

Міністерство освіти і науки України
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського

Аргат Роман Григорович



УДК 621.7.043

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ
ДЕТАЛЕЙ ВИТЯГУВАННЯМ З ПОЕТАПНИМ РОЗТЯГУВАННЯМ
ФЛАНЦЯ ЗАГОТОВКИ З ГОФРАМИ**

Спеціальність 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кременчук – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, доцент
Пузир Руслан Григорович,
Кременчуцький національний університет імені
Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки
України, доцент кафедри технології машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фролов Євгеній Андрійович,
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і
науки України, професор кафедри
технології машинобудування;

кандидат технічних наук, с.н.с.
Плєснецов Юрій Олександрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри обробки металів тиском

Захист відбудеться «15» травня 2019 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.06 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського за адресою: вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600.

Автореферат розісланий «12» квітня 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., проф.



В. М. Чебенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Розвиток машинобудівного виробництва ґрунтується на сучасних досягненнях науково-технічного прогресу у всіх галузях і напрямках, починаючи з матеріалознавства і закінчуючи досягненнями науки в економіці та маркетинзі. Важливу роль у цьому розвитку займають сучасні методи виготовлення деталей машин і механізмів методами обробки металів тиском, які містять у собі риси не тільки заготівельного виробництва, але і складального, й основного з виготовленням кінцевої продукції. Процеси листового штампування як виду обробки металів тиском у холодному стані є високоефективними й економічними, за їх допомогою отримують кінцеві продукти високої якості з необхідним набором функціональних характеристик, розмірної точності та чистоти поверхні.

Одним з основних способів листового штампування є витягування циліндричних деталей. Ці деталі як складальні одиниці та як окремі комплекси набули широкого поширення у всіх галузях машинобудування. Переважно розрізняють три способи витягування: витягування з притисканням, витягування зі стоншенням стінок і витягування без притискання. Перші два способи застосовуються практично в усіх листоштампувальних цехах і спеціалізованих виробництвах, більшість ліній яких автоматизовані та розроблено науково обґрунтовані методики проектування технологічних процесів. Третій спосіб отримав менше поширення з огляду на його обмеженості та неспроможність за один перехід отримати значні ступені деформації, співмірні з деформаціями перших двох. Однак простота оснащення, обладнання, що застосовується, а також можливість швидкого переналагодження на випуск нових виробів зумовлює необхідність подальшого розвитку цього способу.

Механічні характеристики металу й умови деформування накладають певні обмеження на можливості граничного формоутворення. Практично всі операції листового штампування виконуються в умовах, близьких до плоского напруженого й об'ємного деформованого стану. Для них характерне місцеве стоншення стінки заготовки, що спричиняє утворення тріщини та руйнування або втрати стійкості у вигляді виникнення гофрів і складок. Застосування нових теоретичних підходів до розрахунку напружено-деформованого стану ділянок заготовки в осередку пластичної деформації в процесах листового штампування дозволить виявити формально підтверджені та раніше невиявлені чинники процесу та їх комбінації, які мають вирішальний вплив на виникнення браку. Залучення до аналітичного розрахунку більшої кількості граничних умов уточнить наявні залежності, розширить їх застосування на суміжні процеси листового штампування, що дозволить направлено впливати на поле напружень і деформацій з метою забезпечення розмірної якості виробів і набору функціональних властивостей.

З огляду на це значний науковий і практичний інтерес представляють розробка та дослідження технологічних процесів, заснованих на штампуванні без притискання, створення як нових, так і комбінованих способів. Тому розробка науково обґрунтованих методів розрахунку цих процесів є актуальним, значним

науково-технічним завданням, упровадження якого робить істотний внесок у справу прискорення науково-технічного процесу в обробці металів тиском.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота спрямована на розв'язання актуальних завдань у рамках виконання: пунктів 1.3.1.1. «Методи розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану, зокрема за наявності дефектів різного походження» та 1.3.1.6. «Некласичні проблеми механіки тонкостінних систем (пластини та оболонки)» «Основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009–2013 рр». (Постанова Президії НАНУ від 25.02.2009; № 55), статті 7 пункту 6 «Новітні технології в енергетиці, промисловості, агропромисловому комплексі», пункт 6 «Нові матеріали і речовини» Закону України № 2519-VI від 9.09.2010 про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та «Перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року» (Додаток до Постанови Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р. із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 556 від 23.08.2016); «Загальнодержавної цільової економічної програми розвитку промисловості на період до 2017 року» (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 липня 2008 р. № 947-р), «Концепції науково-технологічного та інноваційного розвитку України» (Постанова Верховної Ради України від 1999 р. № 37).

Робота виконана на кафедрі «Технологія машинобудування» згідно з напрямами наукових шкіл Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського в рамках тематичних планів науково-дослідних робіт кафедри – господарськими договорами (№ 202/10; № 242/12), держбюджетної науково-дослідної роботи (0117 U002295), виконаної в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського. Автор брав участь у цих роботах як науковий співробітник.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу витягування циліндричних деталей без складкотримача завдяки поетапному розтягуванню фланця заготовки. Для досягнення поставленої мети в роботі були поставлені й розв'язані такі завдання:

- проведення критичного аналізу сучасних способів інтенсифікації процесів витягування як з притискуванням фланця, так і без нього, оцінювання шляхів керування полем напружень і деформацій з метою визначення взаємозалежностей між визначальними чинниками процесу витягування;

- розробка фізичної моделі та методу розрахунку розподілу поля напружень і деформацій на радіусі заокруглення матриці під час витягування без притискування фланця заготовки;

- визначення інтервалів штампування без притискування на підставі теоретичного аналізу втрати стійкості листової заготовки з утворенням хвилястості й урахуванням анізотропії металу заготовки;

- теоретичне й експериментальне обґрунтування способу витягування з поетапним розтягуванням фланця заготовки, експериментальна перевірка адекватності отриманих аналітичних та емпіричних моделей;

– розробка рекомендацій щодо практичного використання результатів дослідження.

Об'єкт дослідження. Процеси витягування деталей циліндричної форми з листового металу.

Предмет дослідження. Конструктивні та технологічні чинники процесу витягування без складкотримача заготовок з листових металів, вплив фізико-механічних характеристик матеріалу на отримання якісних деталей.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження засновані на положеннях теорії листового штампування, теорії стійкості та безмоментної теорії оболонки, теорії пластичності, що базується на концепції трансляційно-ізотропного зміцнення, а також на феноменологічних моделях руйнування матеріалів.

Як основні положення теоретичних досліджень витягування брали умову сталості обсягу під час пластичної деформації, нерозривності деформацій, умову пластичності анізотропного тіла Р. Хілла, а також модель пластичного стану деформованого металу Г. Бакхауза.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних і виробничих умовах методами тензометрування, прямих вимірювань, фізичного моделювання процесу штампування без притискання. Застосовані методи вимірювань з використанням сучасної апаратури, яка пройшла метрологічний контроль. Постановка дослідів ґрунтувалася на положеннях математичної теорії планування експерименту з реалізацією ортогональних ротатабельних планів першого порядку з дворівневим варіюванням чинників і рандомізацією послідовності проведення дослідів. Для обробки результатів експерименту залучалися методи теорії ймовірностей і математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

– уперше встановлені закономірності розподілу поля напружень на витяжному ребрі матриці під час витягування без притискання фланця заготовки, що дозволило виявити раніше невраховані чинники процесу та їх поєднання, які дозволяють керувати величиною напружень в осередку пластичної деформації;

– удосконалена фізична модель стиснуто-розтягнутих ділянок фланця заготовки з урахуванням плоскої анізотропії та ізотропного зміцнення металу, що дало можливість аналітично визначити інтервали геометричних розмірів заготовок, що усувають гофроутворення під час витягування;

– отримала подальший розвиток формалізована модель пластичного стану тіла, що деформується, Г. Бакхауза щодо процесу витягування циліндричних деталей без складкотримача, де, враховуючи ефект Баушінгера, аналітично представлена принципова можливість здійснення витягування з поетапним розтягуванням фланця заготовки.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи:

1. Уперше апробований і впроваджений у виробництво спосіб витягування без притискання круглї заготовки з поетапним розтягуванням її фланця.

2. Розроблений метод розрахунку додаткового ходу пуансона під час витягування деталей способом поетапного розтягування фланця.

3. Розроблений метод визначення тисків на витяжну кромку матриці заготовкою, що деформується без притискання фланця, що забезпечило співвідношення сил тертя між інструментом і напівфабрикатом.

4. Розроблений уточнений метод розрахунку зусилля під час штампування без притискання, який необхідний для проектування штампового оснащення під час витягування телескопічним пуансоном.

5. Розроблено метод визначення товщини заготовки, що усуває втрату стійкості фланцевої частини заготовки.

6. Сформульовано загальні практичні рекомендації для проектування технологічних процесів із застосуванням витягування без складкотримача, які спрямовані на збільшення ступеня деформації за рахунок застосування комплексу науково обґрунтованих у роботі заходів.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методів розрахунку і технічних прийомів використані під час розв'язання низки завдань в умовах промислових підприємств: ПАТ «Кременчуцький завод металевих виробів» (м. Кременчук) і ТОВ НВФ «Техвагонмаш» (м. Кременчук). Сумарний економічний ефект від упровадження склав близько 343 тис. грн.

Основні положення роботи використовуються під час викладання навчальних дисциплін «Технологія холодного штампування», «Науково-дослідна робота студента», «Спеціальні процеси обробки металів тиском» у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського.

