

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

АЛІЄВА ЛЕЙЛА ІГРАМОТДІНОВНА



УДК 621.7.011: 621.7.043: 621.777.4

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ І РОЗРОБКА
РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄМНОГО
ФОРМОУТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ СПОСОБІВ
КОМБІНОВАНОГО ДЕФОРМУВАННЯ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Краматорськ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА, м. Краматорськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Огородніков Віталій Антонович,
Вінницький національний технічний університет
(м. Вінниця), завідувач кафедри «Опір матеріалів та
прикладна механіка».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Долматов Анатолій Іванович,
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є.
Жуковського «ХАІ» (м. Харків), завідувач кафедри
«Технології виробництва авіаційних двигунів»;

доктор технічних наук, професор
Тітов Вячеслав Андрійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
ім. І. Сікорського», завідувач кафедри «Механіка
пластичності матеріалів і ресурсозберігаючих
процесів»;

доктор технічних наук, професор
Фролов Ярослав Вікторович,
Національна металургійна
академія України (м. Дніпро),
завідувач кафедри «Обробка металів тиском
ім. академіка О.П. Чекмарьова».

Захист відбудеться « 28 » березня 2018 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус).

Автореферат розісланий « 26 » лютого 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.01



Ю. К. Доброносів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Підвищення ефективності виробництва за рахунок розробки та освоєння нових наукоємних і ресурсозберігаючих технологій є однією із пріоритетних проблемних завдань, що стоять перед машинобудівними галузями промисловості. Серед інших велика увага приділяється питанням ресурсо- і енергозбереження, підвищення якості продукції та продуктивності, розширення технологічних можливостей процесів, що забезпечують конкурентоспроможність продукції в умовах ринкової економіки

Одним із шляхів вирішення зазначених проблем в галузях машинобудування є розробка комбінованих методів обробки металів тиском (ОМТ), які більш повно використовують можливості суміщених і додаткових силових і кінематичних впливів на заготовку, що обробляється пластичним деформуванням. Останнім часом безліч робіт присвячені вивченню питань використання можливостей додаткового силового впливу, зокрема, силами тертя, кручення, натягу або протитиску для інтенсифікації процесів обробки тиском.

Способи комбінованого деформування з активним керуванням пластичною течією матеріалу, з підвищеним ступенем свободи течії, зі збільшенням компоненти деформації зсуву, а також з поєднанням різних схем формоутворення знаходять все більш ефективне застосування в процесах кування, точного об'ємного штампування і видавлювання.

Доповнення традиційних схем поздовжнього видавлювання (зворотного і прямого) видавлювання способами поперечного (радіального і бічного) видавлювання відкриває нові можливості для комбінування цих схем і виготовлення деталей більш складних конфігурацій поздовжньо-поперечним видавлюванням за менше число технологічних переходів.

Незважаючи на високу ефективність, приклади освоєння способів комбінованого деформування і видавлювання обмежені. Це обумовлено тим, що в даний час недостатньо науково-обґрунтованих рекомендацій з проектування технологічних режимів і розробки інструментів, визначення меж придатності і оцінки технологічних можливостей способів комбінованого деформування, браком інформації про характер розвитку напружено-деформованого стану, по розрахунку і вибору силових і деформаційних режимів обробки, а також з оцінки та прогнозування параметрів формоутворення деталей при обробці з підвищеним ступенем свободи течії металу. Розв'язок даної проблеми нерозривно пов'язаний з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень, створенням і освоєнням нових способів комбінованого деформування, що забезпечують ефективне керування течією металу, створенням більш повноцінних і точних математичних моделей прогнозування формоутворення і технологічної деформованості металу і розробкою на їх основі методик проектування процесів об'ємного деформування.

Зважаючи на вищевикладене, науково-прикладна проблема вдосконалення процесів об'ємного пластичного формотворення на базі розвитку наукових основ,

методів моделювання та методик проектування технологій комбінованого деформування, є **актуальною**.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Результати роботи спрямовані на вирішення завдань, поставлених у Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року. Тема дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Новітні ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромислового комплексу» та відповідає науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методик аналізу закономірностей пластичного деформування» наукової школи «Обробка металів тиском» (ОМТ) Донбаської державної машинобудівної академії. Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), передбачених планами Міністерства освіти і науки України та виконаних на кафедрі ОМТ ДДМА (№ держреєстрації 0111U000883, 0113U000608, 0109U002664), а також в рамках договорів про співдружність з підприємствами і госпдоговірної науково-дослідної роботи з ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (договір Х-14-2013, № 0113U004776). Автор була відповідальним виконавцем при виконанні держбюджетних тем.

Мета дисертаційної роботи і задачі дослідження:

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності процесів об'ємного деформування на основі розвитку наукових основ, створення і застосування нових технологічних способів комбінованого деформування і розробки методик проектування ресурсозберігаючих технологічних процесів і оснащення.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і розв'язані задачі:

- проведення аналізу проблем і тенденцій розвитку технологій об'ємного пластичного формоутворення;
- систематизація та класифікація технологічних схем комбінованого деформування і видавлювання з урахуванням впливу на формозміну заготовки та технологічні режими силових і кінематичних впливів і умов деформування;
- розвиток методу кінематичних модулів (МКМ) для моделювання процесів комбінованого об'ємного деформування з декількома ступенями свободи пластичної течії матеріалу;
- розвиток методів оцінки технологічної деформівності заготовки в процесах пластичного деформування і їх застосування в технологічних задачах об'ємного пластичного формоутворення;
- розвиток наукових основ комбінованих способів об'ємного деформування, що включають теоретично і експериментально обґрунтовані залежності і комп'ютерні моделі для визначення енергосилових параметрів, прогнозування формоутворення і граничної деформівності металу заготовки, в тому числі, в умовах додаткових силових і кінематичних впливів в осередку деформації;
- вивчення закономірностей формоутворення і технологічних можливостей нових схем комбінованого деформування, розширення сфери їх застосування шляхом розробки нових рішень, що усувають обмеження, пов'язані з відхиленнями форми і руйнуванням деталей, а також граничними навантаженнями на інструмент;

- вдосконалення комбінованих способів деформування, розробка нових технологічних способів і інструментів, технічних рішень і технологічних процесів, що забезпечують розширення можливостей, підвищення якості деталей, зниження матеріальних і енергетичних витрат;

- підготовка результатів теоретичних і експериментальних досліджень і конструкторсько-технологічних розробок до практичного застосування. Розробка рекомендацій, методик проектування і впровадження результатів досліджень в практику промислового виробництва.

Об'єкт дослідження. Технологічні процеси і оснащення об'ємного пластичного деформування.

Предмет дослідження. Методи аналізу та закономірності формоутворення і розвитку технологічних режимів, вдосконалення способів комбінованого деформування, оцінка їх технологічних можливостей і деформовності заготовок.

Методи дослідження. Для досліджень використано комплексний метод, який включає проведення попередніх експериментів і моделювання на їх основі процесів об'ємного деформування з експериментальною перевіркою запропонованих рішень.

Теоретичні дослідження силового і деформаційного режимів процесів видавлювання проведені з використанням енергетичного методу верхньої оцінки (ЕМВО) і методу скінчених елементів (МСЕ). Для оцінки граничних можливостей формозміни використані феноменологічні критерії руйнування, в яких за міру граничної формозміни прийнята ступінь пластичної деформації.

Дослідження пластичної течії в технологічних схемах виконано методом фізичного моделювання. Експериментальні дослідження проводились з використанням методів тензометрування, ділильних сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу. Для оцінки точності отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи статистичної обробки дослідних даних. Механічні властивості визначені випробуванням зразків стандартними методами. Для оцінки умов контактного тертя використані спеціальні пристрої для вимірювання сил тертя безпосередньо в процесі холодного об'ємного деформування.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Отримав подальший розвиток* метод кінематичних модулів для математичного моделювання на основі енергетичного балансу потужностей, який *відрізняється* розробкою кінематичних модулів нових конфігурацій, встановленням та використанням їх властивостей, *що дає можливість* проведення оперативного аналізу силового режиму деформування і постадійного формоутворення деталей в процесах комбінованого деформування з декількома ступенями свободи витікання металу.

2. *Вперше* на основі аналізу експериментальних даних, проведених в камері високого тиску на зразках, що піддаються спільному крученню з розтягуванням, *встановлено*, що основний вплив на накопичення пошкоджень і їх заліковування надає не тільки схема напружено-деформованого стану, рівень накопиченої

деформації, але і швидкість зміни показників напруженого стану. *Суть новизни* полягає у встановленні факту суттєвого впливу на пластичність швидкості зміни показника напруженого стану, який запропоновано відобразити кривиною шляху деформування, представленого в координатах «показник напруженого стану – накопичена інтенсивність деформацій», що дає можливість встановити межі застосування феноменологічних критеріїв деформовності без руйнування в залежності від характеру напруженого стану.

3. *Вперше* на основі енергетичного методу верхньої оцінки із застосуванням вдосконалених кінематичних модулів розроблено комплекс математичних моделей процесів суміщеного комбінованого видавлювання порожнистих і стрижневих деталей з фланцем, використання яких дозволяє встановити енергосилові режими осесиметричних процесів радіально-зворотного, радіально-прямого та радіально-зворотно-прямого видавлювання в залежності від технологічних параметрів і проаналізувати поетапну формозміну заготовки.

4. *Уточнено* розрахункові залежності для технологічних режимів деформування відносно високих заготовок, в яких на відміну від відомих залежностей врахована наявність і вплив проміжної недеформованої зони між автономними осесиметричними осередками деформації радіального і зворотного видавлювання металу, що дає можливість підвищити точність визначення поетапного наростання розмірів напівфабрикату при комбінованій деформації.

5. *Вперше* на основі енергетичного методу і методу скінченних елементів розроблено комплекс математичних моделей процесів комбінованого послідовного радіально-прямого видавлювання і встановлено закономірності формоутворення порожнистих деталей типу гільз і втулок, які відрізняються аналізом нових схем осесиметричного деформування і використання яких дозволяє визначити технологічні режими з урахуванням деформаційного зміцнення металу, геометричних параметрів інструменту, а також напружено-деформованого стану в залежності від переважного напрямку переміщення металу.

6. *Отримав розвиток* метод розрахунку граничної технологічної деформовності заготовки в процесах деформування, який на відміну від відомих враховує ефект відновлення пластичності металу від проміжних відпалів і в технологічних паузах, що дозволяє розробити раціональні режими пластичного деформування, які забезпечують підвищену сумарну ступінь формозміни заготовки.

