значень. Отримання розрахункових залежностей для визначення розміру коефіцієнту впливу наближених до ізотермічних умов деформування на розширення надасть можливість виконувати точні розрахунки розмірів вальцювальних калібрів.

Аналіз раніше розроблених систем проектування технологічного процесу (ТП) вальцювання показав, що головною проблемою при створенні автоматизованої системи є відсутність єдиного алгоритму для розрахунку ТП вальцювання та неможливість формалізації процесу розрахунку деяких технологічних операцій. Численні недоліки існуючого програмного забезпечення в області проектування ТП вальцювання зумовлюють необхідність розробки нової системи автоматизованого проектування (САПР) із забезпеченням раціональних технологічних параметрів процесу, що досліджуються в роботі.

На основі проведеного огляду спеціальної літератури сформульовані основні завдання, виконання яких спрямоване на підвищення довговічності деталей подовженої форми з алюмінієвих сплавів, що отримуються за використанням технологічних процесів гарячого вальцювання.

У другому розділі проведено вибір напрямку та методів теоретичного, імітаційного та експериментального досліджень. Найбільш ефективним напрямом, спрямованим на удосконалення процесів гарячого вальцювання, є забезпечення виконання їх раціональних технологічних параметрів з урахуванням впливу форми та розмірів позаконтактних зон, а також наближених до ізотермічних умов деформування на розширення та геометрію осередку деформування.

Для теоретичного аналізу було використано метод скінченних елементів, отримані з якого дані оброблялися за допомогою нелінійного регресійного аналізу через апроксимацію залежностей технологічних параметрів вальцювання заготовок. Описана модель процесу деформування у програмному комплексі QForm3D, що використовується при розрахунках. Результати розрахунку відображають зміну геометрії заготовки, температури, ступеня деформації, швидкості деформації, опору деформації, середньої напруги, швидкості течії матеріалу заготовки по трьох осях та роботи деформації.

Геометричні параметри заготовок та осередку деформування при моделюванні отримувались за допомогою перенесення перетинів до векторного формату та розрахунку розмірів у програмному комплексі для автоматизованого векторного проектування AutoCad. Розміри фактичного ОД визначалися в залежності від ступеня деформації за обрахунком площини поля швидкостей деформації у горизонтальному та меридіональному перерізах.

Вибір графіків для визначення залежності технологічних параметрів вальцювання на підставі існуючих формул апроксимації здійснювався через методи статистичної обробки даних. Параметри регресії обчислювались в програмному комплексі для статистичної обробки даних Statistika за методами нелінійного оцінювання, що представляють із себе узагальнення методу множинної регресії та дисперсійного аналізу. Вплив позаконтактних зон на розширення досліджувався для різних форм позаконтактних зон (прямокутної, трапецієподібної та трикутної) при деформуванні в гладких валках, а також для циліндричних заготовок при вальцюванні в гладких валках та калібрах при зміні ступеня деформування в межах 10...80 %. Для випадків вальцювання циліндричних заготовок було розроблено коефіцієнт впливу позаконтактних зон на розширення:

$$K_{розш.ов.}^{ПЗ} = \frac{\Delta b' - \Delta b}{\Delta b'} \cdot K_{розш}^{ов} = \delta_{\Delta b} \cdot K_{розш}^{ов}, \quad (2)$$

де $\Delta b = b_1 - b_0$ – абсолютне розширення, $\Delta b' = b'_1 - b'_0$ – розширення заготовок без ПЗ (рис. 1), $\delta_{\Delta b}$ – відносне відхилення, що показує вплив ПЗ на процес вальцювання.

Для розрахунків розширення у випадках вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах в умовах, наближених ізотермічного деформування, його розмір має бути зменшеним на значення температурного коефіцієнту розширення:

$$\Delta b = K_{розш}^{ов} \cdot \sqrt{(d - h_{ов}) \cdot \frac{D_{к}^{ов}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{ов}}{d} \right)} - (d - h_{ов}) \cdot K_{розш.ов}^i, \quad (3)$$

де $(d - h_{ов}) \cdot K_{розш.ов}^i$ – множення, що визначає різницю між розширенням, отриманим за допомогою ізотермічного та традиційного вальцювання, $K_{розш.ов}^i = (\Delta b_{20} - \Delta b_{350}) / \Delta h$, де Δb_{20} , Δb_{350} – розширення, що виникає в заготовках під час деформування у вальцювальних штампах, що мають температуру 20 °С та 250...350 °С відповідно.

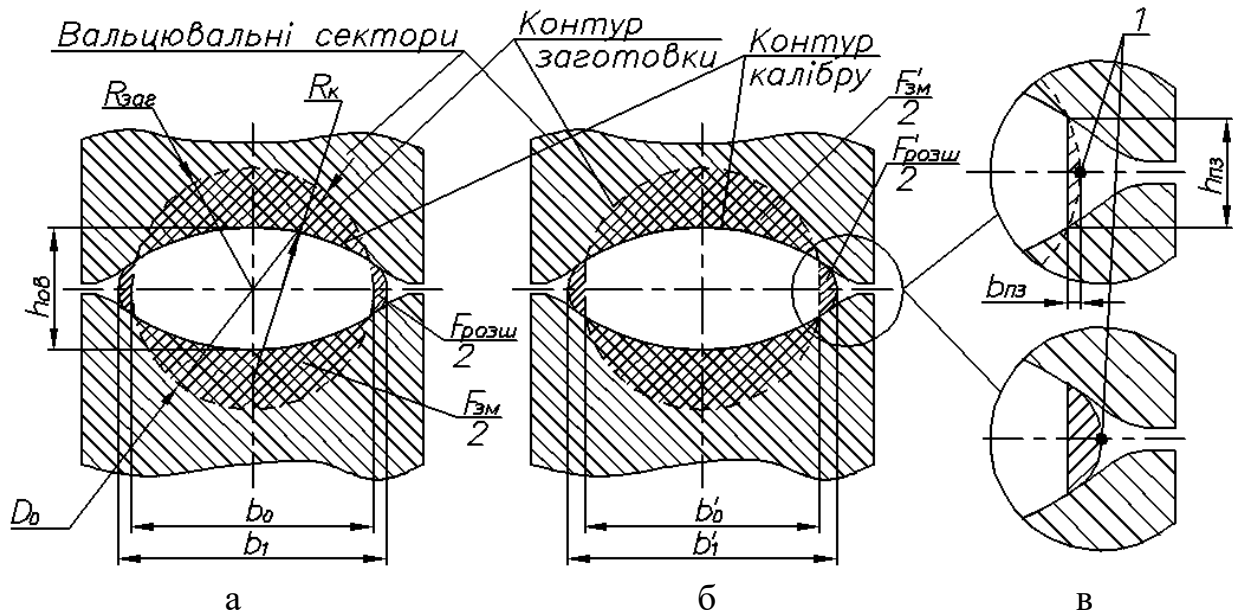


Рисунок 1 – Схеми перетинів заготовок під час вальцювання в овальному калібрі: без ПЗ (а) та з ПЗ (б); позаконтактна зона до та після вальцювання (в)