Особистий внесок здобувача. Усі положення дисертації, які винесені на захист, отримані здобувачем самостійно. Постановка завдань та аналіз результатів досліджень проводилися частково із співавторами публікацій. Розробка планів експериментів, конструювання обладнання та проведення експериментальних досліджень виконані спільно із співробітниками кафедри «Технології машинобудування» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Особистий внесок автора в наукових працях, опублікованих у співавторстві, відображено в анотації до списку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися й обговорювалися на міжнародних, всеукраїнських і регіональних науково-технічних (НТК) і науково-практичних (НПК) конференціях, а саме: МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії» (м. Харків, 2012–18 pp.); МНТК з проблем дослідження і вдосконалення технологій і обладнання обробки тиском (м. Краматорськ, 2012–18 pp.); XIX МНТК «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (м. Кременчук, 2012–2018 pp.); МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. Київ, 2014); 3rd International scientific conference «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences» (Vienna, 2014); XXIII міжнародний науково-технічний семінар «Високі технології: тенденції розвитку» (м. Одеса, 2015); МНТК «Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта» (м. Одеса, 2015); всеукраїнська НТК «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 2016); МНТК «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (м. Маріуполь, 2017); МНТК «Технології та

інфраструктура транспорту» (м. Харків, 2017), на науковому семінарі при спеціалізованій раді Д 45.052.06 КрНУ (м. Кременчук, 2018).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 27 друкованій роботі, у тому числі 13 статей у спеціалізованих виданнях України, 3 статті – у міжнародних наукових журналах, включених в базу даних Scopus, 1 стаття опублікована без співавторів, 8 – матеріали міжнародних конференцій і семінарів. Нові технічні рішення захищені 2 патентами України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи 208 сторінок, у тому числі основного тексту 169 сторінок, 68 рисунків і 5 таблиць, список використаних джерел з 157 найменувань і 5 додатків на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі подано результати аналізу об'єкта і предмета досліджень. Проведено аналіз властивостей об'єкта досліджень на підставі закономірностей процесу витягування циліндричних деталей, впливу параметрів витягування на якість кінцевого виробу.

Розглянуто традиційні способи витягування напівфабрикатів. Показано, що під час витягування можлива формозміна заготовки зазвичай обмежується її руйнуванням у тому місці, де діють найбільші за величиною напруження, що розтягують. Тому під час вивчення цього процесу особлива увага приділяється з'ясуванню чинників, що впливають на величину небезпечних меридіональних напружень, і оцінюванню ступеня цього впливу. Особливий напрям раціональної побудови або поліпшення технології витягування полягає у створенні найбільш сприятливих умов деформування металу з метою зниження напружень, що розтягують, у небезпечному перерізі.

Основні положення цієї роботи спираються на фундаментальні дослідження видатних учених, які зробили значний внесок у теорію та практику процесів листового штампування, теорію стійкості, а також у розвиток теорій пластичності та моделей феноменологічного руйнування матеріалів, зокрема: Аверкієва А. Ю., Алієва І. С., Бебріса А. А., Березкіна В. Г., Губкіна С. І., Головльова В. Д., Джонсона В., Деля Г. Д., Драгобецького В. В., Живова Л. І., Зібеля Е., Калюжного В. Л., Кудо Х., Михалевича В. М., Огороднікова В. А., Охрименко Я. М., Попова Е. А., Потекушина С. П., Титова В. А., Рея Р. І., Ренне І. П., Сівака І. О., Трішевського О. І., Фролова Е. А., Шофмана Л. А., Яковлева С. П., Wang X., Mori K., Luo J., Yan G. та інших видатних учених.

На підставі аналізу фізичних закономірностей протікання процесу витягування встановлено, що унаслідок зміни геометричних параметрів робочих частин витягувальних штампів можна домогтися значного впливу на процес інтенсифікації формозміни різних за конфігурацією деталей, поліпшити якість напівфабрикатів і підвищити стійкість штампів. Розробка технології повинна

базуватися на розрахунку дійсних напружень з урахуванням найважливіших технологічних чинників – змащення, геометрія витягувальних штампів, обладнання, механічні властивості металу заготовки.

Встановлено, що небажане під час витягування явище втрати стійкості фланця у вигляді утворення гофрів використовується для збільшення коефіцієнта витягування завдяки їх розгладженню під час деформації. Однак це вимагає створення складних штампів із застосуванням обертових і пульсуючих притискачів, що істотно позначається на ціні кінцевого виробу і не застосовується в умовах дрібносерійного й одиничного виробництва. Але ці технічні рішення доводять принципову можливість створення сприятливих умов витягування, використовуючи природну втрату стійкості заготовки, що дає можливість намітити основні шляхи та завдання наукових досліджень.

Відшукування науково обґрунтованих прийомів корисної реалізації втрати стійкості фланцевої частини заготовки стало підґрунтям цього наукового дослідження.

У другому розділі викладені методи теоретичних та експериментальних досліджень, описане використане обладнання, апаратура та пристрої, досліджувані матеріали і штампувальне оснащення.

Для теоретичного визначення поля напружень у матеріалі заготовки на витяжному ребрі матриці виходили з безмоментної теорії оболонок і гіпотез Кірхгофа-Лява. Схематизація осередку деформації здійснювали завдяки відділенню прямолінійних ділянок фланця і стінок від заокругленої поверхні напівфабрикату. Розглядали рівняння рівноваги для тора з осьовою симетрією. Розв'язання виконували методом прямого інтегрування спрощених рівнянь рівноваги спільно з умовою пластичності за гіпотезою сталості максимальних дотичних напружень.

Розв'язання рівняння рівноваги для круглої пластинки, яке представляє рівняння Бесселя, виражали в Бесселевих функціях першого роду. Це дало можливість визначити критичну товщину заготовки, за якої починається втрата стійкості з виникненням складок, і виявити чинники технологічного процесу, що впливають на хвилястість у фланці заготовки. Для встановлення зв'язку анізотропії з втратою стійкості на фланці заготовки виходили з умови пластичності анізотропного металу Р. Хілла.

Для опису пластичного стану деформованого металу під час знакозмінного навантаження використовувалася модель Г. Бакхауза, згідно з якою компоненти координат центру поверхні навантаження під час деформації зворотного знаку дорівнюватимуть нулю. Це означає, що за такої історії навантаження метал зміцнюється ізотропно. З огляду на це, для металів з анізотропним зміцненням реалізований ефект відновлення ізотропії властивостей, але вже поліпшених їх механічних характеристик.

Для експериментального встановлення меж витягування без притискання використаний метод тензометрії з вбудованими тензодатчиками і ходовимірювачами у використовуваному обладнанні. Для визначення можливості витягування з кантуванням заготовки застосовувалися методи прямих вимірів за допомогою стандартного вимірювального інструмента. Товщину зон напівфабрикату після кожного проходження вимірювали стандартним

товщиноміром-мікрометром. Метод тензометрування також використаний для вимірювання напружень тертя, що виникають між радіусом заокруглення матриці та напівфабрикатом під час витягування. При цьому залучена вимірювальна апаратура, що пройшла метрологічний контроль.

Обробка результатів дослідних даних, їх порівняння з теоретичними проводилося за стандартною методикою згідно з ДСТУ 8.207-86, а також теорією планування експерименту і математичною статистикою. Відтворюваність експериментальних даних перевірялася за критерієм Кохрена, перевірку гіпотези адекватності математичного моделювання дослідним даним проводили за допомогою F-критерію Фішера при рівні значущості $q = 0,05$.

У третьому розділі на підставі аналізу фізичної моделі осередку пластичної деформації на заокругленій кромці матриці під час витягування заготовки в отвір матриці вперше встановлені закономірності розподілу поля напружень на тороподібній ділянці напівфабрикату. Такі співвідношення необхідні для обліку розподілу контактних напружень під час штампування без притискання, коли контакт металу й інструменту здебільшого здійснюється за радіусом заокруглення матриці. Для реалізації розв'язання спрощених рівнянь рівноваги при цьому виходили з припущень безмоментної теорії оболонок і гіпотез Кірхгофа-Лява, розглядаючи рівняння рівноваги для тора з осью симетрії. Інтегрування рівнянь рівноваги спільно з умовою пластичності дозволило отримати формулу для визначення величини меридіональних напружень у функції кута охоплення металом кромки матриці.

Оскільки заготовка деформується осесиметрично, то доданок, що містить $\sin \varphi$, можна опустити. Також формула спрощується, коли кут охоплення заготовкою округленої кромки матриці досягає значення $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\sin \theta = 1$, при цьому меридіональні напруження будуть мати максимальні значення:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s \left(\ln \frac{R_3}{R_{\text{Д}} + r_m} - \frac{r_m}{R_{\text{Д}} + r_m} \right). \quad (1)$$

З рівняння пластичності знаходили формулу для визначення величини тангенціальних напружень σ_{θ} у функції кута охоплення θ :

$$\sigma_{\theta} = -\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_3}{R_{\text{Д}} + r_m} + \frac{r_m}{R_{\text{Д}} + r_m} \sin \theta \right). \quad (2)$$

Порівняння результатів розрахунку величини меридіональних напружень (формула (2)) від зміни радіуса заокруглення матриці з відомою формулою

Попова Е. А. $\Delta \sigma_{\rho} = \frac{s}{2r_m + s} \sigma_s$ показало (рис. 1, а), що меридіональні напруження

розтягування під час підходу до кромки матриці не збільшуються стрибкоподібно, а плавно зростають і змінюються на витяжному ребрі за законом синуса. Із зростанням величини радіуса заокруглення вхідної кромки матриці, максимальні розтягуювальні напруження зменшуються, але з меншою інтенсивністю, ніж у разі зменшення діаметра виробу. Дане співвідношення розкриває таку закономірність:

при однакових коефіцієнтах витягування збільшення напружень, що розтягують на витяжному ребрі матриці, буде великим у того напівфабрикату, у якого діаметр готового виробу більше.

Як видно з графіків, розрахункові дані мають той самий порядок, а в деяких точках збігаються, що говорить про хорошу кореляцію порівнюваних співвідношень.

Однак формула (1) не включає в себе члени, що містять товщину заготовки, а це не повною мірою відображає фізичну природу пластичної деформації під час витягування. Тому отриману залежність уточнювали, інтегруючи рівняння рівноваги для тора спільно з умовою пластичності та з урахуванням поверхневого навантаження q . Під час впливу на тор навантажень з втратою стійкості у вигляді утворення випинів, її представляли у вигляді:

$$q = \frac{2\sigma_s}{9\left(1 - \frac{D}{D_0}\right)} \left(\frac{s}{r_m}\right)^3, \quad (3)$$

де s – товщина заготовки [мм]; D і D_0 – діаметр деталі та заготовки відповідно [мм]; σ_s – межа плинності металу [МПа].