7. *Отримали розвиток* уявлення про закономірності комбінованого процесу радіального видавлювання фланця і подальшого пробивання – відділення деталі типу кільця від багатоштучної заготовки, суть новизни яких полягає у встановленні можливості підвищення гідростатичного тиску в зоні поділу за рахунок введення додаткового силового впливу на фланець, що створює умови для якісного відділення деталі від вихідної заготовки.

8. *Вперше* на основі методу скінченних елементів і експериментальних даних встановлені закономірності зміни силового режиму процесу видавлювання порожнистих деталей, який на відміну від існуючих, включає сили деформування, виштовхування і знімання деталей, що дозволило обґрунтувати новий принцип

навантаження інструменту, який полягає у видаленні деталі з матриці спільно з пуансоном і подальшому зніманні деталі з пуансона поза межами матриці.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичну цінність дисертаційної роботи представляють наступні її основні результати:

- класифікації процесів комбінованого деформування і видавлювання, отримані на основі застосування комбінаторного методу і методу морфологічних таблиць, що дозволяють розробити нові способи об'ємного деформування і розширити можливості технологій обробки тиском;

- методики моделювання процесів об'ємного деформування, в тому числі із застосуванням кінематичних модулів нових конфігурацій, що дозволяють оперативно і повно досліджувати процеси деформування складнопрофільованих деталей при підвищеному ступені свободи витікання металу з використанням систем автоматизованого проектування ;

- нові способи комбінованого об'ємного деформування, засновані на використанні встановлених закономірностей формоутворення, нових видів інструменту, кінематичних і силових впливів, що дозволяють підвищити ступінь керованості течією металу, рівень опрацювання заготовки, складність форми деталей, а також знизити нерівномірність деформованого стану і відхилення форми деталей. Новизна запропонованих способів і пристроїв підтверджена патентами України;

- методики проектування технологічних процесів виготовлення прецизійних і великогабаритних порожнистих деталей типу гільз, втулок і кілець, що дозволяють знизити витрати на технологічну підготовку виробництва і процесів радіального і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем, що сприяють розширенню можливостей процесів штампування за рахунок ускладнення конфігурації отримуваних деталей і виключення можливості утворення дефектів форми.

Методичні матеріали, рекомендації з проектування технологічних процесів і оснащення комбінованого деформування великогабаритних поковок і штампування в роз'ємних матрицях передані для промислового освоєння на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ) і ПАТ «Енергомашспецсталь» (ЕМСС), АТ «Мотор Січ», ПрАТ «Дружківський завод металевих виробів» (ДЗМВ).

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі в розділах лекційних курсів «Теорія процесів кування і штампування» і «Холодне об'ємне штампування», а також при виконанні практичних, лабораторних та проектних робіт студентами та магістрами спеціальності ОМТ.

Особистий внесок здобувачки полягає в наступному: обґрунтування мети роботи, розробка основних ідей і методик досліджень, постановка і рішення задач дисертаційної роботи; розробка комплексу математичних моделей процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання і деформування на основі удосконалення кінематичних модулів; вдосконалення і застосування методик

оцінки використаного ресурсу пластичності і керування формоутворенням деталі; розробка технологічних рекомендацій і методик проектування процесів комбінованого деформування з урахуванням отриманої бази розрахункових моделей; розробка способів і пристроїв об'ємного формоутворення. Автор планувала і проводила експериментальні дослідження, обробку та аналіз отриманих результатів, а також розробила технології і оснащення для виготовлення деталей з номенклатури заводів і приймала участь у впровадженні результатів роботи у виробництво. Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, відображено в анотації до списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація роботи. Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК) всеукраїнських та регіональних науково-технічних (НТК) і науково-практичних конференціях (НПК), в тому числі: V МНПК молодих вчених і фахівців «Інтелект молодих – виробництву» (Краматорськ, НКМЗ, 2007); V МНТК «Прогресивні технології пластичної деформації металів» (Донецьк, 2008); IX МНТК «Research and Development in Mechanical Industry» –RaDMI (Врнячка-Баня, Сербія, 2009); XVI-XVIII МНТК «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering» (Ченстохов, Польща, 2015–2017); XVI–XX МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2013–2017); XIII, XIV МНПК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2015, 2016); МНТК «Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (Вінниця, 2011); II МНТК «Машини и пластична деформація металів» (Запоріжжя, 2012); V МНПК «Стан і перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (Ростов-на-Дону, 2012); МНТК молодих вчених «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2012); МНТК «Сучасні технології обробки тиском: моделювання, проектування, виробництво», присвячена 70-річчю кафедри МТОМД МГТУ «МАМИ», (Москва, 2013); VII, VIII МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (Харків, 2015, 2016); X МНТК «Пластична деформація металів» (Дніпро, 2017); XII МНПК «Сучасні проблеми гірничо-металургійного комплексу. Нові технології» (Старий Оскол, 2015); VII, VIII МНПК «Науково-технічний прогрес в металургії» (Теміртау, Казахстан, 2013, 2015); IV, VI, VII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ, 2013, 2015; Херсон, 2016); МНТК «Прогресивні методи і технологічне оснащення процесів обробки металів тиском» (Санкт Петербург, 2014); XVI, XVII, XVIII МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Одеса, 2015, 2016; Київ, НТУУ «КПІ» 2017); II МНПК «Сучасні технології промислового комплексу» (Херсон, 2016); Всеукраїнська НТК «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (Кременчук, 2016); Всеукраїнська НТК «Актуальні проблеми проектування, виготовлення и експлуатації озброєння та військової техніки» (Вінниця 2017) I НТК молодих фахівців «Енергомашспецсталь» (Краматорськ, 2007); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ДДМА (2007–2015). на науковому семінарі при спеціалізованій раді Д.12.105.01 (ДДМА, 2017).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 95 роботах, з яких 52 статті опубліковані в журналах і збірниках наукових праць, з них 5 статей в міжнародних наукових журналах, які входять до бази даних Scopus, 10 статей в зарубіжних виданнях, 25 статей у наукових фахових виданнях України, в тому числі 13 статей у збірниках, включених в міжнародні наукометричні бази даних; 15 робіт опубліковано в матеріалах міжнародних конференцій. Матеріали досліджень і розробок опубліковані також в 1 монографії та 4-х колективних монографіях і в 1 підручнику для ВНЗ. На нові технічні рішення отримані 22 патенти України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, восьми розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 632 сторінок машинописного тексту, з них 310 сторінок основного тексту, 298 рисунків і 28 таблиць на 191 сторінках, список використаних джерел з 473 найменувань на 54 сторінках, анотації і 11 додатків, що включають і список опублікованих праць за темою дисертації і перелік науково-технічних конференцій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, приведена загальна характеристика, сформульована мета і завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, виділені предмет та об'єкт дослідження, особистий внесок здобувача, наведені наукова новизна і практична цінність результатів роботи, їх апробація і практичне застосування.

У **першому розділі** розглянуті сучасні тенденції та шляхи розвитку технологій об'ємного пластичного деформування. Встановлено, що процеси комбінованої обробки і деформування завдяки техніко-економічним перевагам знаходять все більше застосування в металообробних галузях промисловості.

Наведено аналіз стану теорії і технології точного об'ємного штампування стрижневих і порожнистих деталей різної конфігурації. Розглянуто варіанти виготовлення таких деталей із застосуванням простих схем поздовжнього видавлювання, висадкою і локальними методами. Комбінування схем поздовжнього і поперечного видавлювання, застосування нових способів поперечного видавлювання при виготовленні деталей складних конфігурацій відкриває нові можливості для інтенсифікації процесів штампування за рахунок зниження енергетичних витрат і скорочення кількості технологічних переходів. Проаналізовано основні результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів об'ємного пластичного формоутворення, виконаних в Україні та за кордоном.

Співставленні методи оцінки технологічної деформівності, відомі моделі накопичення пошкоджень при великих пластичних деформаціях в умовах об'ємного напруженого стану та засновані на цих моделях критерії руйнування. Розглянуто скалярні і тензорні моделі для умов простого і складного навантаження та обмеження, властиві енергетичним критеріям деформівності.

Відзначено, що для розширення можливостей процесів об'ємного формоутворення деталей та заготовок перспективними є схеми комбінованого деформування із суміщенням різнорідних і однорідних схем обробки, а також з використанням додаткових силових (протитиску, натягу, кручення, зсуву та ін.) і кінематичних впливів на заготовку, яка деформується.

Промислові освоєння процесів комбінованого кування та штампування заготовок нечисленні, і в основному включають схеми поздовжнього (прямого і зворотного) видавлювання, що пов'язано з недостатністю досліджень технологічних режимів і закономірностей формозміни заготовки в процесі комбінованого деформування.

В результаті аналізу попередніх досліджень встановлено, що для інтенсифікації освоєння технологічних процесів об'ємного пластичного формоутворення деталей необхідне створення математичних моделей, що дозволяють визначити силовий режим деформування з урахуванням впливу кінематики формозміни, а також прогнозувати кінцеву і граничну формозміну на послідовних стадіях процесів обробки за новими технологічними схемами.

Рішення даної науково-технічної проблеми може бути забезпечене за рахунок розвитку методів розрахунку процесів пластичного деформування, створення та застосування нових способів комбінованого деформування та методик проектування процесів об'ємного формоутворення.

На основі проведеного аналізу сформульовані мета роботи і завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямків досліджень і прийнятих методів і методик теоретичного і експериментального дослідження процесів об'ємного пластичного формоутворення.

На основі методу морфологічних карт, комбінаторного методу і методу аналізу кінематичних структур розроблені класифікації процесів комбінованого деформування і систематизовано основні схеми видавлювання, що дозволило запропонувати ряд нових способів штампування.

Аналіз кінематичних структур виконаний, виходячи із узагальненої кінематичної схеми процесу комбінованого видавлювання складнопрофільованої порожнистої деталі з вихідної трубчастої заготовки (рис. 1). Із цієї схеми генеруються способи суміщеного (рис. 2, *A1–A4*) і послідовного (*B1–B4*) комбінованого видавлювання.

Для радіального видавлювання комбінування полягає в створенні додаткових силових і кінематичних впливів на заготовку (регулювання взаємних переміщень інструментів, напрямків подачі металу в порожнину або його витікання), а також у включенні в комбінацію виконуваної попередньо або на заключній стадії висадки і обтиснення (редукування) окремих частин заготовки додатковим переміщенням напівматриць, які утворюють приймальну порожнину. Для теоретичного аналізу задач осесиметричного і плоского деформування обрано енергетичний метод верхньої оцінки (ЕМВО), заснований на балансі потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на кінематично можливих швидкостях переміщень (КМШП). Даний метод досить оперативний, добре адаптований до сучасних ПЕОМ та дозволяє отримати рішення у вигляді аналітичних розрахункових

залежностей. Метод скінченних елементів необхідний для прогнозування характеру формозміни деталей складних конфігурацій в умовах неоднозначних пластичних течій, отримання інформації про напружено-деформований стан (НДС) заготовки, необхідний для оцінки ступеня опрацювання металу та використаного ресурсу пластичності в процесах комбінованого деформування та видавлювання.