Функціональна залежність даних з накопиченого ступеня деформації від показника напруженого стану η , що відображає вплив відносного гідростатичного тиску на пластичність, використовувалась при побудові шляху деформування для точок в поперечному перерізі заготовки, які розташовані на торці заготовки в позаконтактних зонах, де існує найбільша вірогідність утворення дефектів (рис. 1, в, точка 1), та визначає їх історію деформування (рис. 2). Для якісної оцінки градієнту нерівномірності ступеня деформації використовувався коефіцієнт відносної нерівномірності:

$$K_H = \frac{\varepsilon_{i \max} - \varepsilon_{i \min}}{\varepsilon_{icp}} \cdot 100\% , \quad (4)$$

де $\varepsilon_{i \max}$, $\varepsilon_{i \min}$, ε_{icp} – максимальна та мінімальна та середня ступінь деформування у розрахунковому перерізі i заготовки, що була отримана за результатом математичного моделювання.

Визначено, що найбільш придатним критерієм для оцінювання деформовності металу при складному навантаженні під час вальцювання через розрахунок використаного ресурсу пластичності є модифікований нелінійний критерій, запропонований В. А. Огородніковим (рис. 3), оскільки він враховує істотний вплив похідною від шляху деформування на заліковування дефектів:

$$\psi = \int_0^{E_i} \left(1 + a \cdot \arctg \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right) \right) \frac{[\bar{e}_i(\eta, \chi)]^{a \cdot \arctg \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}}{[\bar{e}_p(\eta, \chi)]^{1 + a \cdot \arctg \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}} \leq 1, \quad (5)$$

де, E_i – ступінь деформації в кінці процесу; η – показник напруженого стану в небезпечній області заготовки; χ – показник напруженого стану, що враховує третій інваріант тензору напружень; $e_i = e_i(\eta)$ – інтенсивність деформації (шлях деформування точки в небезпечній зоні перерізу заготовки); $e_p(\eta)$ – накопичена ступінь деформації до моменту руйнування; a – константа: ($a = 0,2$).

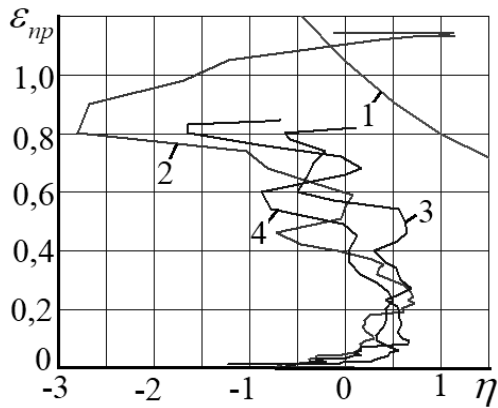


Рисунок 2 – Діаграма пластичності сплаву АК6 в холодному стані (1), шляхи деформування для трасуючих точок, що знаходяться в області ПЗ за коефіцієнта витягування $\lambda=1,75$ для сплаву АК6 при гарячому вальцюванні заготовок діаметром: 25 мм (2); 35 мм (3); 65 мм (4)

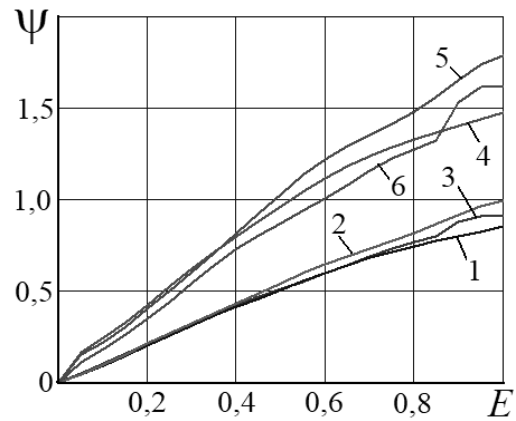


Рисунок 3 – Зміна використаного ресурсу пластичності в області ПЗ по ходу деформування при гарячому вальцюванні заготовок зі сплаву АК6 в овальних калібрах (коефіцієнт витягування $\lambda=1,75$) за теорією В. Л. Колмогорова для заготовок \varnothing 25 мм (1), \varnothing 35 мм (2), \varnothing 65 мм (3) та за теорією В. А. Огороднікова для заготовок \varnothing 25 мм (4), \varnothing 35 мм (5), \varnothing 65 мм (6)

На основі теорії подібності щодо визначення опору деформування в пластичній області (праці О. В. Грушко, В. А. Євстратова, Ю. М. Чижикова, Г. Г. Шломчака та ін.), для алюмінієвих сплавів, що куються, розроблено методику з розрахунку середнього питомого зусилля ($P_{ср.б.} = \sigma_{0,2} \cdot K_{\sigma(сплав)}$, де $\sigma_{0,2}$ – межа плинності металу, K_{σ} – поправний коефіцієнт), що використовується для визначення повного зусилля вальцювання та автоматизованого вибору моделі кувальних вальців. Розрахунок виконується через використання відомих даних за сплавом АК6 та поправочного коефіцієнту для певного сплаву ($K_{\sigma(сплав)}$) під час деформування заготовок, що вальцюються у проміжку температур 420...470 °С:

$$K_{\sigma(сплав)} = K_{\sigma АК6} \cdot \frac{K_{пл.(сплав)} \cdot \sigma_{B(сплав)} \cdot \delta(сплав)}{K_{пл.(АК6)} \cdot \sigma_{B(АК6)} \cdot \delta(АК6)} \cdot \left(\frac{tg\alpha(сплавАК6)}{tg\alpha(АК6)} \right), \quad (6)$$

де $K_{пл.} = \sigma_B / \sigma_{0,2}$ – коефіцієнт пластичної деформації, що враховує співвідношення межі міцності (σ_B) та межі плинності ($\sigma_{0,2}$) для певного сплаву; δ – показник відносного подовження, що враховує вплив розміру пластичної деформації; $tg\alpha$ – кут нахилу, що визначає залежність межі текучості від коефіцієнту форми $l_{\delta}/h_{ср}$, де l_{δ} – довжина геометричного осередку деформування, $h_{ср}$ – середнє значення між висотою заготовки до та після деформування.

У третьому розділі наведено теоретичний аналіз впливу позаконтактних зон на розширення. Зі збільшенням площі поперечних перерізів ПЗ під час прокатування в гладких валках, у позаконтактних зонах прямокутних заготовок зростає негативне розширення. Утягнення відбувається за невеликих обтиснень, коли деформація не проникає в центральні зони, що спричиняє поширення поперечної деформації тільки в поверхневих шарах металу без розширення центральних. З подальшим під-

вищенням ступеня обтиску, деформація починає проникати до центральних зон контактних ділянок, викликаючи їх розширення, яке розсуває позаконтактні зони, що були утягнуті. У заготовок з різною формою позаконтактних зон спостерігається різний розмір розширення (найбільше – у заготовок з прямокутними ПЗ), що говорить про істотний вплив форми ПЗ на поздовжню та поперечну деформації, рівень яких необхідно враховувати при розрахунках калібрів для вальцювання або прокатки фасонних профілів.