Підставляли це співвідношення у формули для внутрішніх зусиль і, використовуючи принцип суперпозиції, а також провівши нескладні перетворення, остаточно залежності для розрахунку меридіональних і тангенціальних напружень на радіусі заокруглення матриці при $\theta = 90^\circ$ мали вигляд:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left(\ln \frac{R_3}{R_D + r_m} - \frac{r_m}{R_D + r_m} + 0,1 \frac{R_3}{R_3 - R_D} \left(\frac{s}{r_m}\right)^2 \right), \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = -\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_3}{R_D + r_m} + \frac{r_m}{R_D + r_m} + 0,22 \frac{1 + \frac{k}{2}}{1 + k} \frac{R_3}{R_3 - R_D} \left(\frac{s}{r_m}\right)^2 \right), \quad (5)$$

де $k = \frac{a}{R}$.

Порівняння розрахункових даних за залежностями (1) і (4), а також за залежністю Попова Е. А. наведено на рис. 1, б.

Як видно з графіків, величина приросту напружень зі зменшенням радіуса заокруглення матриці за уточненою залежністю в 2 рази більша при $r_m = 2$ мм і збігається з розрахунком Попова Е. А. при $r_m = 10$ мм, що говорить про достатню точність отриманої формули. Однак вона більш громіздка, але повніше розкриває закономірності зміни меридіонального напруження під час витягування циліндричної деталі.

На підставі подань про фізичну модель стійкості фланцевої частини заготовки і розв'язання рівнянь рівноваги для круглої пластинки у функціях Бесселя була отримана формула для граничної товщини заготовки, що забезпечує штампування без складкоутворення.

$$s^2 = 0,017r_h^2 \left(1 - \frac{r}{r_h} \right) \ln \frac{r_h}{r}, \quad (6)$$

де r_h – зовнішній радіус фланця [мм]; r – зовнішній радіус деталі [мм].

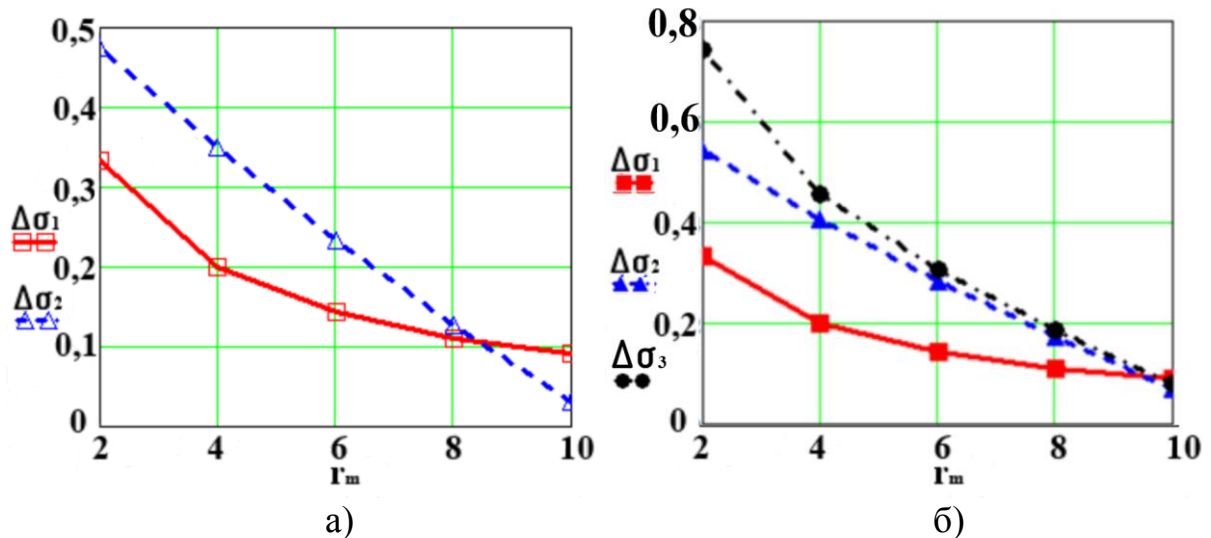


Рис. 1 – Залежність додаткових меридіональних напружень від зміни радіуса закруглення матриці: а – $\Delta\sigma_1$ – приріст меридіональних напружень за залежністю (Попова Е. А.), МПа ($\Delta\sigma_1\sigma_s$); $\Delta\sigma_2$ – приріст меридіональних напружень за залежністю (1), МПа ($\Delta\sigma_2\sigma_s$); б – $\Delta\sigma_1$ – приріст меридіональних напружень за залежністю (Попова Е. А.), МПа ($\Delta\sigma_1\sigma_s$); $\Delta\sigma_2$ – приріст меридіональних напружень за залежністю (1), МПа ($\Delta\sigma_2\sigma_s$); $\Delta\sigma_3$ – приріст меридіональних напружень за залежністю (4), МПа ($\Delta\sigma_3\sigma_s$)

Значення, обчислені за цією залежністю, виходять завищеними порівняно з емпіричними рекомендаціями Шофмана Л. А., але вони дозволяють достовірно оцінювати ті чинники, що впливають на процес деформування і складкоутворення.

Необхідність урахування зміцнення й анізотропії заготовки під час розрахунку поля напружень і деформацій, а також під час визначення інтервалів штампування без притискання, пов'язана з великим наближенням до фізичної сутності деформування листового металу й отриманням більш точних теоретичних моделей. Тому аналітичну залежність (6) уточнювали, покладаючись на теорію пластичності анізотропного тіла Р. Хілла. З урахуванням припущень було отримано співвідношення для товщини заготовки, що усуває втрату стійкості фланця:

$$s^2 = 0,0045r_h^2 \frac{2 + R_0}{1 + R_0} \left(1 - \frac{r}{r_h} \right) \sqrt{\frac{2(1 + R_0)}{1 + 2R_0}} \ln \frac{r_h}{r}, \quad (7)$$

де – $R_x = R_y = R_0$ – початкова анізотропія для металу з круговою симетрією.

Аналізуючи формулу (7), можна зробити висновок, що збільшення показника анізотропії від 0,5 до 2 зменшує критичну товщину заготовки. Фланець напівфабрикату з матеріалу з великим показником R_0 буде більш стійкий під час деформації. Це збігається з висновками Головлєва В. Д. і Жаркова В. А., де

показано, що із збільшенням показників анізотропії, опірність деформації фланця зменшується і граничний ступінь витягування збільшується. Однак плоска анізотропія загалом негативно позначається на процесі деформації та погіршує умови формоутворення. При цьому товщина заготовки повинна бути збільшена в 1,6–2 рази порівняно з деформацією ізотропного металу. Порівняння результатів, отриманих за залежністю (7) з емпіричною умовою втрати стійкості Шофмана Л. А. $D - d \leq (18 \div 22)s$, показує, що врахування анізотропії металу заготовки дозволяє більш точно відшукати критичну товщину. Розбіжність результатів складає не більше 8,5 %.

Прагнення інтенсифікувати штампування без притискання фланця заготовки зумовило створення нового способу деформування з поетапним розтягуванням фланця заготовки з гофрами. В основу теоретичного обґрунтування способу була покладена модель пластичного стану деформованого металу Бакхауза Г., згідно з якою компоненти координат центру поверхні навантаження визначатимуться за формулою:

$$\alpha_{ij} = \frac{1 - \beta(e)}{3} \sigma_0(e) \frac{d\varepsilon_{ij}}{e} - \frac{1}{3} \int_0^e [1 - \beta(e^*)] \sigma_0(e^*) \phi(e - e^*) \frac{d^2 e_{ij}}{de^{*2}} de^*, \quad (8)$$

де $\sigma_0(e)$ – інтенсивність напружень, що є функцією накопиченої деформації e ; $de = \sqrt{2de_{ij}de_{ij}}/3de$ – приріст накопиченої деформації; $d\varepsilon_{ij}$ – компоненти збільшень пластичних деформацій; e^* – змінна інтегрування; $\beta(e)$ – параметр, що характеризує ефект Баушінгера; $\phi(e - e^*)$ – спадкова функція (або функція «пам'яті» матеріалу), що відображає властивості металу запам'ятовувати історію попереднього навантаження.

Ця модель враховує незалежність функцій $\sigma_0(e)$, $\beta(e)$, $\phi(e)$ від виду напруженого стану та історії навантаження і вони розглядаються як використовувані в моделі характеристики матеріалу.

На підставі рівності $\alpha_{ij} = 0$, з урахуванням аналізу деформованого стану Хваном Д. В. отримано рівняння для визначення деформації ε_2 , при якому матеріал знову стає ізотропним за механічними властивостями, наприклад, за умовною межею плинності:

$$[1 - \beta(e_2)]\sigma_0(e_2) = [1 - \beta(e_1)]\sigma_0(e_1)\phi(e_2 - e_1). \quad (9)$$

Отже, використовуючи цей зв'язок між знакозмінними деформаціями, встановлюється залежність розмірів деталі, що виготовляється, від кількості кантівок, початкового діаметра заготовки і механічних характеристик металу.

З аналізу співвідношення (9) встановлено, що під час попередніх деформацій має місце залежність $\varepsilon_2 = \varepsilon_1(f)$, яка представляється лінійною функцією:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \Delta\varepsilon, \quad (10)$$

де $\Delta\varepsilon$ – приріст накопиченої деформації під час зворотного деформування, що забезпечує ефект ізотропного зміцнення.