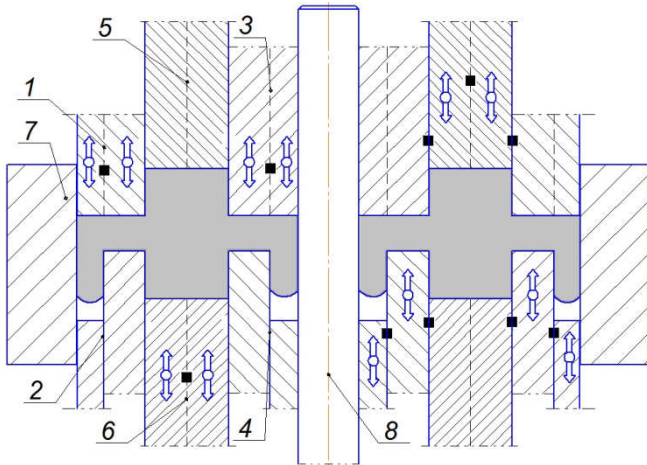


Рис. 1 – Узагальнена схема комбінованого видавлювання

Визначення параметрів формозміни заготовок здійснювали шляхом моделювання МСЕ з перевіркою результатів методом ділильних сіток. Для прогнозування характеру формозміни і можливих відхилень форми штампованих деталей у вигляді утягнень і незаповнення порожнини матриці математичні моделі розроблялися з використанням як енергетичного методу, так і МСЕ.

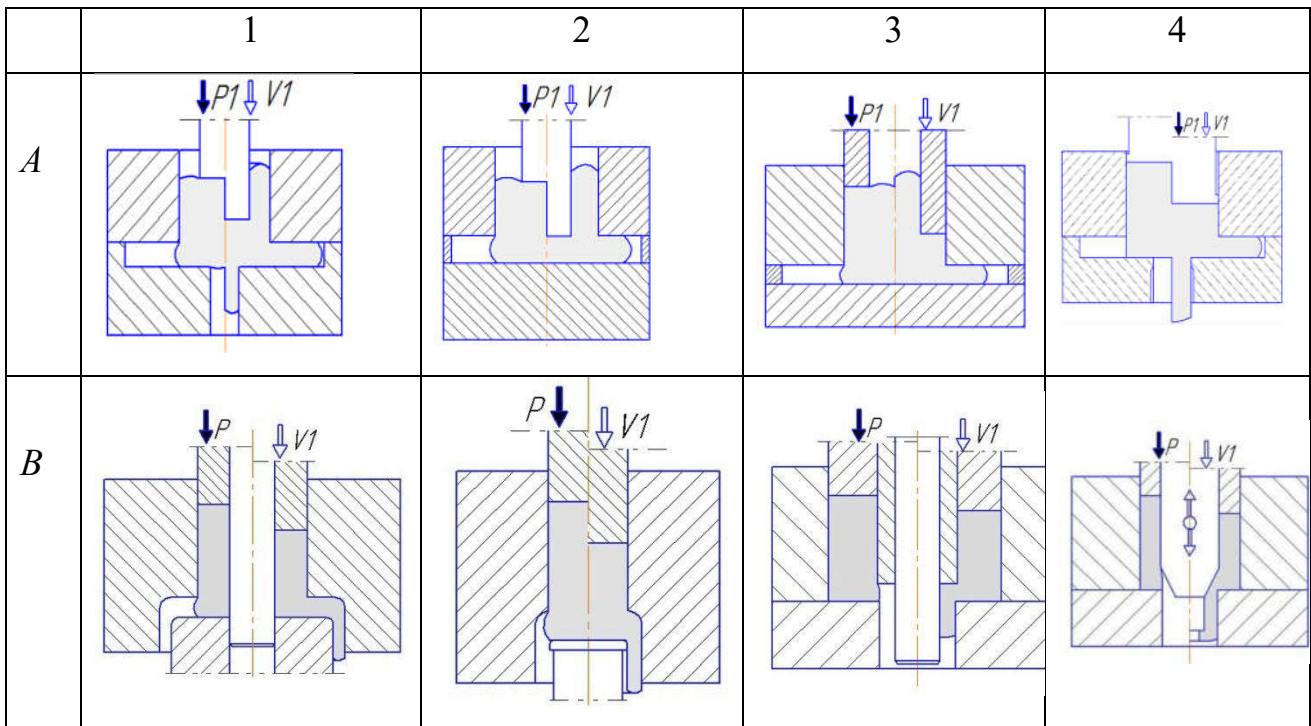


Рис. 2 – Способи комбінованого суміщеного (A) та послідовного (B) видавлювання

Граничний ступінь формозміни при радіальному видавлюванні фланців вивчали за допомогою фізичного моделювання і феноменологічних критеріїв руйнування. Діаграми пластичності (руйнування) будувалися за результатами

випробувань зразків до моменту появи тріщин в умовах кручення, стиснення, розтягування та радіального видавлювання з двосторонньою подачею.

Для експериментальних робіт розроблена і виготовлена універсально-переналагоджувана установка, яка дозволяє здійснювати видавлювання в рухомих і роз'ємних матрицях за кінематичними схемами комбінованого видавлювання порожнистих і суцільних заготовок з вимірюванням сил деформування та сил розкриття роз'ємних матриць. В основу досліджень силового режиму процесів видавлювання покладено метод тензометрування з обробкою результатів вимірювання на ПЕОМ. Для вимірювання сил тертя безпосередньо в процесі пластичного деформування розроблені пристрої у вигляді пластотрибометрів, заснованих на способі радіального видавлювання. Аналіз деформованого стану виконаний методами ділильних сіток, вимірювання твердості та вивчення макро- і мікроструктури отриманих деталей.

Третій розділ присвячений розвитку методів розрахунку стосовно до нових процесів об'ємного пластичного формоутворення.

Для розвитку методу кінематичних модулів, як різновиду енергетичного методу верхньої оцінки, були проаналізовані КМПШ одиничних полів різної конфігурації і визначені їх властивості. Попередніми дослідженнями встановлено, що у жорстких кінематичних елементів (модулів) при плоскодеформованому стані є властивість інверсії, коли в разі зміни напрямків векторів течії на протилежні первинний розв'язок може бути трансформованим і використаним. Для трикутних елементів з прямолінійними границями і для інших варіантів напрямку вхідних і вихідних векторів швидкостей течії шукане рішення може бути отримано із первинного з коригуванням на складову, що враховує вплив тертя і кута нахилу границі. Однак для трикутних криволінійних модулів цей підхід призводить до істотних похибок. Для таких полів швидкостей аналітичне рішення отримане шляхом побудови годографа швидкостей, виходячи з умови ортогональності ліній розташування центрів радіусів криволінійних сторін модуля (рис. 3). При розрахунку силових параметрів процесу з співвідношенням витяжки $\lambda > 0,7$, яке зустрічається найбільш часто, уточнення (зниження) розрахункових значень приведенного (віднесеного до напруження текучості матеріалу, що деформується σ_s) тиску деформування \bar{p} склало 22...30%.

Для осесиметричного деформування був обраний ряд відомих і нових модулів трикутної і трапецеїдальної форми (рис. 4) і вивчені їх властивості. Встановлено, що у випадку прямолінійних границь осесиметричні модулі можуть бути інверсійними, тобто розв'язки можуть бути подібними і відрізнятися на множник. На паралельних границях трапецеїдального модуля потужності сил зрізу ідентичні, а на похилій і протилежній їй границях відрізняються на множник, який залежить від умов тертя і кута нахилу границі.

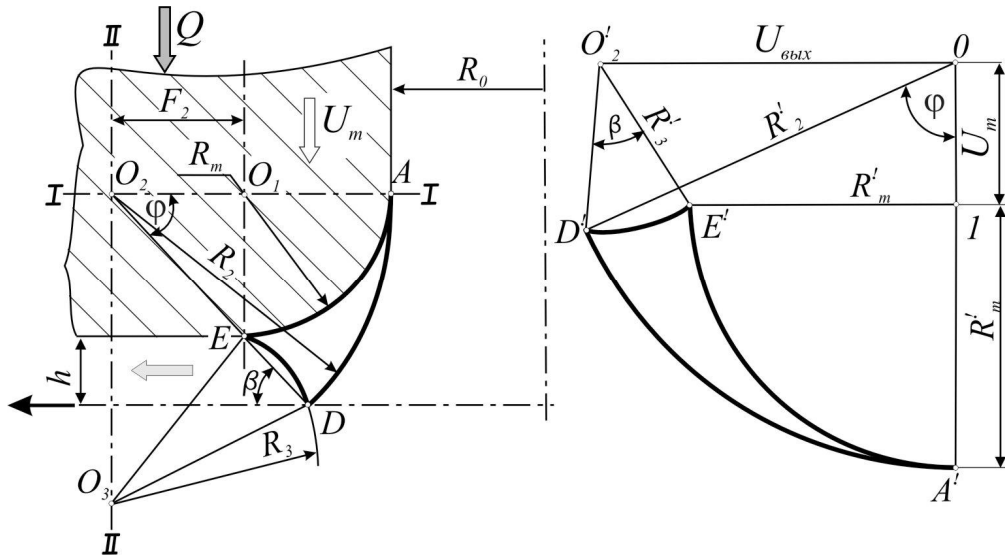


Рис. 3 – Розривне поле і годограф швидкостей для криволінійного трикутного модуля