Для операцій з вальцювання заготовок циліндричного перерізу $\varnothing 20 \dots 40$ мм у гладких валках, при ступенях деформування менших за $40 \dots 50$ %, відсутність позаконтактної зони значно покращує рівномірність напружено-деформованого стану в осередку деформування та полегшує течію металу в поперечному напрямку. При більших ступенях обтиску – в заготовках без позаконтактних зон утворюється ПЗ, що викликає появу поперечних сил зчеплення, зниження опору деформації та спричиняє більшу нерівномірність та вірогідність появи дефектів в осередку деформування порівняно з тими заготовками, в яких позаконтактна зона утворювалась поступово з самого початку процесу деформування.

Теоретичні дослідження вальцювання за найбільш поширеною схемою круг-овал проводилися на підставі результатів моделювання в програмі QForm3D заготовок з алюмінієвого сплаву АК6, $\varnothing 25, 35, 50$ та 65 мм з температурою нагріву 450 °С, з ПЗ і без ПЗ. Дослідження показали зростання абсолютного розміру розширення зі збільшенням кривизни калібру та діаметру заготовок.

Ступінь впливу позаконтактних зон на розширення визначався за відносним відхиленням лінійного ($\Delta b/\Delta h$), який визначає геометричну характеристику зміни початкових розмірів, та об'ємного ($F_{розши}/F_{зм}$), який визначає справжню площу металу, що був зміщений в поперечному напрямку (рис. 1), показників розширення під час вальцювання заготовок з ПЗ і без ПЗ в овальних калібрах. В рекомендованих для вальцювання за схемою круг-овал інтервалах $1,25 \leq \lambda \leq 1,8$, де $\lambda = F_0/F_1$ (F_0 та F_1 – площі поперечного перерізу заготовки до та після деформування), становить $10 \dots 60$ % відносно розміру коефіцієнту ($K_{розши}^{ов}$) нерівномірності деформації (рис. 4). Переважний вплив позаконтактних зон на нерівномірність деформації при невеликих ступенях деформації виявив потребу внесення до формули з розрахунку розширення поправочного коефіцієнту, що враховує їх вплив на вальцювання:

$$\Delta b = K_{розши.ов.}^{нд} \cdot \sqrt{(d - h_{ов}) \cdot \frac{D_{к}^{ов}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{ов}}{d} \right) + \ln \left(\frac{h_{ПЗ}}{b_{ПЗ}} \right) \cdot a^2 \cdot K_{розши.ов.}^{ПЗ}}, \quad (7)$$

де $K_{розши.ов.}^{нд} = K_{розши}^{ов} - K_{розши.ов.}^{ПЗ}$ – коефіцієнт впливу нерівномірності деформації, $K_{розши}^{ов} = \sqrt{0,102581 \cdot i^2 + 0,515011 \cdot i - 0,611579 - 0,35564 \cdot i + 0,15438}$ – коефіцієнт, що враховує вплив на розширення нерівномірності деформації по ширині і висоті заготовки в залежності від кривизни овального калібру $i = R_{ов}/R_{заг}$ (рис. 1), де $R_{ов}$ – радіус овального калібру, $R_{заг}$ – радіус заготовки; коефіцієнт впливу ПЗ при $i \geq 1,25$ (рис.5): $K_{розши.ов.}^{ПЗ} = 0,1981 - 0,001 \cdot D_0 - 0,1154 \cdot i + 3,5219 \cdot 10^{-6} \cdot D_0^2 + 9,0888 \cdot 10^{-5} \cdot D_0 \cdot i + 0,0212 \cdot 10^{-6} \cdot i^2$, де D_0 – діаметр заготовки що деформується; $h_{ПЗ}$ та $b_{ПЗ}$ – висота та ширина ПЗ (рис. 1).

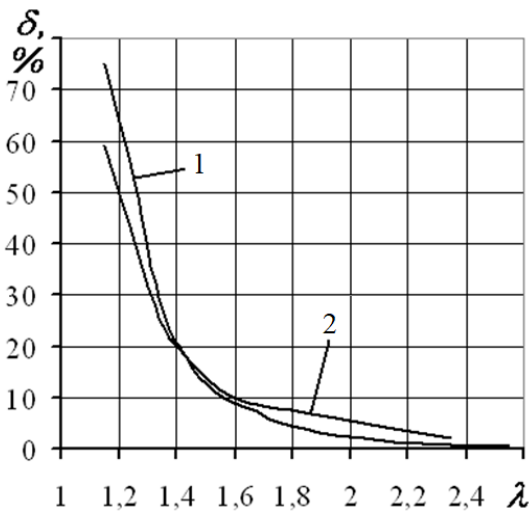


Рисунок 4 – Залежність відносного відхилення показника розширення (1) та об'ємного показника розширення (2) під час вальцювання заготовок з ПЗ і без ПЗ в овальних калібрах від λ

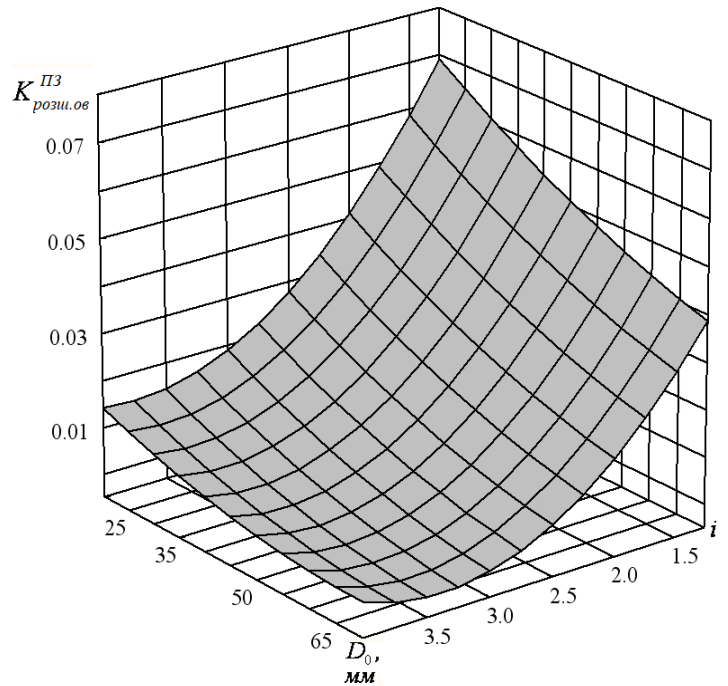


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнту впливу ПЗ від кривизни овальних калібрів та діаметру заготовки під час вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах при $i \geq 1,25$