У розгорнутому вигляді вираз (10) можна записати

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{[1 - \beta(\varepsilon_2)]\sigma_0(\varepsilon_2)}{[1 - \beta(\varepsilon_1)]\sigma_0(\varepsilon_1)}. \quad (11)$$

Співвідношення (11) дає можливість визначити деформацію, яку необхідно надати заготовці після кантування її на 180° , щоб отримати ізотропію механічних властивостей (наприклад, відновлення межі плинності) для недеформованої заготовки. Це зі свого боку дасть можливість надати заготовці, яка повернута на 180° , велику деформацію зворотного знаку, а загалом після декількох поворотів отримати деталь заданої висоти.

У **четвертому розділі** наведено методику проведення і результати експериментальних досліджень щодо витягування циліндричних деталей без притискання фланця заготовки.

Під час теоретичного аналізу була отримана формальна залежність для розрахунку питомого зусилля, що забезпечує витягування за заданими геометричними характеристиками заготовки, оснащення та деталі. Підставою для його оцінки слугували формальні залежності для обчислення меридіональних і тангенціальних напружень, що виникають на радіусі заокруглення матриці під час витягування деталі без притискання фланця (4), (5). Отже, перевірка адекватності цього виразу дозволяє дійти висновку також про правомірність виразів для визначення напружень.

Досліди проводилися на розривній машині типу УМЕ-10ТМ зусиллям 10 тс. Експериментальне оснащення являло собою матрицю з обмежувачами з вхідним отвором, рівним 50 мм, і набір пуансонів (рис. 2) діаметрами 49,3 мм; 46,4 мм; 49 мм, що забезпечують витягування заготовок без стоншення стінки зі сталі 08 кп товщиною 0,15 мм, з алюмінію А6 товщиною 1,4 мм і міді М1 – 0,25 мм. Матриця встановлювалася на нижню траверсу розривної машини, змінні пуансони – на верхню, обидві траверси забезпечені затискними елементами.

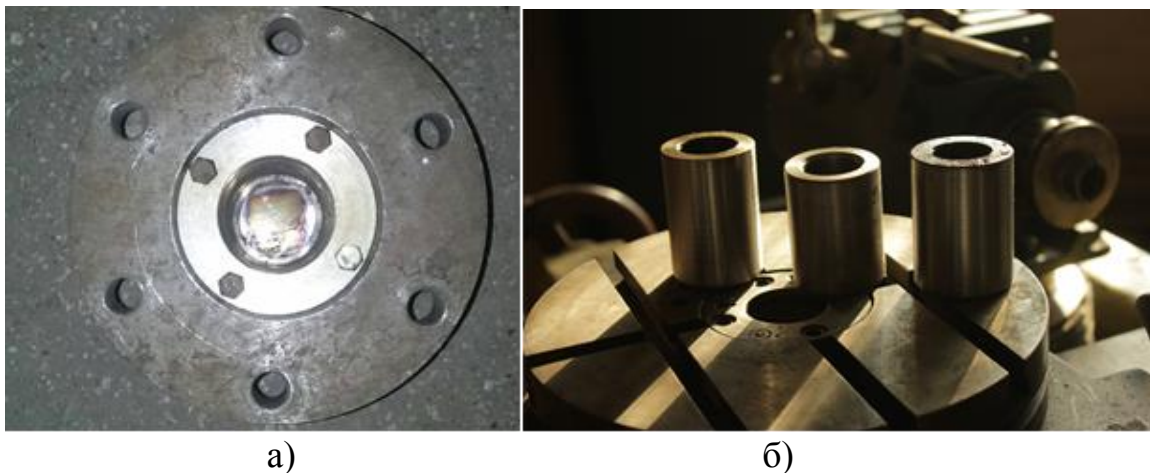


Рис. 2 – Експериментальне оснащення: а – матриця без верхніх накладок; б – змінні пуансони

До спеціального оснащення належали матриця зі вставкою для витяжного радіуса, що має можливість зміщуватися в напрямку руху пуансона під час витягування, та пуансон звичайної конструкції (рис. 3).

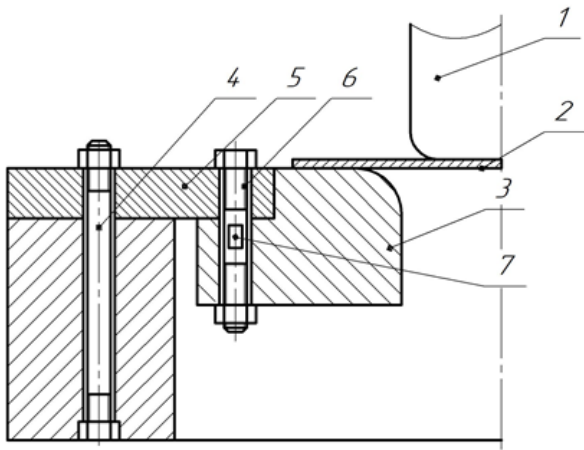


Рис. 3 – Оснащення для вимірювання напружень тертя на радіусі заокруглення витяжної матриці: 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – рухома вставка; 4 – кріпильний болт; 5 – сполучне кільце; 6 – месдоза; 7 – тензорезистор

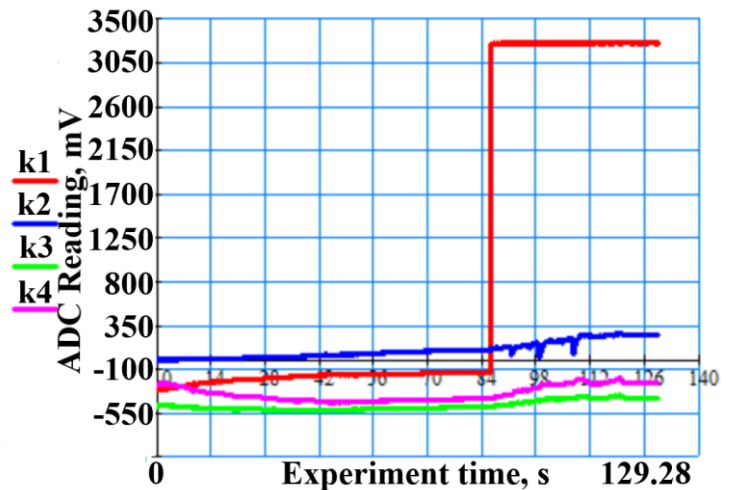


Рис. 4 – Типовий графік вимірювання деформацій месдозы:

- k1 – перша месдоза (обрив);
- k2 – друга месдоза;
- k3 – третя месдоза;
- k4 – четверта месдоза

Установка для вимірювання деформацій месдозы являла собою тензометричний операційний підсилювач МСР606-І/Р, АЦП Е14-440, блок живлення АХ-1803D і персональний комп'ютер Pentium 4 CPU 2,40 GHz 1,0 ГБ ОЗУ. Деформації месдозы, викликані силами тертя під час витягування, визначали деформації тензорезистора, який включений в мостову схему без компенсації температурних напружень, що зі свого боку викликало зміну опору резистора і струму в колі. Коливання струму посилювалися операційним підсилювачем і передавалися на АЦП. Для визначення коефіцієнта тензочутливості тензорезисторів виконували їх тарування за стандартною методикою.

Отже, вимірювався контактний тиск, що виникає між півсферичною поверхнею матриці та заготовкою. Вимірювань зазнавали мінімум 16 заготовок для кожного металу і сплаву з різними коефіцієнтами витягування, радіусом заокруглення матриці $r_m = 4 \text{ мм}$ і $r_m = 1,5 \text{ мм}$, без змащення поверхонь заготовки й інструмента. Водночас фіксувалася глибина ходу пуансона – зростання зусилля, різке зростання зусилля як ознака виникнення гофрів, що ускладнюють процес витягування плоскої заготовки в отвір матриці. За результатами вимірювань наведені типові графіки напруга АЦП-час (рис. 4) і складена таблиця 1. Також деякі дослідні дані зображені на рис. 7.

Результати експериментальних досліджень показали, що найбільший збіг з теорією становить 6,7 % для витягування з $k=1,12$ і $r_m = 1,5 \text{ мм}$ для міді. Зокрема, найбільша розбіжність результатів спостерігається під час витягування заготовок зі сталі та міді з радіусом заокруглення матриці 4 мм, що очевидно пов'язано з вибором радіуса заокруглення матриці. Для використовуваних товщин металу в дослідах він занадто великий, оскільки виходить за межі рекомендацій технічної

літератури – $r_m = (8 \div 10)s$. Найкращий збіг результатів теоретичних і експериментальних досліджень, що не перевищує 20 % (за винятком витягування міді, $k=1,04$, $r_m = 1,5$ мм), показали дані для всіх металів з $r_m = 1,5$ мм.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень вимірювання контактних тисків

Матеріал	Параметри деформування					Контактний тиск	Розрахунковий контактний тиск	Δ , %
	s, [мм]	D ₀ , [мм]	k	r _m , [мм]	h, [мм]			
Сталь 08кп	0,15	58/52	1,16/1,04	4/1,5	8,0/6,0	58,04/38,55	17,25/46,0	71,3/17,2
		66/54	1,32/1,08	4/1,5	8,0/6,02	94,34/55,33		81,7/16,9
		74/56	1,48/1,12	4/1,5	8,1/6,01	133,30/57,02		87,1/19,4
Алюміній А2	1,4	58/52	1,16/1,04	4/1,5	8,2/6,1	27,25/46,26	42/56	35,1/17,4
		66/54	1,32/1,08	4/1,5	8,3/6,02	37,54/48,93		10,6/12,6
		74/56	1,48/1,12	4/1,5	8,0/6,04	46,08/51,76		8,7/7,5
Мідь М4	0,25	58/52	1,16/1,04	4/1,5	8,0/6,05	21,14/17,47	10/26,6	52,3/34,3
		66/54	1,32/1,08	4/1,5	7,9/6,05	34,24/21,18		70,5/20,3
		74/56	1,48/1,12	4/1,5	7,95/6,0	43,15/24,81		76,7/6,7

Примітка: у чисельнику значення діаметра, коефіцієнта витягування, ходу пуансона, значення контактного тиску, які належать до варіанта витягування з радіусом заокруглення матриці $r_m = 4$ мм; у знаменнику – теж для $r_m = 1,5$ мм; Δ ,% – відхилення дослідних даних від теоретичних.