Модуль	КМПШ	Модуль	КМПШ
	$v_z = -\frac{\bar{W}(z-z_H)}{H-z_H} - W_2 + [2V_1 R_1 h + \bar{W}(r^2 - R_1^2)] \frac{z-z_H}{2rH^2} \operatorname{tg} \theta;$ $v_r = \frac{\bar{W}(r^2 - R_1^2)}{2hH} + V_1 \frac{R_1 h}{rH};$		$v_z = \frac{z}{2rH^2} \cdot \frac{t-h}{R_2 - R_1} \cdot [W_1 (r^2 - R_1^2) + 2V_1 R_1 h - \frac{Wz}{H}];$ $v_r = \frac{W_1 (r^2 - R_1^2)}{2rH} + V_1 \frac{R_1 h}{rH}.$
	$\begin{cases} v_{z1} = -\frac{V_0 R_1^2}{T^2(z)} + W \cdot \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{1}{T^2(z)} - \frac{1}{R_1^2} \right) \\ v_{r1} = \frac{r \cdot k}{T^3(z)} \left(-V_0 R_1^2 + W \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \end{cases}$		$\begin{cases} v_z = -\frac{(V_0 + W) R_p^2}{T^2(z)} + W, \\ v_r = -\frac{r}{T^3(z)} (V_0 + W) k R_p^2 \end{cases}$ $k = dT/dz$
	$v_r = r \frac{W_1 R_2^2}{T^3(z)} \operatorname{tg} \theta;$ $v_z = \frac{W_1 R_2^2}{T^2(z)};$ $T(z) = R_1 + (z - h_2) \operatorname{tg} \theta.$		$\begin{cases} v_z = \frac{W + a v_{r2} z}{z(r)}, \\ v_r = \frac{2R_0 H_1 V_1 + W(R_0^2 - r^2)}{2r z(r)} \end{cases}$ $a = \frac{H_1 - h}{R_0 - R_2}$
	$\begin{cases} V_r = \frac{R_0^2 - R^2}{2 \cdot h} \cdot \frac{V_0}{r} \\ V_z = -a \cdot V_0 \end{cases}$		$\begin{cases} V_r = -\frac{R_0^2 - R^2}{2 \cdot h_1} \cdot \frac{V_0}{r} \\ V_z = -b \cdot V_0 \end{cases}$

Рис. 4 – Кінематичні модулі для аналізу процесів осесиметричного пластичного деформування

Модулі для процесів видавлювання були співставленні з точки зору мінімуму тиску деформування при однаковому розташуванні в осередку

деформації. Порівняння показало, що мінімум показують ті модулі, які відповідають за обрисами контуру і розмірам формі осередку деформування. Наприклад, вигнутий модуль з опуклими границями показує найкращий результат при доцентровій течії.

Модуль з увігнутими границями в разі течії металу в напрямку від осі симетрії може бути неприйнятний, оскільки призводить до значного завищення потужності сил деформування, але в той же час в блоці з іншими модулями, наприклад, прямокутного перетину, що допомагають краще описати реальний осередок деформації, рішення може бути цілком прийнятним.

Становить інтерес і отримання розв'язків у вигляді розрахункових інженерних формул. Лінеаризація підінтегральних залежностей інтенсивностей швидкостей деформації для кільцевих модулів та модулів з непаралельною течією не вирішувала проблему, оскільки приводила до значної (до 40%) похибки. Для таких модулів неможливо було знайти загальну залежність для лінеаризації підінтегрального виразу інтенсивності швидкостей деформації. Розв'язок за Коші-Буняковським із залученням теореми про середнє значення показав прийнятну похибку в 3–5% відхилень від результатів чисельного розв'язку інтегралів потужності сил деформування.

Кінематичні модулі різних конфігурацій обраховані, співставленні і підготовлені для вибору і використання в залежності від характеру і напрямку течії (до осі або від осі симетрії) і використання в технологічних задачах. Для модулів з прямокутним перетином компоненти приведенного тиску деформування, що враховують сили деформування, зрізу і тертя, представлені у вигляді табличних даних з прив'язкою до відповідних граничних поверхонь.

У четвертому розділі розглянуто метод розрахунку технологічної деформовності. Для оцінки технологічної деформовності при холодній об'ємній обробці розглянуті можливості критеріїв руйнування, в основу яких покладена гіпотеза про вплив першого і третього інваріантів тензора напружень на величину витрат ресурсу пластичності при пластичній деформації металу.

В результаті обробки експериментальних даних, отриманих шляхом випробування зразків в камері високого тиску в умовах спільного кручення і розтягування за різними програмами деформування, підтверджено, що діаграма пластичності не є єдиною для різних напружених станів. Зіставлення діаграм пластичності, побудованих в умовах накладення всебічного тиску на плоский та лінійний напружені стани, дозволило зробити висновок про те, що третій інваріант тензора напружень пригнічує пластичність в області зміни показника напруженого стану η ($-2 \leq \eta \leq 0$), а в області ($0 \leq \eta \leq 1$) пластичність підвищується під впливом третього інваріанта. Таким чином, при вивченні технологічних процесів ОМТ, де реалізується об'ємний напружений стан необхідно користуватися діаграмою пластичності, побудованою з урахуванням третього інваріанта тензора напружень.

Розглянуто простір – «накопичена інтенсивність деформацій - безрозмірні показники напруженого стану» і підтверджена можливість оцінки деформовності заготовок за результатами моделювання процесів обробки на

матеріалах різного зміцнення. Уточнено методики побудови діаграм і поверхонь пластичності із залученням нових координат: параметра Лоде-Надаї μ_σ і параметра χ , що враховує вплив третього інваріанта тензора напружень:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_i}$$

Показано, що на пластичність впливає не кривизна траєкторії деформацій – похідна траєкторії деформацій (за визначенням А. Іллюшина), а швидкість зміни показників напруженого стану або кривина шляху деформування. Отримані результати досліджень пластичності металів в залежності від 3-х інваріантів тензора і девіатора напружень дозволили встановити межі застосування феноменологічних критеріїв деформівності без руйнування в залежності від інтервалу значень другої похідної від показника напруженого стану. Аналіз феноменологічних критеріїв руйнування у випадках, коли шляхи деформування були представлені двічі диференційованими функціями, дозволив виявити вплив на величину граничних деформацій першої та другої похідних від показника напруженого стану. При цьому, якщо $d\eta/de_u \geq 3,0$ вплив історії деформування на пластичність досягає максимального значення.

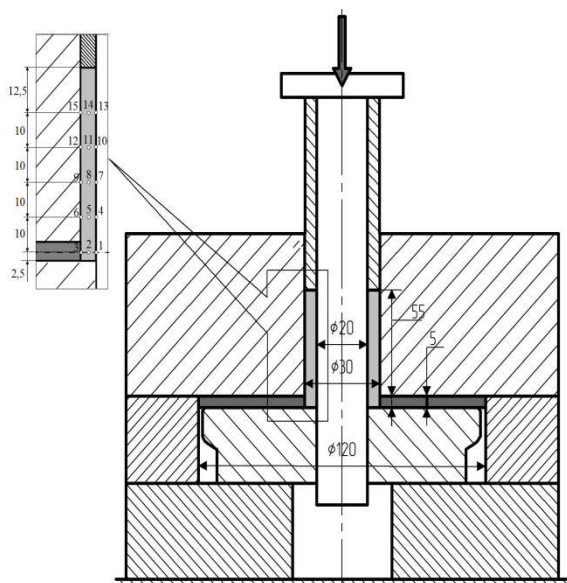


Рис. 5 – Схема радіального видавлювання з протитиском

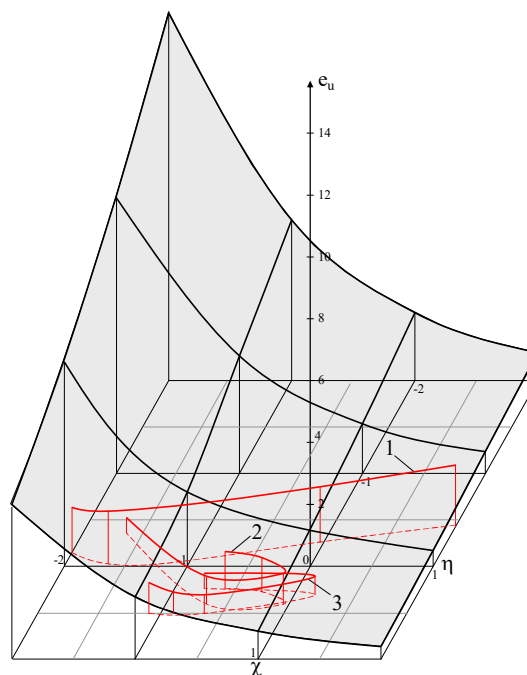


Рис. 6 – Поверхня пластичності та шляхи деформування 1-3 (АД1)

Для оцінки деформовності заготовок при об'ємному напруженому стані досліджували процес поперечного видавлювання з протитиском (рис. 5). Розраховували деформовність заготовок зі сталі 10 і сплаву АД1 (рис. 6). Дослідивши НДС і граничні можливості способу радіального видавлювання з протитиском були встановлені небезпечні зони. Використовували критерій

руйнування, в основу якого покладена нелінійна модель процесу накопичення пошкоджень, розроблена Г.Д. Делем і В.А. Огородніковим.

Незначне зменшення розрахункових значень використаного ресурсу пластичності ψ_χ в порівнянні з ψ_η обумовлено тим, що гранична деформація e_p в області від'ємних значень η і χ збільшується швидше, ніж в області де $\eta < 0$, а $\mu_\sigma > 0$. Використання при дослідженні пластичності металів в умовах об'ємного напруженого стану показника χ замість μ_σ при оцінці використаного ресурсу пластичності ψ дозволяє отримати розрахункові значення ψ ближчі до експериментальних. Крім того, при перетині площини $\chi = 0$ (плоский напружений стан) з поверхнею граничних деформацій $e_p(\eta, \chi)$, виходить гранична крива $e_p(\eta, 0)$, яка повністю збігається з діаграмою пластичності $e_p(\eta)$. З порівняння результатів розрахунків ψ при використанні протитиску і без нього впливає, що при вибраній геометрії і розмірах порожнини і при використанні в якості робочого середовища, що створює протитиск, технічного свинцю величина ψ зменшується в 2,5 рази.

Отримав подальший розвиток метод розрахунку граничної технологічної деформовності заготовки в процесах холодного деформування з проміжними відпалами і дрібного поетапного гарячого пластичного деформування з паузами, що враховує ефект відновлення пластичності металу після відпалу і в технологічних паузах. Це дозволило розробити раціональні режими пластичного деформування, що забезпечують підвищену пластичність металу заготовки.

Надано оцінку ступеню використання ресурсу пластичності металу в небезпечних зонах таких процесів, як суміщене радіально-зворотне видавлювання деталей типу стакан з фланцем, а також комбіноване радіально-пряме видавлювання для отримання деталей типу втулки і стрижня з фланцем.

У п'ятому розділі проведено дослідження процесів суміщеного комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем. Для першої групи порожнистих деталей розроблені розрахункові схеми процесу, що містять вдосконалені кінематичні модулі трапецеїдальної форми, похила границя яких може бути прямолінійною (рис. 7), або криволінійною. Визначено межі використання даних схем в залежності від напрямку переважної течії металу, обумовленої ступенем деформації за поєднуваними простими (радіальною і зворотною) схемами видавлювання.