Аналіз залежності коефіцієнту впливу ПЗ на розширення було зроблено на порівнянні напружено-деформованого стану в області позаконтактної зони для заготовок з та без ПЗ. На початку деформування, в процесі утворення ділянки з ПЗ в заготовках без ПЗ, швидкість деформування в ПЗ, що утворюється, є нижчою за швидкість деформування в заготовці, яка з самого початку деформування мала позаконтактні зони. Тому, за невеликих деформацій в заготовці з ПЗ, у позаконтактній зоні зростає напруга стиснення, а в заготовках без ПЗ при формуванні позаконтактної зони – зростає розтягуюча напруга та спричиняє виникнення ділянки з позаконтактною зоною, яка деформується значно повільніше в порівнянні до заготовки з вже наявною ПЗ. По досягненню кривизни овального калібру $i \approx 1,25$ в обох типах заготовок спостерігається однаковий опір деформуванню, який при подальшому деформуванні інтенсивніше зменшується у заготовках без ПЗ та надає сприятливі умови для подальшого утворення позаконтактної зони. При деформуванні з кривизною калібру більшою за 1,4 в заготовках без ПЗ виникають стискаючі напруги в області позаконтактних зон (рис. 1), що свідчить про закінчення процесу формування в них позаконтактних зон. Розрахунок відносного відхилення співвідношення коефіцієнтів відносної нерівномірності деформації для випадків моделювання вальцювання, розрахованого за формулами, які враховують вплив позаконтактних зон, показав зменшення градієнту нерівномірності на 25...50 % в залежності від ступеня деформування порівняно з тим, що було розраховане за існуючою залежністю.

Для розрахунку розширення у випадках вальцювання прямокутних та циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах, наближених до ізотермічних,

отримано графіки залежностей температурного коефіцієнту розширення від ступеня деформації. Зокрема, для розрахунку розширення (3) при вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах:

$$K_{\text{пощ ое}}^i = \sqrt{2,72374 \cdot \varepsilon^2 - 2,1479 \cdot \varepsilon + 0,424271} + 1,71577 \cdot \varepsilon - 0,65091 \quad (8)$$

де $\varepsilon = 100\% \cdot (F_0 - F_{3M})/F_0$ – ступінь деформування при вальцюванні циліндричних заготовок в калібрах, де F_0 – площа поперечного перерізу заготовки, F_{3M} – площа перерізу зміщеного металу (рис. 1, а, б).

Зменшення розміру розширення при вальцюванні в наближених до ізотермічних умовах деформування відбувається за рахунок збільшення осьових стискаючих напруг, спрямованих уздовж осередку деформації, більш повного протікання знеміцнюючих процесів та відсутності зон з ускладненим деформуванням. Це спричиняє зниження напруги в деформованій заготовці з підвищенням пластичності в її металі, а також, відповідно, зниження нерівномірності градієнту температур та деформацій на 50...80 % по об'єму осередку деформування.

Проведено теоретичні дослідження впливу форми позаконтактних зон та ступеня деформування на розміри фактичного осередку деформації при прокатці прямокутних та циліндричних заготовок в гладких валках. Як результат, було визначено, що раціональний режим деформування заготовок з різними позаконтактними зонами спостерігається при ступенях деформації $\varepsilon = 20...40\%$. Визначено, що для різних форм позаконтактних зон і ступенів деформації, розміри фактичного ОД є більшими за розміри геометричного осередку деформування в 1,2...2,5 рази.

Через моделювання процесу вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів показано, що у наближених до ізотермічного деформування умовах, сприяє збільшенню розмірів горизонтального та меридіонального осередків деформування на 8...12 %, в порівнянні з вальцюванням в традиційних умовах, підвищенню пластичності в зоні деформованого металу та поліпшенню умов протікання процесу вальцювання до ступеня деформації $\varepsilon \approx 10\%$. У проміжку $\varepsilon = 20...40\%$, в зв'язку з початком утворення позаконтактних зон, вплив ізотермічних умов зменшується до розміру статистичної похибки.

У четвертому розділі надано результати експериментально-аналітичних досліджень формозміни циліндричних зразків діаметром $\varnothing 35$ та 65 мм та довжиною $100...150$ мм зі сплаву АК6 в процесі виготовлення деталей подовженої форми.

Запропоновано методику прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок із алюмінієвих сплавів в остаточному ривчаку після декількох операцій вальцювання та деформування в підготовчому ривчаку. З початку утворення дефекту в області навколо нього спостерігається різке зростання опору та швидкості деформування, що відповідно потребує виконання більшої роботи деформування та може використовуватись як індикатор моменту початку утворення дефектів типу «зажим» в місцях переходів та округлень в контурі підготовчого ривчака.

За допомогою моделювань експериментальної деталі «Фітинг» першої групи класифікатора, V групи складності, коли в розміри підготовчого ривчака вносилися відхилення від тих, що були отримані за виробничими рекомендаціями для авіаційної галузі, які гарантують виконання бездефектного штампування (рис. 6).