Експериментально досліджували адекватність залежності (7) для визначення граничної товщини заготовки. Досліди проводилися також на розривній машині УМЕ-10ТМ. Їм піддавалися партії заготовок зі сталі 08кп товщиною 1,4, 1,0, 0,6 мм; алюмінію А2 – 1,4, 1,0, 0,6 мм і міді М4 – 1,4, 1,0, 0,6 мм. На рис. 5 показано оснащення для проведення дослідів, а на рис. 6 – деякі напівфабрикати після деформування. Для кожного випробовуваного металу певної товщини розраховувалися граничні діаметри заготовок за виразом (7) і приймалися для дослідів як основний нульовий рівень.

Як відгук у цьому експерименті брали кількість гофрів z , що виникають під час втрати стійкості фланцевої частини заготовки. Здійснювали однаковий для всіх заготовок хід пуансона, рівний $h = r_n + r_m = 5 + 4 = 9$ мм, який фіксувався за відліком переміщення розривної машини. До числа чинників, що впливають на втрату стійкості у вигляді гофроутворення, належали радіус і товщина заготовки, а також коефіцієнт анізотропії R_0 .

Для зменшення обсягу даних експерименту проводили дробовий факторний експеримент (ДФЕ) типу 2^{k-P} . Водночас встановлювалися ортогональні ротатабельні плани з рандомізацією послідовності проведення дослідів при паралельного їх

повторення $m=4$ рази. Це дало можливість зменшити кількість обчислень і похибку оцінки істинного значення відгуку в \sqrt{m} разів. Остаточна регресійна залежність мала вигляд

$$z = 0,3r_n - 2(s + R_0) - 5, \quad (12)$$

яка дозволяла визначити кількість гофрів, що виникають під час витягування без притискання фланця заготовки в діапазоні вхідних параметрів: $30 \leq r_n \leq 50$; $0,6 \leq s \leq 1,4$; $0,5 \leq R_0 \leq 1,7$.

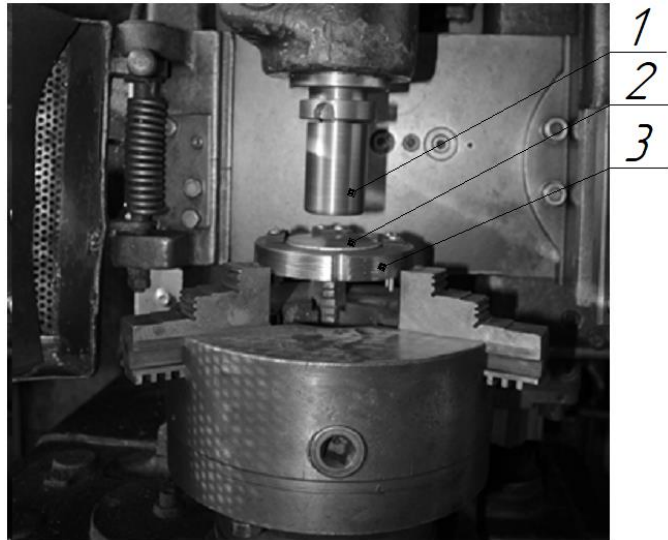


Рис. 5 – Оснащення для витягування без притискання фланця:
1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матриця

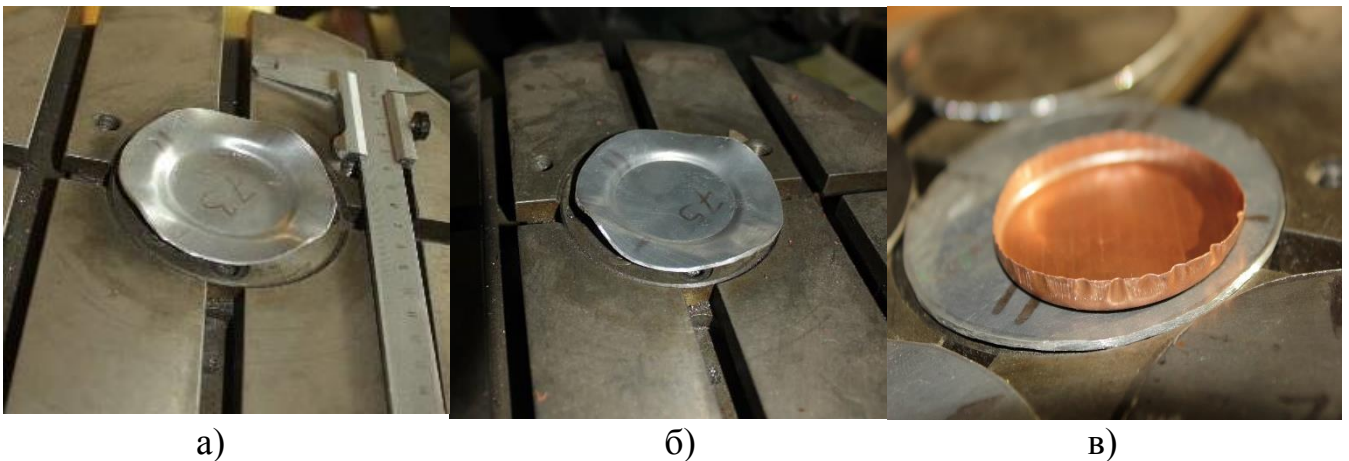


Рис. 6 – Напівфабрикати після введення пуансона в заготовку:
а – сталеві заготовки (08кп) $D_3 = 100$ мм, $s = 1,0$ мм; б – алюмінієві заготовки (А2) $D_3 = 100$ мм, $s = 1,4$ мм; в – мідні заготовки (М4) $D_3 = 60$ мм, $s = 0,6$ мм

Аналізуючи цей вираз, можна зробити висновок, що суттєвий вплив на втрату стійкості фланця під час витягування в цьому інтервалі розмірів має радіус заготовки, оскільки сума, що стоїть у дужках, менша останнього на порядок.

Для визначення товщини заготовки прирівнюємо до нуля кількість гофрів, що виникають $z = 0$ і матимемо

$$s = 0,15r_n - R_0 - 2,5. \quad (13)$$

На графіках (рис. 7, а, б) зображено розподіл товщини заготовки залежно від початкового діаметра при незмінних анізотропії та коефіцієнті витягування, а також при зміні коефіцієнта анізотропії. Радіус готової деталі $r = 25$ мм.

З графіка можна зробити висновок (рис. 7, а), що зростання товщини заготовки найбільше за рівнянням (13), але значення цього параметра несуттєво відрізняються від результатів, отриманих за аналітичною залежністю (7), що підтверджує адекватність самого співвідношення (7). У разі наближення прямих до радіуса заготовки 40 мм вони починають розходитися, але результати залишаються практично однаковими. Найбільша розбіжність графіків спостерігається між експериментом та емпіричною умовою стійкості в області кінця інтервалу дослідження і становить близько 20 %.

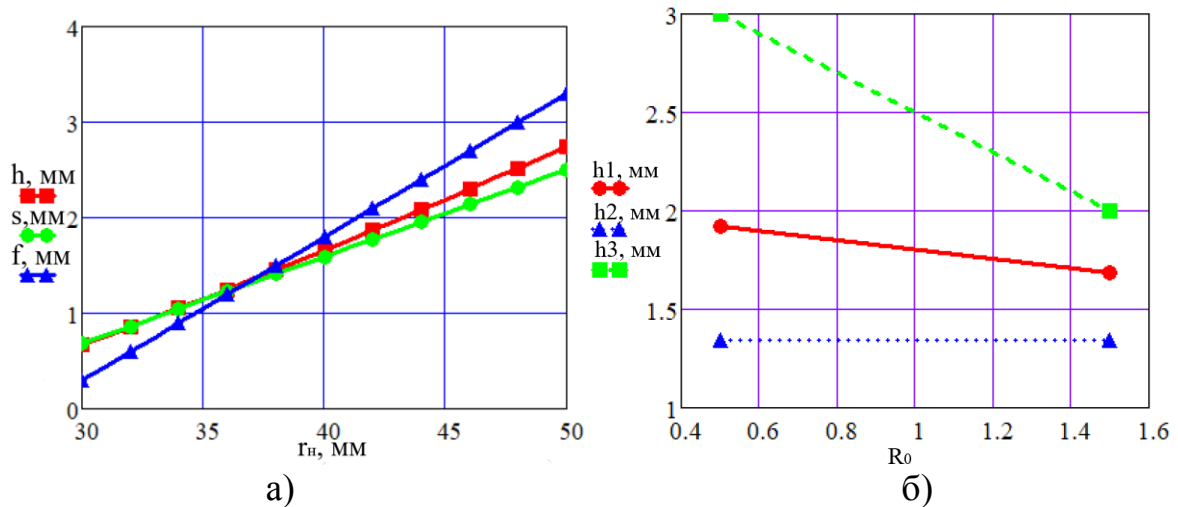


Рис. 7 – Зміна товщини заготовки в залежно від радіуса та коефіцієнта анізотропії: а – залежність товщини від радіуса заготовки (h – товщина заготовки, розрахована за залежністю (7); s – товщина заготовки, розрахована за формулою Шофмана Л. І.; f – товщина заготовки, отримана за рівнянням регресії (13); б – залежність товщини від зміни коефіцієнта анізотропії (h_1 – за залежністю (7); h_2 – за залежністю (6) без урахування анізотропії; h_3 – за рівнянням регресії (13)

Для перевірки можливості отримання якісних деталей витягуванням без притискання піддавалися заготовки зі сталі 08 кп, алюмінію А2 і міді М4. Діаметри заготовок для сталі 08 кп – 77, 80, 83 мм, товщина – 1,2 мм, діаметр пуансона – 46,8 мм. Для алюмінію – діаметри заготовок рівні 83, 86, 89 мм, товщина – 1,4 мм, діаметр пуансона – 46,4 мм. Для міді – 58, 61, 64 мм, товщина заготовки – 0,25 мм, діаметр пуансона – 49 мм. Для всіх типорозмірів заготовок діаметр вхідного отвору матриці дорівнював 50 мм. Радіус заокруглення матриці для всіх дослідів вибирався однаковим і дорівнював 5 мм, радіус заокруглення пуансона для всіх дослідів – 4 мм. На рис. 8 показані етапи витягування з кантуванням заготовки. У таблицю 2 зведені результати експерименту для всіх діапазонів розмірів заготовок.