Встановлено, що використання модулів з криволінійними границями замість прямолінійних розширює їх можливості в застосуванні за рахунок додаткового варіювання форми та об'єму модулів. Так, збільшення розмірів деталі типу стакан з фланцем у вертикальному напрямку при переважно радіальній течії (супроводжується захоплюванням металу стінки стакану в напрямку руху пуансона), розраховані за схемою а (див. рис. 7), не відповідають дійсним, в той час як використання модуля з криволінійною границею дозволяє отримати прийнятну картину формоутворення деталі.

В аналітичному вигляді отримано вираз приведенного тиску як лінійної функції змінного кінематичного параметру – вихідної швидкості зворотного

витікання \bar{W} , який дозволяє також визначити приріст розмірів виробу і оцінити поетапну формозміну заготовки. Відзначимо, що збільшення відносної висоти фланця призводить до зменшення значення \bar{W} аж до від'ємних значень, що відповідає явищу переважної радіальної течії з захоплюванням металу стінки стакану в напрямку руху пуансона, яке спостерігається експериментально. На основі схем з об'єднаним осередком деформації (див. рис. 7) шляхом введення проміжної жорсткої зони розроблені розрахункові схеми процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем з роз'єднаним осередком деформації для досить високих заготовок.

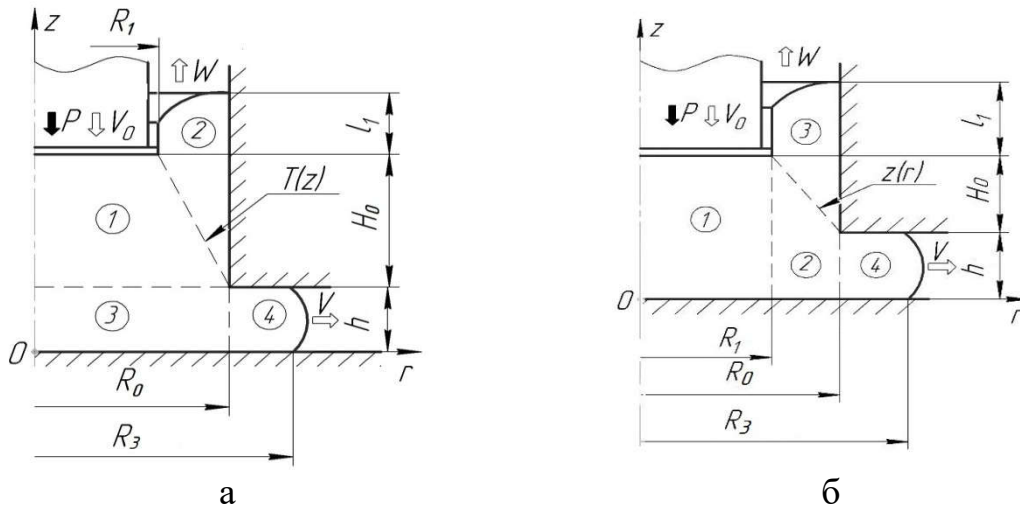


Рис. 7 – Розрахункові схеми процесу комбінованого видавлювання порожнистих деталей з фланцем

Встановлено можливість прогнозування утворення дефектів типу утягнень при радіально-зворотному видавлюванні на основі розрахункової схеми (рис. 7, б). В якості визначального фактору виступає характер зміни по ходу процесу деформування кінематичного параметра \bar{W} . Утягнення в донній частині деталі утворюється на завершальній стадії видавлювання, коли течія металу в радіальному напрямку практично відсутня, а основна частина металу заготовки тече вертикально вгору.

Збільшення відносної товщини фланця \bar{h}_1 веде до зменшення значень приведенного тиску при збереженні інших параметрів процесу деформування, і ця тенденція зберігається для будь-яких співвідношень параметрів і умов тертя (рис. 8, а). Збільшення коефіцієнта тертя також веде до зсуву вгору графіків функції \bar{p} по ходу \bar{S} всього процесу деформування.

Картини поетапної формозміни, отримані МСЕ, а також енергетичним методом, дали можливість оцінити зміни геометрії напівфабрикату по мірі розвитку процесу. Вплив різних умов тертя на бічній поверхні стакану і пуансона, а також в донній частині здійснює помітний вплив на процес формоутворення, при цьому відхилення отриманих приростів Δl_1 може досягати 30% і більше (рис. 8, б). При мінімальному терті в напрямку зворотного видавлювання і збільшеному в зоні фланця ($\mu = 0,4$) величина

приросту висоти стінки стакану зростає на 50% (крива 1). І навпаки, збільшення тертя ($\mu = 0,4$) в зоні стінки скорочує приріст висоти стінки (крива 3). Однак забезпечення однакових умов тертя в цих зонах практично не впливає на величину збільшень розмірів напівфабрикату (крива 2).

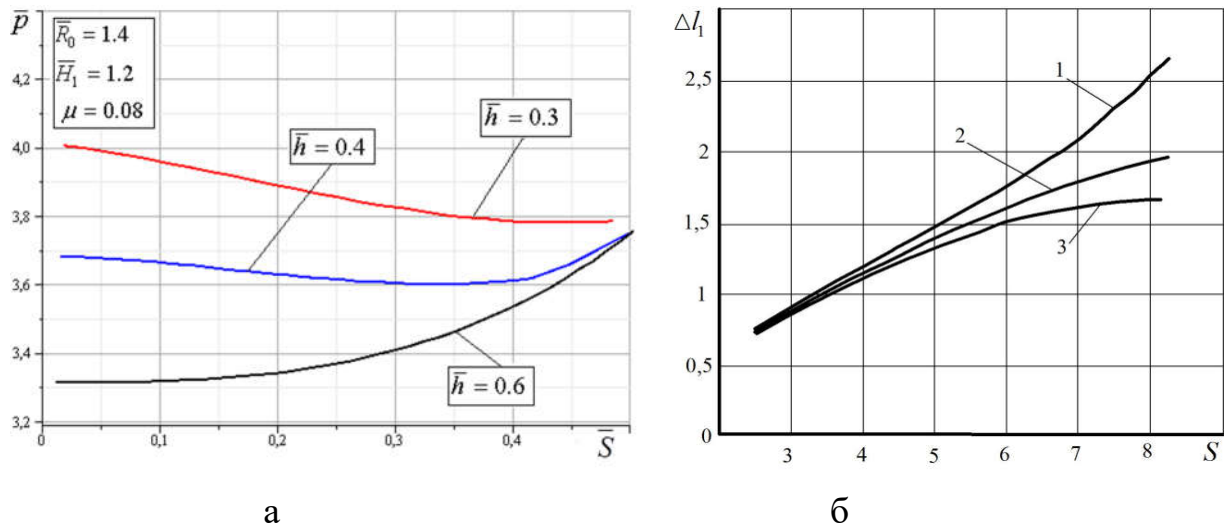


Рис.8 – Тиски деформування (а) і величина приросту висоти (б) стакану з фланцем при радіально-зворотному видавлюванні

Порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних даних за силами видавлювання показав, що похибка розрахунків не перевищує 15%, при цьому врахування наявності проміжної жорсткої зони дозволяє знизити відхилення до 10%. Вплив радіусів перехідних кромки на силовий режим і формозміну також невеликий у порівнянні з впливом розмірів самих вихідних отворів.

Експериментальне дослідження деформованого стану в процесі комбінованого радіально-зворотного видавлювання деталей типу стакану ($R_p = 7,5$; $R_0 = 12,0$; $h = 5,0$ мм) показало результати, якісно близькі до отриманих при моделюванні МСЕ (рис. 9). На початку деформування заготовки осередки деформації (ОД) радіального і зворотного витікання рознесені один від одного, що сприятливо позначається на процесі формоутворення, оскільки перешкоджає виникненню поверхонь з інтенсивними зсувами. У стінці видавленого стакану спостерігається деформований стан зі значною нерівномірністю. Зовнішні шари і зона, яка примикає до кромки стакану, є мало деформованими. По лінії, яка проведена від кромки пуансона до заокруглення напівматриці, відбувається поділ течії металу в радіальному і зворотному напрямках. Найбільш інтенсивній деформації піддаються шари металу, що примикають до калібрувального паску пуансона; величина інтенсивності деформацій досягає значень 2,3–3,0 на другому етапі процесу деформування. Експериментальна оцінка вичерпання ресурсу пластичності показала, що найбільш небезпечною зоною є зовнішня поверхня фланця.

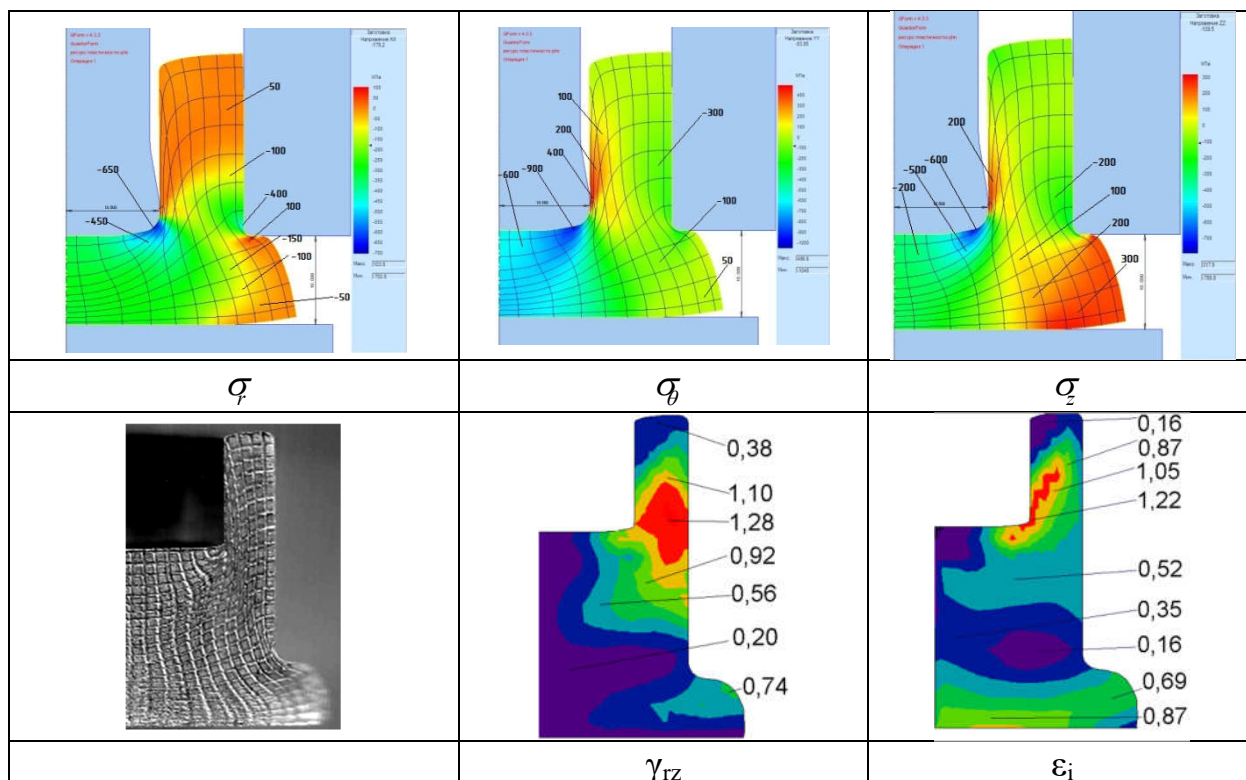


Рис. 9 – Напружено-деформований стан при комбінованому видавлюванні стакана з фланцем

Аналіз силових і деформаційних режимів процесів суміщеного комбінованого видавлювання: радіально-зворотного і радіально-прямого видавлювання стрижневих деталей з фланцем, а також тристороннього видавлювання порожнистих деталей з фланцем і осьовим стрижнем було виконано аналогічно методами кінематичних модулів (рис. 10) і скінчених елементів.