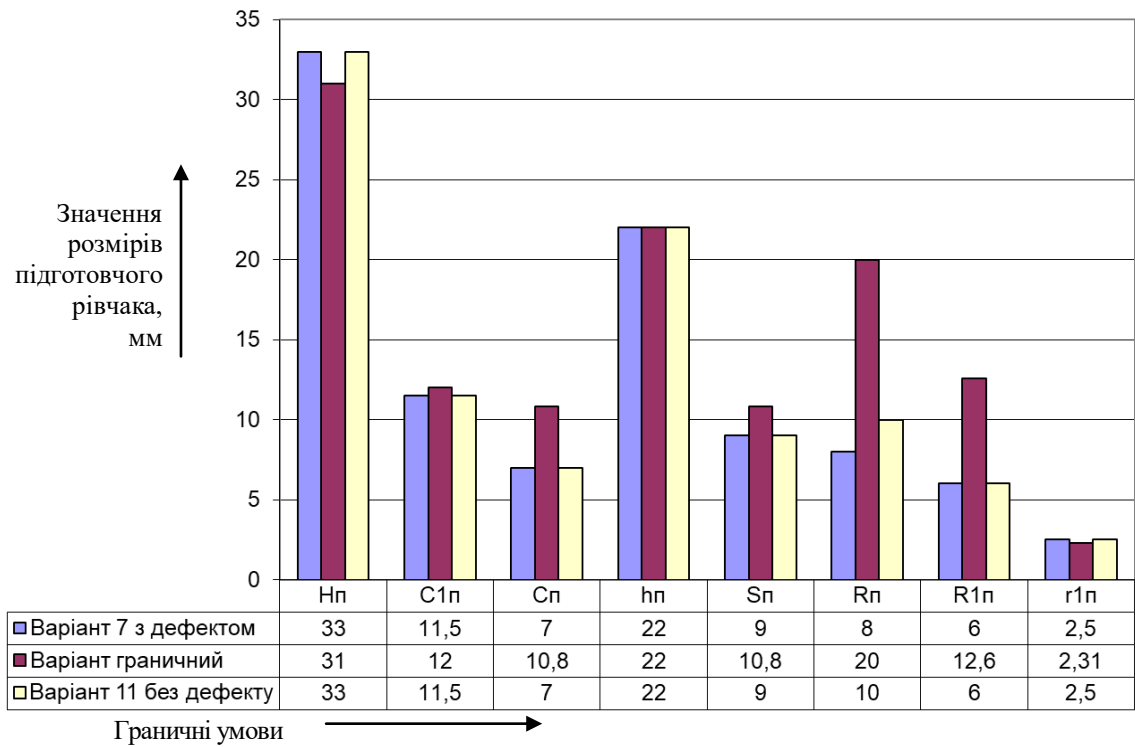


Рисунок 6 – Порівняння розмірів підготовчого рівчачка при утворенні дефектів з граничними умовами: $H_{п}$, $C1_{п}$ – висота та ширина великого ребра, $h_{п}$, $C_{п}$ – висота та ширина малого ребра, $S_{п}$ – висота плоскої частини деталі; $R_{п}$, $R1_{п}$, $r1_{п}$ – радіуси переходів між ребрами, ребрами та плоскою частиною та округлень відповідно

Аналіз даних з декількох варіантів моделювання технологічного процесу дозволив визначити справжній момент, коли розміри підготовчого рівчачка перевищували допустимі граничні розміри, за яких штампування буде виконано без появи дефекту (рис. 6). Це надало можливість запропонувати зміни до рекомендацій з розрахунку розмірів підготовчих рівчачків для забезпечення раціональних технологічних параметрів деформуючого інструменту, зниження вимог до геометрії побудови підготовчого рівчачка, що дозволяє краще перерозподілити метал по підготовчому рівчачку та, як наслідок, знизити градієнт нерівномірності деформації по небезпечним перерізам при виготовленні поковок для деталей складної конфігурації.

Експериментальна перевірка використання удосконалених рекомендацій з розрахунку розмірів підготовчих рівчачків та аналітичних залежностей, що враховують вплив позаконтактних зон на розширення при вальцюванні, відповідно яких було змінено геометрію вальцювальних калібрів та зменшено радіуси переходів у підготовчих рівчачках, була виконана для декількох досліджуваних штампованих кувачів типових представників заготовок, що вальцюються, на кувальних вальцях (рис. 7).

Зокрема, дослідження на основі технології виготовлення партії деталей з подовженою віссю «Качалка» (рис. 7), показало глибше проникнення деформації в центральні зони заготовки, що деформується, з подрібненням та орієнтуванням зерен, а також покращенням його структури та зниження градієнту нерівномірності по перерізу (рис. 8). Була покращена відповідність розмірів підготовчого та кінцевого рівчачків, що дозволило виконати повністю бездефектне штампування, зменшивши норму витрати вихідної заготовки на 11%.



Рисунок 7 – Етапи виготовлення штампованої поковки «Качалка»: а) мірна заготовка; б) заготовка, що вальцюється, першого переходу «круг-овал»; в) вальцювальна заготовка другого переходу «овал-квадрат»; г) заготовка після підготовчого ривчака; д) штампована деталь

Традиційна технологія		Технологія з врахуванням впливу ПЗ	
Ступінь деформування	Макроструктура	Ступінь деформування	Макроструктура

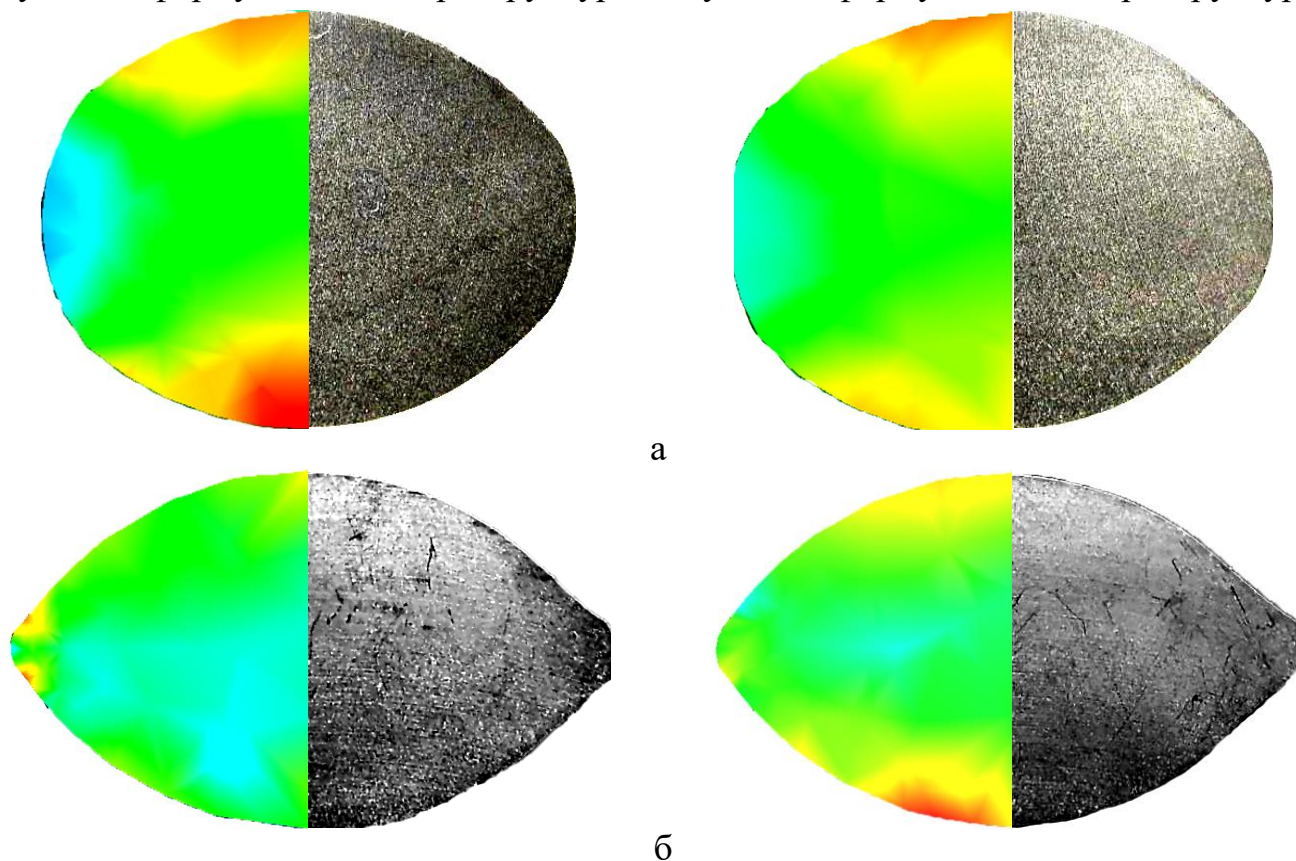


Рисунок 8 – Ступінь деформування та макроструктура перерізів заготовок, що вальцюються за системою круг-овал: (а) перехідна зона з круга на овал; (б) зона овалу

Перевірка відповідності експериментальних даних з виготовлення деталі «Качалка» до розрахованих за удосконаленою математичною моделлю, що описує розширення, підтвердила адекватність її використання.