Як видно з таблиці, деталі з алюмінію та сталі вдалося отримати мінімум за 6 кантівок. Кількість кантівок залежить від діаметра заготовки та коефіцієнта витягування. Чим більше діаметр і менше коефіцієнт витягування, тим більше число

переворотів заготовки необхідно до отримання нормальної деталі. Більш пластичний метал, у даному випадку алюміній, порівняно зі сталлю вимагає менше число переходів за однакових початкових параметрах і коефіцієнті витягування.

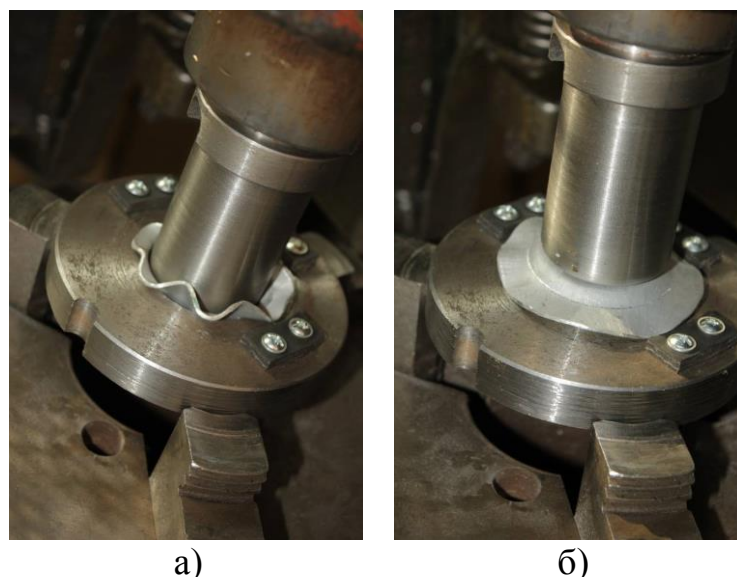


Рис. 8 – Витягування з кантуванням заготовки (матеріал – алюміній А2; діаметр заготовки – $D_{заг} = 86$ мм): а – прямий хід пуансона (4-е кантування заготовки); б – зворотній хід пуансона (5-е кантування заготовки)

Таблиця 2 – Результати дослідів з витягування з поетапним розтягненням фланця

Матеріал заготовки	$D_{заг}$, мм	$m = \frac{d_{дет}}{D_{заг}}$	Висота деталі / кількість кантівок мм/шт.	Перший хід пуансона/ добувка під час реверса, мм	Відношення товщин деталі та заготовки в характерних зонах $s_{\delta}/s_{заг}$	Примітка
Мідь М4	58	0,86	4,2/4	1,2/0,5	0,99;0,96;0,98;0,89;0,88	якісна складки на торці втрата стійкості дна
	61	0,82	–	–	–	
	64	0,78	–	–	–	
Сталь 08кп	77	0,65	16,2/6	5,5/2	0,94;0,84;0,89;0,83;0,81	якісна
	80	0,625	17,5/6	5,5/2	0,92;0,79;0,86;0,79;0,79	якісна
	83	0,60	19,8/8	5,6/2	0,92;0,79;0,84;0,77;0,76	якісна
Алюміній А2	83	0,60	20,1/6	6,5/2,5	0,92;0,8;0,86;0,79;0,77	якісна
	86	0,58	22,1/8	6,5/2,5	0,94;0,77;0,84;0,77;0,76	якісна
	89	0,56	24,4/8	6,5/2,5	0,93;0,77;0,86;0,76;0,75	якісна

Примітка: відношення товщини деталі та заготовки $s_{\delta}/s_{заг}$ таке: перша цифра – дно деталі / заготовка; друга цифра – стінка деталі / заготовка; третя цифра – радіус заокруглення від фланця до стінки / заготовка; торець фланця / заготовка; радіус

стінка-дно / заготовка. Дано усереднені співвідношення цих величин за результатами мінімум 15 замірів кожної зони всіх отриманих напівфабрикатів.

У п'ятому розділі подані науково обгрунтовані результати роботи у вигляді методів розрахунку технологічних параметрів витягування з поетапним розтягуванням фланця, а також удосконалено оснащення для здійснення штампування без притискання у виробничих умовах.

Запропонований метод розрахунку величини реверсних ходів пуансона, який дозволяє на підставі урахування ефекту Баушінгера в зоні насичення, апріорно визначати кількість кантівок заготовки, а також висоту кінцевого напівфабрикату, вести конструкторську і технологічну документацію, автоматизувати технологічну підготовку виробництва і прогнозувати продуктивність цього способу виготовлення деталей.

Наведені дві умови, які накладають обмеження для застосування методу витягування циліндричних деталей з кантуванням заготовки. Ці умови враховують механічні характеристики вихідного металу, накопичення ушкоджень під час пластичної деформації у вигляді ступеня використання ресурсу пластичності, а також основний технологічний чинник – коефіцієнт витягування, що надає досліднику необхідний набір даних для проектування технологічного процесу.

Розроблений технологічний процес виготовлення днища ресивера фільтрувальної установки для дробильноструменевих і дробометних камер методом поетапного розтягування фланця. В основу розробки покладено визначення граничної товщини заготовки, що забезпечує витягування без втрати стійкості фланця, а також розрахунок величини реверсних ходів пуансона. Заготовка являє собою коло діаметром 560 мм і товщиною 5 мм, маса заготовки – 9,7 кг, матеріал – сталь 08пс, діаметр готової деталі 420 мм. На рис. 9 наведено ескіз днища, на рис. 10 – проміжний напівфабрикат і готова деталь.

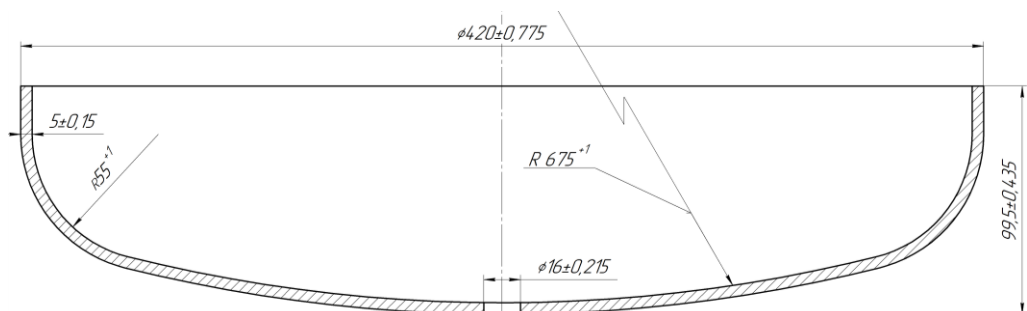


Рис. 9 – Деталь «днище» ресивера фільтрувальної установки для дробильноструменевих і дробометних камер

Продуктивність цього способу витягування значно поступається штампуванню в штампах з притисканням, проте простота оснащення дозволяє отримувати деталі без залучення додаткових коштів на оснащення і пресів подвійної дії.

Також було запропоновано проводити витягування днища барабана котла опалювального піролізного на ПАТ «Кременчуцький завод металевих виробів» на спрофільованій матриці з використанням телескопічного пуансона. У виробничому

процесі використовували два витягувальних переходи для отримання циліндричного виробу висотою 136,5 мм і діаметром 210 мм, товщина заготовки – 4 мм. Припуск під обрізання склав 3 мм, тобто загальна висота напівфабрикату – 139,5 мм. Застосовується заготовка діаметром 401 мм. Коефіцієнти витягування за переходами – $m_1=0,6$; $m_2=0,82$. Висота напівфабрикату після першої операції $h_1=107$ мм, після другої – $h_2=139,5$ мм.



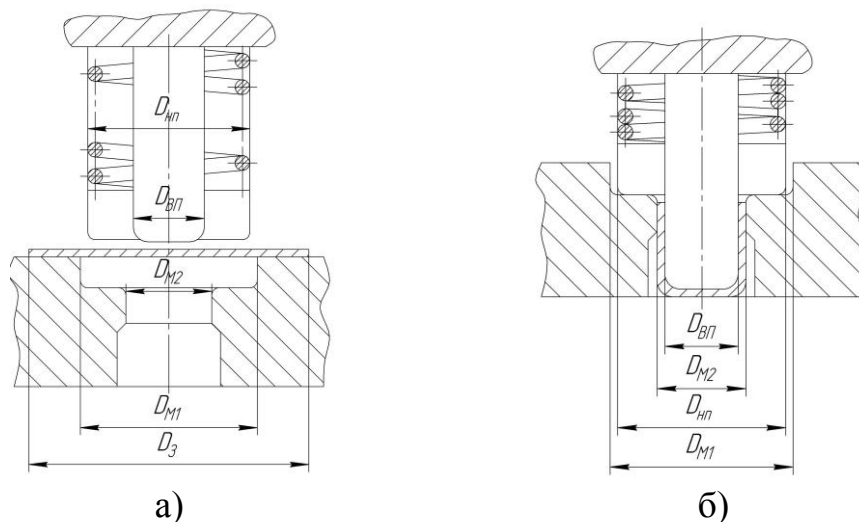
а)

б)

Рис. 10 – Етапи формоутворення деталі «днище» ресивера способом поетапного розтягнення фланця: а – проміжна стадія витягування; б – готова деталь

В основу впровадження покладено спосіб витягування циліндричних деталей у спрофільованій матриці.