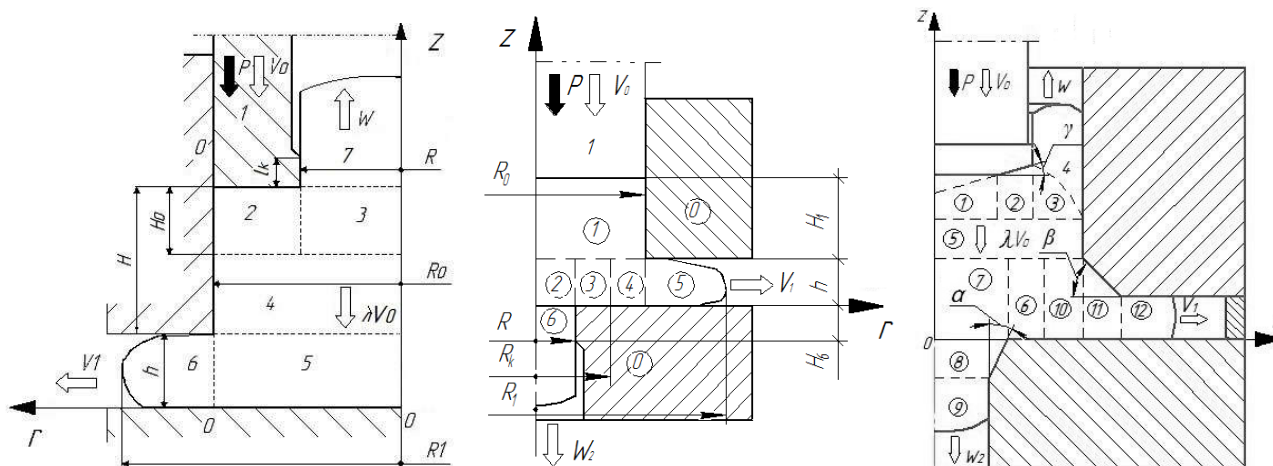


Рис. 10 – Розрахункові схеми процесів суміщеного радіально-поздовжнього видавлювання

Основними параметрами, які впливають на силовий режим, послідовність заповнення порожнини і формування контуру деталі при вільному витіканні металу одночасно в декількох напрямках, є розміри вихідних отворів.

Методами ЕМВО, ділільних сіток і МСЕ проведено моделювання процесу комбінованого видавлювання, що дало уявлення про розвиток сил деформування, послідовності формоутворення деталей і НДС заготовки. Визначено, що найбільший ступінь деформації зосереджений біля кромки інструменту і на границях зсуву, що з'єднують перехідні кромки інструментів. Отримано діаграми наростання лінійних розмірів за напрямками формування елементів деталі.

Прогнози поетапного формоутворення деталі зі сплаву АД31, виконане енергетичним методом і МСЕ ($2R_0 = 28,2$; діаметр відростка $2R = 15$; хід S до 10 мм; $h = 4$ мм), при співставленні між собою показують близькі результати (рис. 11, а). Зоною з максимальним ступенем деформації є зона, прилегла до кромки пустотілого пуансона, тобто в області розвороту і видавлювання металу в зворотному напрямку.

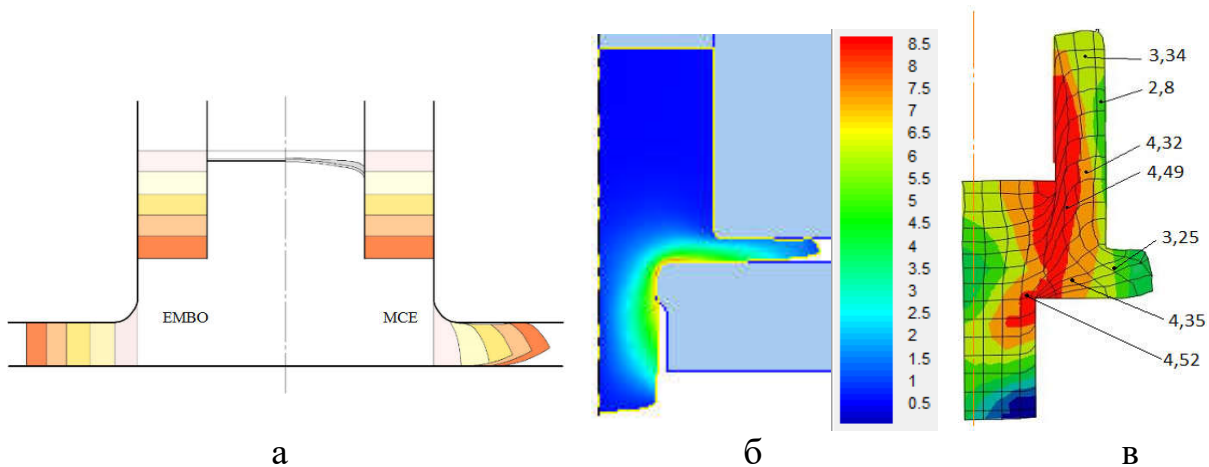


Рис. 11 – Наростання контурів (а) і деформований стан (б, в) деталей, що отримувані радіально-поздовжнім видавлюванням

Зони розвороту металу та течії у фланець і відросток є ділянками деформації зі складним деформованим станом, в яких поєднуються стиснення, зсув і розворот металу, що витісняється. При цьому нерівномірність деформованого стану одержуваного відростка значна, оскільки у верхній частині відростка і в шарах, прилеглих до осі симетрії відростка, ступінь деформації мінімальна. Аналіз деформованого стану, виконаний МСЕ-моделюванням, в цілому підтверджується і експериментальними дослідженнями, проведеними методом ділільних сіток. Для цього процесу теж характерна наявність двох автономних осередків деформації. Витіснення металу в зворотному напрямку у відросток незначне. Відросток формується, в основному, за рахунок заглиблення пустотілого пуансона в заготовку. А при радіально-прямому (рис. 11, б) і тристоронньому (рис. 11, в) комбінованому видавлюванні осьовий відросток формується зсувом вниз зі швидкістю, що практично дорівнює швидкості переміщення пуансона.

Оцінка витрати ресурсу пластичності показала, що найбільш небезпечними зонами з точки зору руйнування є периферія фланця і поверхня розділу течії в прямому і радіальному напрямках. Для усунення небезпеки зрізу

вже сформованого фланця по лінії розділу течії в радіальному і прямому напрямках розроблено спосіб видавлювання з розділеними рухливими осередками деформації.

Переважає течія в область фланця підказує, що його обмеження по зовнішньому контуру сприяє досягненню необхідних розмірів деталі. Цікаво відзначити, що таке обмеження, хоча і викликає помітне зростання сил деформування, не є критичним. Разом з тим, цим способом вдається досягти досить чіткого оформлення (при необхідності) фасонного (багатогранного або більш складного) контуру фланця, що при звичайному радіальному видавлюванні в закриті порожнину є неприпустимим через появу критичних навантажень на інструмент.

Вибір варіанту отримання деталей залежить від відносного розташування фланця і відростка. Застосування зворотно-радіального видавлювання для отримання стрижневих деталей обмежене питомими навантаженнями на порожнистий пуансон.

У шостому розділі представлені результати теоретичного дослідження енергетичним методом процесів радіально-прямого видавлювання з роздачею і обтисненням.

Розрахункові схеми процесу формувалися з самостійних кінематичних модулів, що утворюють характерні для зон вісесиметричні блоки. Використовуючи раніше встановлені компоненти КМПШ, інтенсивностей швидкостей деформацій, приведені тиски пластичної деформації, зрізу і тертя на границях кожного модуля з рівняння енергетичного балансу, визначали сумарну величину приведенного тиску \bar{p} і аналізували вплив геометричних параметрів і умов тертя на силовий режим.

Для теоретичного дослідження процесу радіально-прямого видавлювання порожнистих деталей обрана розрахункова схема (рис. 12), що складається з пластичних блоків, які враховують конфігурацію матриці при радіальній течії (модулі 3-5) і розвороті на течію в прямому напрямку (модулі 7 і 8), і які забезпечують найменші значення приведених тисків.

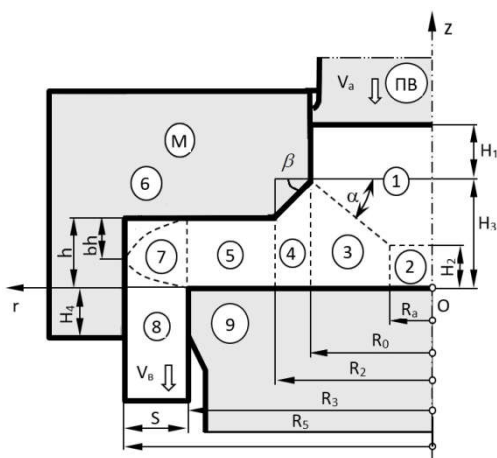


Рис. 12 – Розрахункова схема процесу радіально-прямого видавлювання

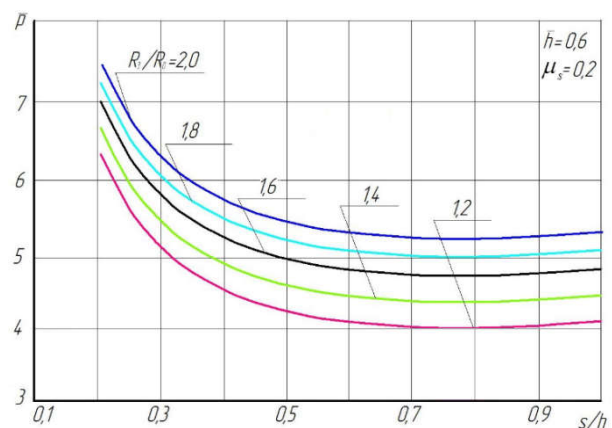


Рис. 13 – Залежності приведенного тиску радіально-прямого видавлювання

Отримана математична модель процесу радіально-прямого видавлювання дозволила визначити залежність приведенного тиску \bar{p} від відносних геометричних параметрів процесу і умов тертя на контактних поверхнях, що враховуються коефіцієнтом тертя μ (рис. 13).