У п'ятому розділі з урахуванням теоретичних та експериментальних досліджень автора, розроблено програмно-методичний комплекс системи автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання розрахунку калібрів та створення тривимірних моделей вальцювальних секторів (ПМК САПР ТП вальцювання). Запропоновано етапи роботи комплексу: отримання значень площ поперечних перерізів штапованої поковки; визначення параметрів вальцювальної заготовки; визначення числа переходів і вибір системи калібрів; розрахунок системи калібрів, зусилля і базисного тиску; побудова параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів і вихідної заготовки у САД-системі; підготовка та друк звіту за результатом розрахунку ТП вальцювання.

Розроблено діаграми послідовностей роботи та спроектовано інтерфейс ПМК САПР ТП вальцювання (рис. 9).

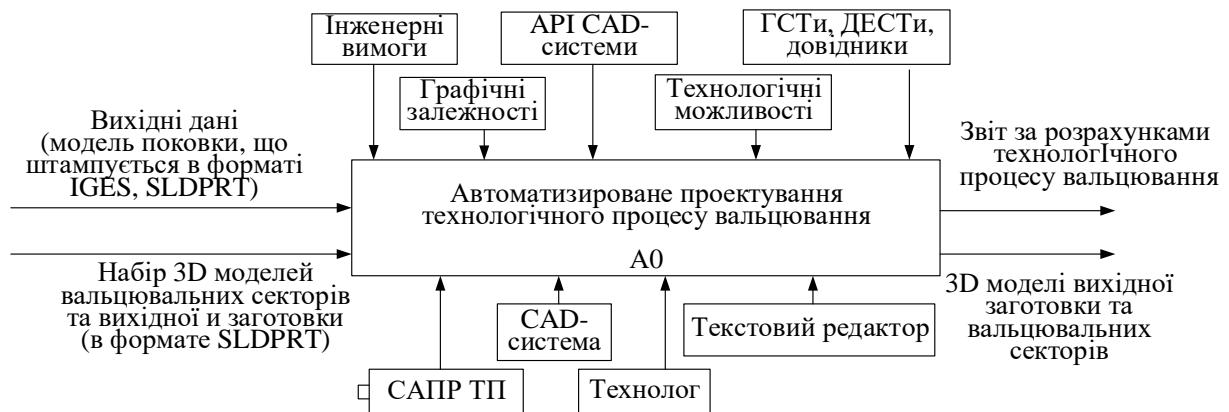


Рисунок 9 – Структурно-функціональна діаграма ПМК САПР ТП вальцювання

До математичної моделі розрахунку, що включає послідовність вирішення завдань проектування технологічного процесу, введені закономірності зміни коефіцієнтів випередження та нерівномірності деформації по ширині калібру під час вальцювання в ньому заготовки, з урахуванням впливу геометричних (вплив ПЗ) і температурних (вальцювання в умовах, наближених до ізотермічних) факторів.

Розроблено математичні моделі та алгоритми: розбиття тривимірної моделі штапованої поковки на елементарні ділянки по довжині; розрахунку площ поперечних перетинів і побудови епюр перетинів штапованої поковки; розмірів вихідної заготовки, вальцювальних калібрів, вибору числа переходів, що дозволяє скоротити цикл проведення проектних робіт, і при цьому прорахувати більшу кількість варіантів технологічного процесу. Реалізована побудова технологічної оснастки в САД-системі у вигляді параметричних 3D-моделей вальцювальних секторів і вихідної заготовки на базі отриманих розмірів калібрів.

За розрахунком економічної ефективності впровадження САПР ПМК ТП вальцювання річна економія складає 32355 грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічне завдання щодо підвищення якості виробів подовженої форми із алюмінієвих сплавів на підставі визначення раціональних конструктивних, геометричних і фізико-механічних параметрів процесів гарячого вальцювання та їх комплексного впливу на технологію виготовлення виробів за допомогою дослідження механізму впливу позаконтактних зон та наближених до ізотермічних умов деформування на розширення заготовок, що вальцюються з алюмінієвих сплавів, для зниження градієнту нерівномірності в осередку деформування.

1. Проаналізовано стан методів з визначення впливу різних технологічних параметрів на розширення під час вальцювання та знайдено значні відхилення, що отримуються за результатами експериментів, розрахунок інструменту для яких був виконаний за використанням існуючих формул з визначення розширення. Важливими причинами відхилень є відсутність при використанні методів з розрахунку розширення, врахування впливу, що спричиняють позаконтактні зони та наближені до ізотермічних умови деформування, для яких потрібно розробити коефіцієнти, додатні для використання в промислових розрахунках.

2. Розроблено методи, що дозволяють виконувати розрахунки розширення, геометричних параметрів калібрів, коефіцієнтів впливу позаконтактних зон та температурного коефіцієнту розширення за використанням апроксимаційних моделей при прокатуванні заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках та вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах. Оцінювання деформівності при гарячому вальцюванні через показник використаного ресурсу пластичності, яке виконувалось за критерієм деформівності, запропонованим В. А. Огородніковим, показало, що при формозміні у ПЗ не перевищується умова, яка відповідає стадії деформування, на якій необхідно припиняти процес.

Розроблено метод з визначення розмірів фактичного осередку деформування при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів, за використанням результатів математичного моделювання через визначення розмірів поля швидкостей деформації, яке отримується у вигляді ізолій, що змінюються в межах $0,5 \dots 11 \text{ с}^{-1}$.

Розроблено аналітичний метод, для розрахунку середнього питомого зусилля вальцювання через використання відомих даних з розміру середнього питомого зусилля та за сплавом АК6, співвідношення даних з відносного подовження, межі пластичності та міцності та поправочного коефіцієнту для певного алюмінієвого сплаву, за температур $420 \dots 470 \text{ }^\circ\text{C}$, що використовується для визначення повного зусилля вальцювання та автоматизованого вибору моделі кувальних вальців.

3. Показано, що для процесу вальцювання прямокутних заготовок з позаконтактними зонами різної форми в гладких валках, найбільше розширення спостерігається в заготовках, обсяг ПЗ яких рівномірно розподілений по всій ширині ПЗ (прямокутні) та перевищує у $2 \dots 4$ рази розширення позаконтактних зон, що мають форму перерізу, наближену до трикутної, оскільки така форма ПЗ є більш схильною до утягнення. Визначено, що для різних форм позаконтактних зон та ступенів деформації розміри фактичного ОД перевищують геометричний ОД в $1,2 \dots 2,8$ рази. Найменший градієнт нерівномірності в геометричному осередку деформування спосте-

рігається при ступенях деформації 20...40 %, коли площа фактичного осередку деформування в 1,5...2 рази більша за геометричний.