На першому ступені витягування пуансон деформує заготовку за зовнішнім діаметром і, досягаючи дна першого ступеня, зовнішня частина зупиняється, а подальша деформація здійснюється внутрішньою основною частиною до отримання готового виробу, окрім того, під час зворотного ходу зовнішня частина пуансона займає своє початкове положення за допомогою пружин стискання, пересуваючись по спеціальних напрямних. На рис. 11, а зображено технологічне оснащення (телескопічний пуансон, спрофільована матриця і заготовка) до деформації. На рис. 11, б – на кінцевому етапі витягування.



а)

б)

Рис. 11 – Робота телескопічного пуансона: а – штампове оснащення до деформації; б – пуансон у кінці робочого ходу

Технологічні розрахунки дозволили перейти до конструювання та розрахунку штампового оснащення і силових пружин пуансона, що сприяло виготовленню якісної деталі, скороченню трудомісткості та вивільненню преса подвійної дії. Ці заходи дозволили в кінцевому підсумку знизити технологічну собівартість виробу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Науково-технічні розробки, проведені в роботі, спрямовані на розширення можливостей витягування циліндричних деталей без притискання фланця заготовки, збільшення ступеня деформації, розробку аналітичних залежностей, що дозволяють на етапах проектування технологічних процесів регулювати якість одержуваних деталей, що в сукупності дасть можливість розв'язання актуальних завдань економії матеріальних ресурсів та енергозбереження.

1. Витягування як один із способів холодного листового штампування є добре вивченим процесом, що підтверджується значною кількістю наукових праць і винаходів з цього питання. Розвиток технологій листового штампування, їх удосконалення як у нас в країні, так і за кордоном підтверджує інтерес дослідників до цієї галузі і перспективність цього напрямку обробки металів тиском. Сучасні способи та прийоми інтенсифікації процесу витягування доводять можливість удосконалення способу штампування без притискання фланця, який є більш економічним порівняно з витягуванням із складкотримачем з точки зору собівартості виготовлення деталей.

2. Теоретичні дослідження довели, що меридіональні напруження розтягнення під час підходу до радіуса матриці не збільшуються стрибкоподібно, а плавно зростають у міру охоплення металом кромки матриці та змінюються за законом синуса. Зі збільшенням величини радіуса заокруглення, максимальні розтягувальні напруження зменшуються, але з меншою інтенсивністю, ніж у разі зменшення діаметра виробу. Розкрита така закономірність: при однакових коефіцієнтах витягування збільшення напружень, що розтягують на витяжному ребрі матриці, буде більшим у того напівфабрикату, у якого діаметр готового виробу більше. Цього висновку можна було дійти раніше з наявних залежностей, але на практиці і в експериментах ця закономірність підтверджувалася.

3. Установлена аналітична залежність, яка дозволяє розраховувати граничну товщину заготовки для витягування без притискання, коли утворення складок не відбувається. Під час збільшення коефіцієнта витягування, межі плинності металу, початкового радіуса заготовки збільшується і товщина металу, який можна деформувати без притискання, а зі збільшенням ступеня зміцнення – товщина заготовки зменшується, що добре узгоджується з даними інших дослідників. Показано, що збільшення показника анізотропії від 0,5 до 2 зменшує критичну товщину заготовки. Фланець напівфабрикату з матеріалу з великим показником R_0 буде більш стійкий під час деформації. Однак плоска анізотропія загалом негативно позначається на процесі деформації та погіршує умови формоутворення. Водночас товщина заготовки повинна бути збільшена в 1,6–2 рази порівняно з деформацією ізотропного металу.

4. Витягування без притискання фланця заготовки спричиняє виникнення гофрів, а після її кантування і подальшого реверсного навантаження вони розпрямляються та механічні характеристики металу відновлюються. Але відновлення початкових характеристик металу, наприклад, межі плинності, відбувається після деформації зворотного знака, яка більша за модулем, ніж попередня їй деформація. Величина приросту реверсивної деформації залежить від відношення початкової межі плинності до межі плинності за певної деформації та величини параметра Баушінгера. Розкрита закономірність дозволяє принципово пояснити можливість виготовлення напівфабрикатів пропонованим способом і попередньо оцінити кількість кантівок під час витягування циліндричної деталі.

5. Результати експериментальних досліджень довели адекватність математичної моделі для розрахунку поля напружень на радіусі заокруглення матриці, найбільше співпадання з теорією становить 6,7 %. Адекватність теоретичної залежності для розрахунку товщини заготовки, що усуває втрату стійкості фланця, доведена експериментально в межах діапазонів розмірів $30 \leq r_n \leq 50$; $0,6 \leq h \leq 1,4$; $0,5 \leq R_0 \leq 1,7$. При цьому відтворюваність експериментальних даних підтверджена критерієм Кохрена при рівні значущості $\alpha=0,05$ ($G_{експ.} = 0,569 < G_{таб.} = 0,68$), адекватність регресійної моделі, розрахованої за дисперсії відтворюваності, підтверджена критерієм Фішера ($F_{експ.} = 1,105 < F_{0,05;2;12} = 3,89$). Найбільше відхилення спостерігається в кінці досліджуваного інтервалу і становить 12,5 %.

6. Проведений комплекс науково-технічних досліджень дозволив сформулювати загальні технічні рекомендації щодо вдосконалення процесів витягування без притискання фланця заготовки. Розроблено технологічний процес виготовлення днища ресивера фільтрувальної установки для дробильноструменевих і дробометних камер методом поетапного розтягування фланця на ТОВ НВФ «Техвагонмаш» (м. Кременчук). У результаті апробації та впровадження цього способу звільнено одне робоче місце та вивільнено гідравлічний прес подвійної дії моделі П4638А номінальним зусиллям 4000 кН. Розроблено технологію виготовлення днища нижнього барабана-забруднювача котла опалювального піролізного на ПАТ «Кременчуцький завод металевих виробів» (м. Кременчук), яка містила витягування днища барабана на спрофільованій матриці з використанням телескопічного пуансона. У результаті скоротилася трудомісткість виготовлення на 42 % і вивільнено прес подвійної дії. Річний сумарний економічний ефект склав 343 тис. грн.

Рекомендації з проектування технологічного процесу витягування з поетапним розтягуванням фланця, методи розрахунку граничної товщини заготовки, що усуває втрату стійкості, поля напружень на радіусі заокруглення матриці, умов, що забезпечують витягування з кантуванням заготовки впроваджені в навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

СПИСОК ОПУБЛІКУВАННЯ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці у наукових фахових виданнях України та інших держав та у виданнях України, які включені до міжнародних баз

1. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Пути управления полем напряжений в операциях листовой штамповки. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 4 (33). С. 100–104.
2. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Анализ условий формоизменения относительно толстолистовых заготовок с целью расширения возможностей процесса деформирования. *Вісник НТУ «ХП»*. Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХП», 2012. № 46 (952). С. 13–18.
3. Левченко Р. В., Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г. Исследование процесса одноуглового изгиба листовой заготовки с наложением дополнительного воздействия на очаг деформации с целью усовершенствования профилировочных машин. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2012. Вип. 1/2012 (72). Частина 1. С. 92–97.
4. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Определение геометрических параметров листовой заготовки для вытяжки осесимметричных деталей, устраняющих потерю устойчивости фланца. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). С. 118–123.
5. Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г., Гайкова Т. В. Анализ напряженно-деформированного состояния при локальном приложении нагрузки на цилиндрическую заготовку. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 4 (37). С. 102–106.
6. Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г. Выбор и обоснование методов теоретических исследований процесса деформирования осесимметричных заготовок. *Вісник НТУ «ХП»*. Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХП», 2013. № 43 (1016). С. 86–93.
7. Аргат Р. Г. Анализ конструкций инструмента для вытяжки цилиндрических деталей с целью усовершенствования их конструкций для интенсификации процесса. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*. Полтава: ПолтНТУ, 2013. Вип. 2 (37). С. 29–32.
8. Аргат Р. Г., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г. Теоретическое определение коэффициента трения в операциях вытяжки листовых заготовок. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2014. № 1 (38). С. 93–96.
9. Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г., Гайкова Т. В., Аргат Р. Г. Анализ методов интенсификации процессов вытяжки и профилирования листового материала с целью их применения в операциях радиально-ротационного профилирования замкнутых оболочек для совершенствования технологий колесного производства. *Технологические системы. Научно-технический журнал*. Киев: ООО «Компания «Индустриальные технологии», 2014. № 3 (68)/2014. С. 56–61.

10. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Распределение напряжений на вытяжном ребре матрицы при вытяжке цилиндрических заготовок. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Іноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. № 43 (1086). С. 8–13.

11. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015. № 1, P. 27–32.

12. Аргат Р. Г., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г. Классификация приемов по оптимизации сил контактного взаимодействия в технологических процессах изготовления деталей автомобилей листовой штамповкой и профилированием. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2015. № 2 (41). С. 211–216.

13. Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г. Измерение деформаций при моделировании радиально-ротационного профилирования ободьев колес методом тензометрирования. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Іноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 30 (1202). С. 63–68.

14. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4. No. 1 (82). P. 52–60.

15. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н., Гриценко Б.С. Учет влияния упрочнения на поле напряжений при профилировании и вытяжке листового материала. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 7 (1229). С. 5–9.

16. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 36 (1258). С. 5–9.

17. Puzyr R., Savelov D., Shchetynin V., Levchenko R., Haikova T., Kravchenko S., Yasko S., Argat R., Sira Y., Shchipkovskiy Y. Development of a method to determine deformations in the manufacture of a vehicle wheel rim. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. 2018. № 4/1 (94). P. 55–60.

Матеріали і тези конференцій

18. Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г., Гайкова Т. В., Аргат Р. Г. Анализ методов интенсификации процессов вытяжки и профилирования листового материала с целью их применения в операциях радиально-ротационного профилирования замкнутых оболочек для совершенствования технологий колесного производства. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 19–23 трав. 2014 р.)*. Київ: НТУ «ХПІ» ММІ, 2014. С. 28–29.

19. Аргат Р.Г., Пузырь Р. Г., Долгих О.Н. Определение напряжений при вытяжке цилиндрических заготовок. *Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: материалы VI междунар. науч.-техн. конф. (г. Харьков, 19–21 нояб. 2014 г.)*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. С. 10–11.