Встановлено, що найбільш впливають на приведений тиск процесу радіально-прямого видавлювання відносні товщина стінки s , товщина дна стакану h , параметр $n = s/h$ і коефіцієнт тертя μ . При значеннях параметрів $h < 0,5$ і $n < 0,7$ відбувається істотне зростання тиску деформування через зростання ступеня деформації в зоні розвороту течії металу з радіального напрямку на прямий і в зоні дна порожнини. Зменшення відносної товщини дна стакану від 0,6 до 0,2 призводить до збільшення тиску деформування на 26%.

Для оцінки показників напружено-деформованого стану заготовки в осередку деформації на послідовних стадіях процесу радіально-прямого видавлювання були обрані характерні точки в різних зонах по висоті осередку деформації в заготовці.

Оцінка деформованого стану заготовки з алюмінієвого сплаву АД31 в процесі радіально-прямого видавлювання з роздачею проводилася методами ділильних сіток і МСЕ. У центральній частині заготовки осередок деформації має верхню конічну граничну поверхню. До найбільшої деформації схильні шари металу, що примикають до дна порожнистої деталі. Великі значення інтенсивності деформації зосереджені в шарі матеріалу заготовки поблизу внутрішнього радіуса стакану, а менші – в шарі поблизу зовнішнього радіуса.

Розрахунки за енергетичною математичною моделлю, що враховує деформаційне зміцнення матеріалу заготовки, дозволили встановити значення прирощення компонент деформації для комірок, розташованих між двома виділеними лініями току, накопиченої деформації, а також підсумкового ступеня деформації, накопиченого коміркою на виході з осередку деформації. Енергетична і МСЕ-моделі процесу добре якісно і кількісно описують результати експериментальних досліджень. Поля деформацій, графіки прирощень ступеня деформації, а також подібність картин викривлення ділильної сітки свідчать про відповідність результатів проведених досліджень з використанням різних методів моделювання.

Результати експериментальних досліджень процесів поздовжнього і радіально-прямого видавлювання, метою яких було співставлення силового режиму виготовлення виробу типу стакан в різних процесах холодного видавлювання, підтвердили адекватність розроблених математичних моделей і можливість отримання в процесі радіально-прямого видавлювання з роздачею складнопрофільованих порожнистих деталей. Встановлено, що найбільша сила деформування відповідає процесу зворотного видавлювання деталі типу стакану. Радіально-пряме видавлювання порожнистої деталі дозволяє знизити силу деформування в 1,5–2,4 рази в порівнянні зі зворотним видавлюванням. Пряме «безматричне» видавлювання дозволяє знизити силу деформування до 22% в порівнянні з радіально-прямим видавлюванням

Моделювання процесів отримання деталей типу латунних гільз альтернативними способами: зворотним видавлюванням і прямим видавлюванням з роздачею (різновид комбінованого радіально-прямого видавлювання) підтвердило переваги останнього способу в зниженні нерівномірності розподілу деформацій (рис. 14). Крім того, радіально-пряме видавлювання з роздачею в матрицях з різним кутом γ конусної поверхні забезпечує зниження сил деформування на пуансоні в порівнянні зі зворотним видавлюванням. Чим більше кут конусної поверхні матриці, тим більше величина зниження зазначеної сили. Пряме видавлювання з роздачею в матрицях з кутами конусної поверхні від $\gamma = 17^\circ$ до $\gamma = 60^\circ$ забезпечує зниження сил видавлювання на пуансоні відповідно від 11% до 33% у порівнянні зі зворотним видавлюванням.

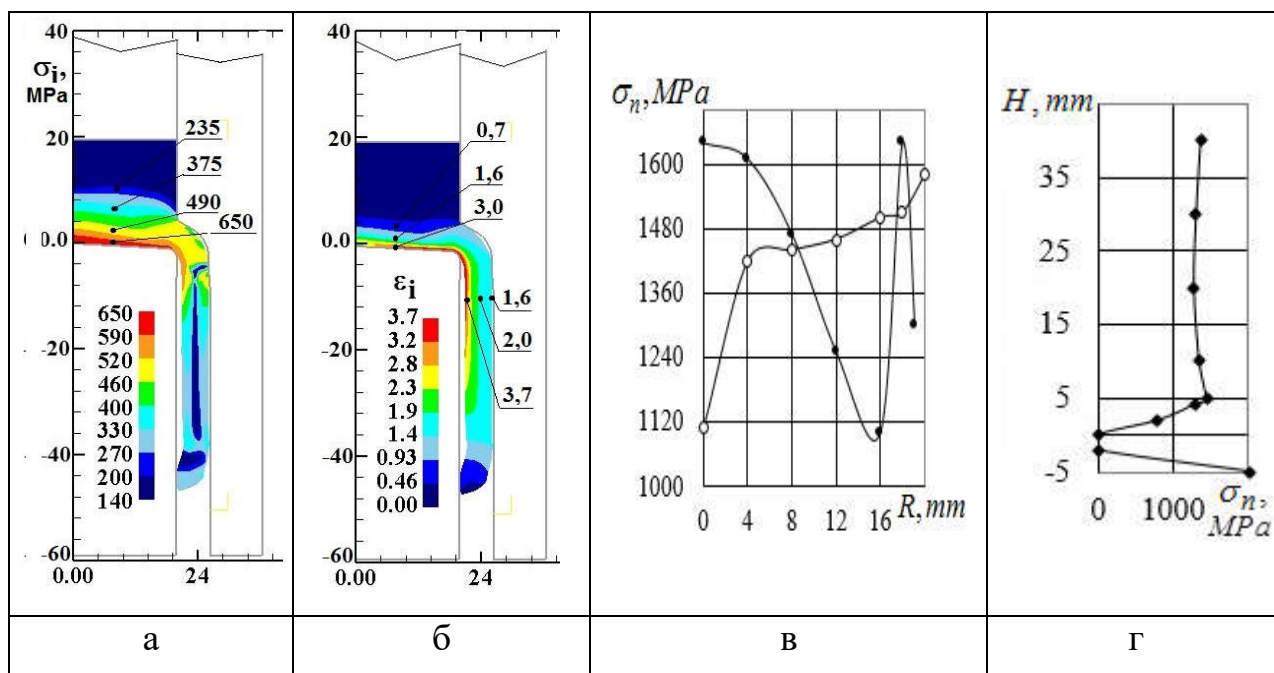


Рис. 14 – Інтенсивності напружень σ_i (а) і деформацій ϵ_i (б, в) в заготовці і питомі сили (б, в) при куті матриці $\gamma = 60^\circ$: \bullet на пуансоні, \circ на контрпуансоні

Для інтенсивного опрацювання холодною пластичною деформацією структури металу донної частини виробу необхідно використовувати матриці з малими кутами γ . Тиски на поверхні порожнини матриці (див. рис. 14, г) при зменшенні кута γ змінюються в середньому в бік збільшення, але незначно. На поверхні матриці найбільша величина напружень має місце на калібрувальному паску матриці зі зниженням на конусній поверхні і з мінімумом в місці контакту верхнього торця заготовки з матрицею.

Для осесиметричного *радіально-прямого видавлювання з обтисненням* розроблені математичні моделі для варіантів деформування на ступінчастій і конічній оправці (рис. 15). Осередок деформації розбивався на два блоки (блок доцентрової радіальної течії і блок розвороту течії на прямий напрямок). Був

проведений аналіз виду оптимального КМПШ для блоку радіальної течії і прийнятий модуль, що має перетин криволінійного трикутника.

В результаті математичного моделювання осесиметричного видавлювання отримана залежність приведенного тиску \bar{p} від геометричних параметрів процесу. При осесиметричному видавлюванні, як і при плоскому деформуванні найбільш впливають на силові параметри відносна товщина стінки деталі, що видавлюється, і висота кругової радіальної порожнини. Моделі дають також ідентичні значення за оптимальним кутом нахилу твірної конічної оправки. Визначено, що оптимальне значення кута нахилу твірної оправки коливається в інтервалі 46° - 52° . Тиски деформування при комбінованому видавлюванні вище тисків радіального (доцентрового) видавлювання в 1,5–2,1 рази залежно від величини зазору для прямої течії металу.