Визначено, що для операцій по вальцюванню циліндричних заготовок $\varnothing 20...40$ мм в гладких валках, при ступенях деформування, менших за 40...50 %, відсутність позаконтактних зон зменшує градієнт нерівномірності напружено-деформованого стану в осередку деформування та полегшує течію металу в поперечному напрямку. Дослідження розмірів фактичного осередку деформування показали, що в заготовках з наявністю ПЗ, рівномірність напружено-деформованого стану зберігається до ступеня обтиску 23 %, що свідчить про найкращі умови деформування саме в цьому проміжку.

За результатами математичного моделювання та обробки їх через нелінійне оцінювання встановлено, що розмір відносного відхилення показника розширення при наявності в заготовці позаконтактних зон складає 10...60 % від загального розміру розширення. Удосконалено залежність з розрахунку розширення в рекомендованих для вальцювання за схемою «круг-овал» коефіцієнтах витягнення $1,25 < \lambda < 1,8$, з урахуванням розробленого поправного коефіцієнту, що враховує вплив геометричних розмірів ПЗ та співвідношення розмірів калібру і заготовки на процес вальцювання. Розроблено модель, що показує нелінійне зростання розміру розширення при збільшенні кривизни калібру та діаметру заготовок. Показано, що використання удосконаленої залежності зменшує градієнт нерівномірності деформування на 25...50 % в залежності від ступеня деформування.

Як наслідок, дослідження даних з моделювання за методом скінченних елементів та нелінійного аналізу, 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. Визначено, що деформування за цих умов призводить до вирівнювання напружено-деформованого стану по всьому об'єму заготовки та збільшенню розмірів фактичного осередку деформування на 8...12 %.

4. Запропоновано метод прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок із алюмінієвих сплавів в остаточному рівчаку після декількох операцій вальцювання та деформування в підготовчому рівчаку, заснований на використанні результатів з напружено-деформованого стану отриманих через моделювання технологічного процесу за методом скінченних елементів. 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. Виконано експериментальну перевірку удосконалених рекомендацій з розрахунку розмірів підготовчих рівчаків та аналітичних залежностей, що враховують вплив позаконтактних зон на розширення та геометричні розміри деформуючого інструменту під час виготовлення виробів для різних груп типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються, під штампування на кувальних вальцях. Знижено градієнт нерівномірності по перерізу заготовки, що вальцюється, та покращено відповідність розмірів підготовчого та кінцевого рівчаків. Штампування

заготовок в остаточному рівнянні у досліджуваній партії було виконане на 100 % без наявності дефектів, що є на 10 % вищим за попередні показники, та пройшло перевірку механічних властивостей заготовок, що вальцюються, та отриманих з них штамповок на відповідність вимогам технічної документації: межа міцності $\sigma_B = 390 \dots 415$ МПа; відносне подовження $\delta = 16 \dots 19$ %.

б. Загальні практичні результати роботи були запропоновані для використання на етапі моделювання операцій обробки тиском складних заготовок на ПАТ «Енергомашспецсталь» (м. Краматорськ) з метою удосконалення технологій деформування та розробки заходів щодо поліпшення процесу формоутворення виробів. Використання розробленого автором програмно-методичного комплексу системи автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання та створення тривимірних моделей вальцювальних секторів з урахуванням рекомендацій по забезпеченню раціональних технологічних параметрів на ТОВ «Науково-виробничий центр «Ухналь»» (м. Київ) дало можливість підвищити точність виготовлення заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються.

Окремі результати дисертаційної роботи також використовувались при підготовці навчального посібника авторів С. О. Скрябіна, Д. С. Чайки та О. Е. 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».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] С. А. Скрябин, Н. Н. Барабой и Д. С. Чайка, «Определение контактной площади при вальцовке заготовок, с учетом развития деформации во времени», *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение*, № 49, с. 18 – 22, 2006.

[2] С. А. Скрябин, Л. В. Швец и Д. С. Чайка, «Исследование течения металла в переходной и установившейся зонах при вальцовке заготовок в очаге деформации, с учетом развития деформации во времени», *Технологические системы*, № 4, с. 32 – 38, 2006.

[3] 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». Машиностроение*, № 50, с. 59 – 69, 2007.

[4] 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.

[5] С. А. Скрябин, В. Л. Калюжный 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.

[6] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон вальцуемых заготовок на размеры фактического очага деформации», *Обработка металлов дав-*

лением: *сб. науч. трудов*, № 2 (21), с. 220 – 226, 2008.

[7] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка и И. А. Бубновская, «Определение возможности появления дефектов при штамповке поковок с применением процесса вальцовки и подготовительных ручьев», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 3 (24), с. 76 – 81, 2010.

[8] С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок удлиненной формы из алюминиевых сплавов», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 1 (26), с. 134 – 138, 2011.

[9] 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.

[10] 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: зб. наук. праць*, № 1 (12), с. 315 – 323, 2011.

[11] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка и И. А. Бубновская, «Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок», *ВНАУ зб. наук. праць. Технічні науки*, № 6, с. 104 – 110, 2011.

[12] 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.

[13] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Исследование методов аппроксимации зависимостей коэффициентов уширения и опережения при вальцовке в калибрах», *Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов*, № 3 (36), с. 64 – 67, 2013.

[14] 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*, № 2 (39), с. 180 – 187, 2014.

[15] 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. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(14%D0%95\)_2014/article/15.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(14%D0%95)_2014/article/15.pdf)

[16] Д. С. Чайка, «Определение показателей пластичности вальцуемых заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 1 (100), с. 158 – 165, 2018.

[17] Н. Р. Веселовская и Д. С. Чайка, «Повышение качества изготовления вальцовок из алюминиевых сплавов», *на IV Міжнар. наук.-техн. конф. Земля України - потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави*, Вінниця, 2014, с. 156 – 159.

[18] Д. С. Чайка, «Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів», *на Всеукр. наук.-практ. інтернет конф. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2019)*, Вінниця, 2019.

[19] Д. С. Чайка, «Дослідження деформовності метала у позаконтактних зо-

нах при гарячому вальцюванні циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в овальних калібрах», на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту*, Вінниця, 2019, с. 109 – 111.

[20] Д. С. Чайка, «Исследование влияния внеконтактных зон на уширение для оптимизации разработки технологического процесса вальцовки», на *III науч.-техн. конф. молодых специалистов. Энергомашиноспециальность-2011*, Краматорск, 2011, с. 28 – 30.

[21] С. А. Скрябин, Д. С. Чайка и О. Е. Марков, *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.

АНОТАЦІЯ

Чайка Д. С. Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів із забезпеченням їх раціональних технологічних параметрів. – 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, 2019.

Дисертацію присвячено науково-технічному завданню з удосконалення технологічних процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів та розробці рекомендацій з забезпечення їх раціональних технологічних параметрів.