20. Gaikova T. V., Argat R. G., Puzyr R. G. Calculation of effort of clamp at extraction of details from sheet-metal. *East West Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences» Proceedings of the 3rd International scientific conference (July 30, 2014)*. Vienna. 2014. P. 89–94.

21. Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г. Влияние граничных условий на величину и распределение меридиональных напряжений в заготовке на радиусе закругления инструмента при профилировании замкнутых оболочек. *Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (м. Одеса, 22–25 черв. 2015 р.)*. Одеса-Київ, 2015. С. 57–58.

22. Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г., Гриценко Б. Г. Анализ аналитических выражений для определения компонент тензора напряжений на радиусе закругления матрицы при вытяжке цилиндрических полуфабрикатов. *Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. (м. Кременчук, 09–11 листоп. 2016 р.)*. Кременчук: КрНУ, 2016. С. 45–46.

23. Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г. Влияние толщины заготовки на возможность потери устойчивости при вытяжке. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: матеріали III всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, фахівців, аспірантів (м. Маріуполь, 11–12 трав. 2017 р.)*. Маріуполь: ПДТУ, 2017. С. 58.

24. Аргат Р.Г., Пузырь Р. Г., Долгих О.Н. Увеличение степени деформации при вытяжке цилиндрических деталей без прижима фланца. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: матеріали IX міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 22–24 листоп. 2017 р.)*. Харків: вид-во «Планета-Прінт», НТУ «ХПИ», 2017. С. 17.

25. Аргат Р.Г., Пузырь Р. Г., Щипковский Е. В. Разработка метода расчета усилий профилирования при производстве ободьев колес транспортных средств. *Технології та інфраструктура транспорту: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 14–16 трав. 2018 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 73–74.

Патенти України на корисну модель

26. Спосіб витягування циліндричних деталей в профільованій матриці: пат. 93705 Україна: МПК (2014.01) B26F 1/00. № 201405172; заявл. 16.05.14; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19. 4 с.

27. Спосіб витягування циліндричних деталей в спеціальній спрофільованій матриці пуансоном: пат. 107394 Україна: МПК (2016.01) B26F 1/00. № 201508823; заявл. 14.09.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 11. 4 с.

Особистий внесок автора у роботах, опублікованих разом зі співавторами:

[1, 2, 7, 9, 16, 18] – проведено аналіз умов витягування деталей та способів інтенсифікації процесу; [3, 5, 20, 21] – досліджено розподіл поля напружень при накладенні додаткового навантаження на осередок деформації; [4, 23, 24] – приведено теоретичне обґрунтування раціональних розмірів заготовки під час витягування без притискання; [6, 25] – обґрунтування методів теоретичних і експериментальних досліджень; [8, 12] – визначення методу врахування сил тертя між заготовкою і інструментом під час витягування; [10, 11, 13, 15, 17, 18, 22] – розробка математичної моделі розподілу напружень і деформацій під час витягування; [14] – постановка та проведення експериментальних досліджень зі статичною обробкою результатів; [26, 27] – розробка конструкцій штампного оснащення для витягування без притискання.

АНОТАЦІЯ

Аргат Р. Г. Удосконалення технології виготовлення циліндричних деталей витягуванням з поетапним розтягуванням фланця заготовки з гофрами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05. – процеси та машини обробки тиском. – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, МОН України, Кременчук, 2019.

Дисертація спрямована на розв’язання важливого науково-технічного завдання розвитку і вдосконалення технологічних процесів витягування циліндричних деталей з листових заготовок для забезпечення економії матеріальних і енергетичних ресурсів.

Розвинуто математичну модель розподілу деформацій та напружень на витяжному ребрі матриці, що дало змогу більш точно врахувати сили тертя між заготовкою та інструментом під час витягування без притискання, а також виявити основні чинники процесу, які впливають на розподіл поля напружень в осередку деформації.

Розроблено метод розрахунку інтервалів штампування без притискання на підставі рішення рівняння Бесселя. Це дало можливість визначити критичну товщину заготовки, за якої починається втрата стійкості з виникненням складок, і виявити чинники технологічного процесу, що впливають на хвилястість у фланці. При цьому запропоновано врахування початкової анізотропії, а також зміцнення металу заготовки.

Запропоновано новий спосіб витягування з поетапним розтягуванням фланця заготовки з гофрами на підставі ефекту Баушингера, отримано експериментальне підтвердження та впровадження цього способу. Розроблено метод розрахунку величини реверсних ходів пуансону, метод визначення геометричних розмірів заготовок і порядок поетапних технологічних розрахунків для нового способу витягування.

Ключові слова: витягування, листова заготовка, притиск, пуансон, напруження, деформації, втрата стійкості, гофри.

АННОТАЦИЯ

Аргат Р. Г. Совершенствование технологии изготовления цилиндрических деталей вытяжкой с поэтапным растяжением фланца заготовки с гофрами. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05. – процессы и машины обработки давлением. – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, МОН Украины, Кременчуг, 2019.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической задачи развития и совершенствования технологических процессов вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок для обеспечения экономии материальных и энергетических ресурсов, а также разработку практических рекомендаций по интенсификации способов холодной листовой штамповки, развитие методов расчета их основных параметров.

В работе проведен критический анализ установившихся подходов в теории и практике холодной штамповки, в результате которого были выявлены наиболее перспективные пути повышения эффективности технологических процессов изготовления цилиндрических деталей вытяжкой и проблемы в теоретических обоснованиях существующих математических моделей. Применение новых теоретических подходов к расчету напряженно-деформированного состояния участков заготовки в очаге пластической деформации в процессах листовой штамповки позволит выявить формально подтвержденные и ранее не обнаруженные факторы процесса и их комбинации, которые оказывают решающее влияние на возникновение брака.

Впервые установлены закономерности распределения поля напряжений на вытяжном ребре матрицы при вытяжке без прижима фланца заготовки, что позволило выявить ранее неучтенные факторы процесса и их сочетания, которые позволяют управлять величиной напряжений в очаге деформации, а также уточнить величину сил трения на вытяжной кромке заготовки. Усовершенствована физическая модель устойчивости сжато-растянутых участков фланца заготовки с учетом плоской анизотропии и изотропного упрочнения металла, что позволило аналитически определить интервалы геометрических размеров заготовок, устраняющих гофрообразование при вытяжке. Экспериментальная проверка дала высокое совпадение результатов.

Получила дальнейшее развитие формализованная модель пластического состояния деформируемого тела Г. Бакхауза относительно процесса вытяжки цилиндрических деталей без складкодержателя, где, учитывая эффект Баушингера, аналитически представлена принципиальная возможность осуществления вытяжки с поэтапным растяжением фланца заготовки. На основании данной модели разработан метод расчета реверсивных ходов пуансона, а также метод определения геометрических размеров заготовки.

Данный способ апробирован и внедрен в производство.

Разработан метод определения давлений на вытяжную кромку матрицы заготовкой, деформирующейся без прижима фланца, что обеспечило учет сил трения между инструментом и полуфабрикатом, также в работе приведен уточненный метод расчета усилия при штамповке без прижима, который необходим для проектирования штамповой оснастки для вытяжки телескопическим пуансоном.

Разработан метод определения толщины заготовки, которая устраняет потерю устойчивости фланцевой ее части. Данные расчеты дают хорошее совпадение результатов с экспериментом, а также с расчетными данными эмпирических зависимостей других исследователей, что подтверждает его работоспособность предложенного метода и его эффективность.

Сформулированы общие практические рекомендации для проектирования технологических процессов с применением вытяжки без прижима, направленных на увеличение степени деформации за счет применения комплекса научно обоснованных в работе мероприятий.

Результаты диссертационной работы в виде методов расчета и технических приемов использованы при решении ряда задач в условиях промышленных предприятий: ОАО «Кременчугский завод металлических изделий» (г. Кременчуг) и ООО НПФ «Техвагонмаш» (г. Кременчуг) и в Кременчугском национальном университете имени Михаила Остроградского.

Ключевые слова: вытяжка, листовая заготовка, прижим, пуансон, напряжения, деформации, потеря устойчивости, гофры.

ABSTRACT

Arhat R. G. Improvement of the technology of manufacturing of cylindrical parts by drawing with a stage-by-stage stretching of the workpiece flange with corrugations. – On the rights of the manuscript.

Thesis for the candidate degree in technical sciences, specialty 05.03.05. – Processes and Machines of a Pressure Treatment. – Kremenchuk Mikhail Ostrohradsky National University, Kremenchuk, 2019.

The thesis is aimed at solving an important scientific and technical task of the development and improvement of the technological processes of drawing cylindrical parts from sheet blanks to ensure the economy of material and energy resources.

A mathematical model of distribution of deformations and stresses on the drawing edge of the die has been developed, which made it possible to more accurately take into account the friction forces between the workpiece and the tool during the drawing without clamping as well as to identify the main factors of the process that influence the distribution of the stress field in the deformation zone.

A method of calculating the intervals of stamping without clamping on the basis of the solution of the Bessel equation is developed. This made it possible to determine the critical thickness of the workpiece, in which the loss of stability with the appearance of folds begins, and to identify the factors of the technological process that affect the wavelength in the flange. In this case, consideration is given to the initial anisotropy, as well as to the strengthening of the metal of the workpiece.

A new method of drawing with stage-by-stage sketching of a flange of a workpiece with corrugations on the basis of the Bauschinger effect is proposed, an experimental confirmation and implementation of this method is obtained. A method of calculating the reverse stroke length of the punch, a method for determining the geometric sizes of the blanks and the order of the stage-by-stage technological calculations for a new method of drawing are developed.

Key words: drawing, sheet blank, clamping, punch, stress, deformation, loss of stability, corrugations.

Підписано до друку 10.04.19. Формат 60x90/16. Папір друкарський.
Гарнітура Times New Roman Суг. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 1,25. Тираж 100 прим. Замовлення № 19305

Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20 мм. Кременчук, 39600