Отримали подальший розвиток метод теоретичного дослідження опору деформування в осередку деформації, а також метод оцінки деформівності щодо розрахунків використаного ресурсу пластичності та показника напруженого стану для процесів гарячого вальцювання заготовок з різних марок алюмінієвих сплавів.

Вивчено механізм впливу позаконтактних зон заготовок та наближених до ізотермічних умов деформування на розширення та нерівномірність деформації в осередку деформування при вальцюванні. Удосконалено математичну модель з розрахунку розширення за схемою «круг-овал» та виконано їх експериментальну перевірку з оцінкою адекватності використання моделі.

Запропоновано методіку прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок з алюмінієвих сплавів при деформуванні в підготовчому рівчаку з попереднім вальцюванням.

Розроблено програмно-методичний комплекс системи автоматизованого розрахунку калібрів та створення тривимірних моделей вальцювальних секторів.

Ключові слова: штампування, вальцювання, заготовка, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, калібри, позаконтактні зони, розширення заготовок, що вальцюються.

ABSTRACT

Chaika D.S. Improving the processes of the aluminum alloys billets hot rolling with ensuring their rational technological parameters. – Qualification 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, 2019.

The dissertation is devoted to the scientific task of improving the technological processes of hot rolling of billets made from aluminum alloys and to the recommendations development for their rational technological parameters ensuring.

The method of theoretical study of deformation resistance in the deformation zone, as well as the method of estimation of deformability in calculations of the used plasticity resource and the indicator of the stress state, for the processes of hot rolling of billets from different grades of aluminum alloys, were further developed.

The mechanism of influence of non-contact zones of the workpieces and the deformation conditions close to the isothermal conditions on the broadening and deformation irregularity in deformation zone during rolling is studied. The mathematical model for the calculation of the circle-oval broadening was improved and their experimental verification was performed to assess the adequacy of the model's use.

A technique for predicting the occurrence of defects in hot-stamping forging of aluminum alloys for deformation in a former pass with previous rolling is proposed.

The program-methodical complex of the system of automatic calculation of calibers and creation of three-dimensional models of rolling sectors has been developed.

Keywords: stamping, rolling, billet, finite element method, stress-strain state, gauges, non-contact zones, broadening of rolled billets.

АННОТАЦИЯ

Чайка Д.С. Совершенствование процессов горячей вальцовки заготовок с алюминиевых сплавов с обеспечением их рациональных технологических параметров. – Квалификационная научная работа 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, 2019.

Диссертационная работа посвящена научно-техническому заданию по совершенствованию малоотходных технологических процессов горячей вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов. Разработаны рекомендации по обеспечению их рациональных конструктивных, геометрических та физико-механических параметров, исследовано их комплексное влияние на технологические характеристики с целью снижения градиента неравномерности в очаге деформации и повышения долговечности изготовленных из них деталей удлиненной формы.

Анализ существующих схем вальцовки показал, что за счет вертикального обжатия вследствие действия закона о наименьшем сопротивлении, определяющем интенсивность вытекания металла из очага деформации в направлении свободных

поверхностей, вызывается уширение в заготовке. Исследование методов расчета уширения показало, что наиболее точными являются те, которые основаны на использовании законов механики деформируемого тела, при котором уширение зависит от протяженности зоны опережения, логарифма деформации, ширины и натяжения деформируемой полосы металла. Определено, что весомой причиной значительных отклонений результатов расчета уширения от экспериментальных данных, является отсутствие в формулах учета влияния на него внеконтактных зон и приближенных к изотермическим условий деформирования.

Получил дальнейшее развитие метод теоретического исследования сопротивления металла в очаге деформации при объемном деформировании, заключающийся в определении величины базисного давления для случаев вальцовки различных алюминиевых сплавов. Проведена оценка деформируемости металла при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах: определен показатель напряженного состояния и рассчитан использованный ресурс пластичности в области внеконтактных зон по нелинейному критерию, предложенному В. А. Огородниковым.

Разработана общая методика теоретического исследования влияния формы и размеров внеконтактных зон, а также приближенных к изотермическим условий деформирования на величину уширения. Предложен метод для определения размеров фактического очага деформации при прокатке заготовок в гладких валках и овальных калибрах. Выполнено численное моделирование различных случаев прокатки и вальцовки с использованием метода конечных элементов, в результате которого получены размеры поперечных сечений заготовок, параметры их напряженно-деформированного состояния, а также размеры фактического очага деформации.

Показано, что при вальцовке прямоугольных заготовок с внеконтактными зонами в гладких валках, наибольшее уширение имеют заготовки, объем внеконтактных зон которых равномерно распределен по всей ширине. Определен интервал деформирования, в котором отсутствие внеконтактных зон в заготовке снижает градиент неравномерности напряженно-деформированного состояния в очаге деформации для операций вальцовки цилиндрических заготовок в гладких валках. Установлено влияние формы внеконтактных зон и степени деформации на размеры фактического очага деформации, а также возможность превышения размеров фактического очага деформации над геометрическим в 1,2...2,5 раза.

Для операций вальцовки цилиндрических заготовок в овальных калибрах описана модель и выведена формула зависимости для расчета коэффициента влияния внеконтактных зон на уширение. Усовершенствована и подтверждена адекватность модели эмпирической зависимости для расчета уширения с использованием рассчитанного коэффициента, а также размеров внеконтактной зоны и отношения осей калибра, использование которой приводит к снижению градиента неравномерности деформации на 25...50 %. Разработаны зависимости для определения температурного коэффициента уширения, с учетом которого производится расчет уширения при вальцовке заготовок в условиях, приближенных к изотермическим.

Предложен метод прогнозирования появления дефектов при горячей штамповке поковок из алюминиевых сплавов в окончательном ручье после нескольких операций вальцовки и деформирования в подготовительном ручье, основанный на использовании результатов моделирования технологического процесса. Предложе-

ны рекомендации по обеспечению рациональных технологических параметров деформирующего инструмента и снижению требований к геометрии подготовительного ручья в случаях изготовления деталей сложной конфигурации.

Выполнена экспериментальная проверка усовершенствованных рекомендаций по расчету подготовительных ручьев и аналитических зависимостей, учитывающих влияние внеконтактных зон на уширение при деформировании различных групп типовых представителей заготовок из алюминиевых сплавов, вальцуемых под штамповку.

Усовершенствована методика расчета вальцовочных калибров и подготовительных ручьев для создания техпроцесса изготовления деталей с удлинённой осью. Для данной методики разработан программно-методический комплекс системы автоматизированного расчета калибров и создания трехмерных моделей вальцовочных секторов, который передан для освоения в учебных и производственных процессах.

Ключевые слова: штамповка, вальцовка, заготовка, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, калибры, внеконтактные зоны, уширение вальцованных заготовок.

Підписано до друку 04.11.2019 р. Формат 29,7×42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2019-144.

Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.