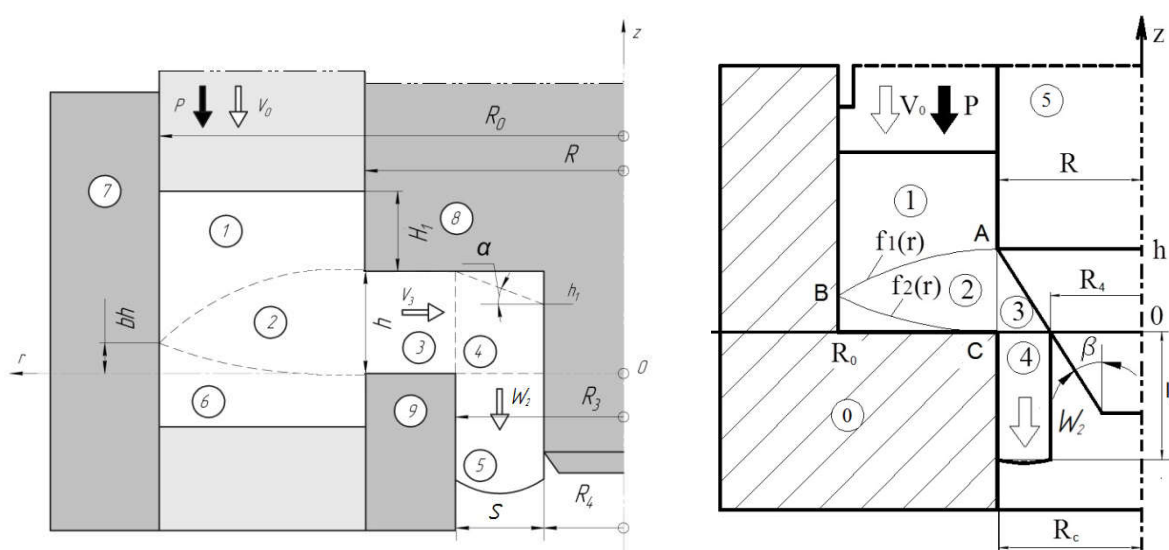


Рис. 15 – Розрахункові схеми процесу послідовного радіально-прямого видавлювання з обтисненням

Аналіз за допомогою методу скінченних елементів з використанням програми Q-Form 2D процесів радіально-прямого видавлювання на конічній оправці був проведений для трьох випадків: з нульовим ($R = R_c$), додатним ($R > R_c$) і від'ємним зазором ($R < R_c$) між оправкою і матрицею (див. рис. 15). Експериментальним шляхом і за МСЕ побудовані поля розподілу інтенсивності логарифмічних деформацій при видавлюванні за трьома варіантами призначення зазору при видавлюванні (рис. 16, а). Форма і розміри осередку інтенсивної деформації подібні формі кінематичного модуля, прийнятого в якості оптимального поля швидкостей при моделюванні енергетичним методом. Розподіл опору деформування і його зміна в осередку деформації по ходу деформування ідентичні полю деформації. Найбільше зміцнення отримують зовнішні шари трубчастої деталі, що видавлюється.

Визначено можливість процесів радіально-прямого видавлювання на конусній оправці для отримання трубчастих деталей зі змінною товщиною

стілки різноманітної форми. Процес особливо ефективний для профілювання внутрішньої поверхні трубчастих деталей за рахунок зміни зазорів між рухомою оправкою і матрицею, а також профілювання самої оправки.

Були виявлені наступні характерні дефекти при виготовленні порожнистих деталей радіально-прямим видавлюванням з обтисненням і роздачею: руйнування виробу; різностінність порожнини; поздовжній вигин за висотою виробу; осьове утягнення. Встановлено причини виникнення дефектів та запропоновано шляхи усунення, такі, як фасонування заготовок і формування технологічних буртів.

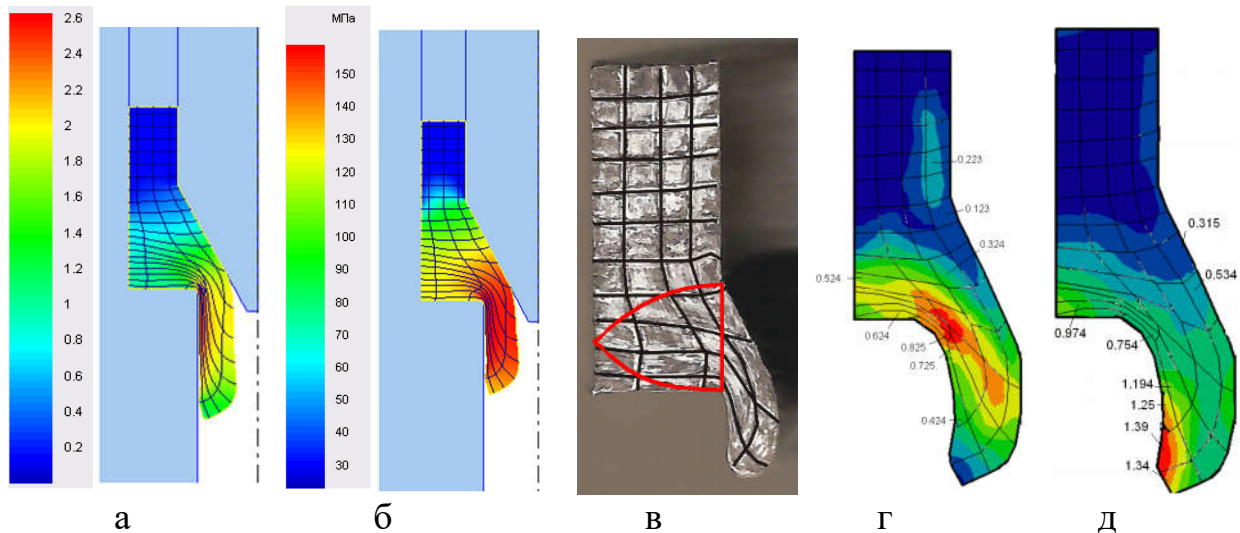


Рис. 16 – Розподіл інтенсивностей деформацій (а) і напружень (б); дослідні дані за зсувними деформаціями (в, г) і інтенсивності деформацій (д)

У цьому розділі розглянуті технологічні завдання різного призначення і комбінованого деформування.

Досліджено комбінований спосіб отримання кілець радіальним видавлюванням з подальшим відділенням пробивкою багатоштучної заготовки від отриманої деталі. Для підвищення якості поверхні зрізу при відділенні деталі від заготовки оцінювали напружений стан при радіальному видавлюванні з додатковим силовим впливом шляхом висадки фланця. На графіку яскраво виражений варіант III висадки фланця, який супроводжується різким переходом в область від'ємних значень середнього напруження, що відповідає підвищенню пластичності металу (рис. 17).

У розділі виконано узагальнення дефектів деталей, характерних для процесів комбінованого видавлювання і точного штампування. Наведено результати аналізу причин виникнення відхилень форми деталей і нерівномірності деформованого стану. Розглянуто умови виникнення утягнень при радіальному та комбінованому радіально-зворотному видавлюванні порожнистих деталей з фланцем і певні способи зниження таких дефектів, зокрема, спосіб видавлювання фланців в штампі з рухомою напівматрицею, спосіб запобігання дефектів типу утягнень створенням технологічних (тимчасових) буртів і способі регулювання кінематики подачі металу в

порожнину матриці за рахунок зміни напрямку подачі, або чергування односторонньої і двосторонньої подачі металу в порожнину матриці.

Виконано енергетичним методом верхньої оцінки дослідження процесу штампування фланців способом радіального видавлювання з протитиском, прикладеним за допомогою твердого технологічного середовища, що дозволяє призначити параметри інструменту, достатні для штампування деталей без дефектів і розривів.

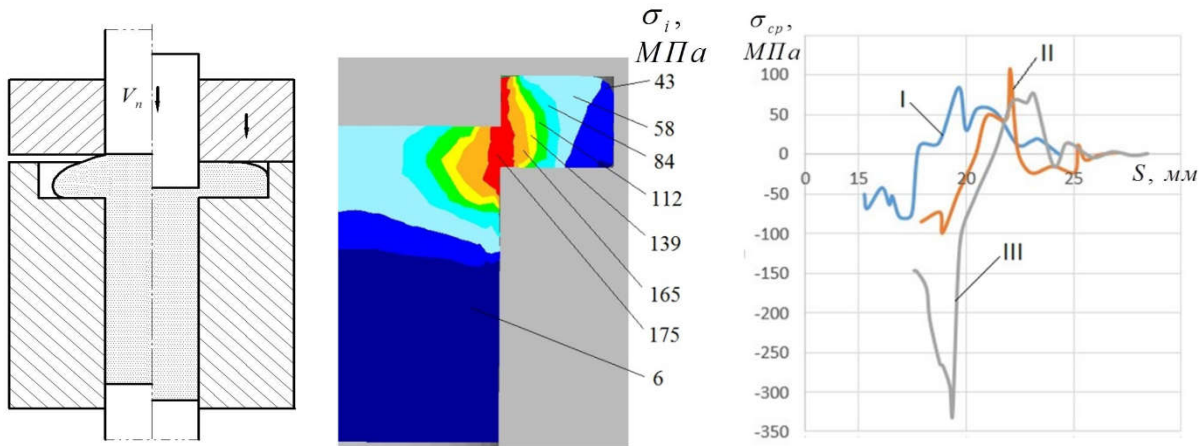


Рис. 17 – Схема процесу, інтенсивність напружень і середнє напруження: матеріал – сплав АД31

При зворотному видавлюванні традиційно спочатку йде вилучення пуансона з деформованої заготовки, а потім виштовхування її з матриці. Це супроводжується значними розтягуючими напруженнями, які скорочують термін служби пуансонів. Було проведено комп'ютерне моделювання спільного виштовхування пуансона і деформованої заготовки з матриці за допомогою виштовхувача після зворотного видавлювання. При такому варіанті вилучення в пуансоні діють незначні розтягуючі напруження в порівнянні з попереднім варіантом. Експерименти з видавлювання сталевих заготовок також підтвердили можливість значного (в 3–4 рази) зниження сил знімання з пуансона готових деталей при новому принципі навантаження інструменту.

Способи комбінованого деформування, в яких передбачено створення інтенсивних зсувних деформацій і включення їх в цикл деформування, показали свою ефективність при опрацюванні структури металу, що особливо доцільно при виготовленні крупногабаритних поковок.

Дослідження фактору контактного тертя виконано безпосереднім вимірюванням сил тертя під час радіального видавлювання трубчастих деталей з фланцем. Обробка результатів досліджень дозволила встановити значення коефіцієнтів тертя для більш поширених мастил холодного деформування. Встановлена залежність між коефіцієнтом тертя та приведеним тиском деформування, яка дозволила групувати технологічні мастила для холодного об'ємного деформування. Характерно, що для поширених составів мастил коефіцієнт тертя (по відношенню к напруженню текучості) не перевищує значення 0,1.

У восьмому розділі виконано узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень для їх підготовки до практичного використання. Розглянуто основні етапи проектування технологічних процесів способами об'ємного формоутворення та запропоновано технологічні рекомендації з проектування процесів комбінованого видавлювання і деформування.

На підставі проведених досліджень розроблена методика проектування процесів об'ємного деформування, яка враховує нові дані про закономірності комбінованого деформування і нові методи розрахунку. Надано технологічні рекомендації з проектування процесу радіально-прямого видавлювання з роздачею порожнистих і суцільних деталей з фланцем, деталей типу гільз, втулок і стаканів, а також крупногабаритних поковок з подовженою віссю типу валів, фланців і чаш і програмне забезпечення для розрахунку технологічних силових і деформаційних режимів, що забезпечують необхідні показники якості, допустимі співвідношення геометричних параметрів і рівень питомих навантажень на інструмент. З застосуванням такої методики розроблені і передані на ряд підприємств ресурсозберігаючі технології і креслення штампів комбінованого видавлювання порожнистих і стрижневих деталей з фланцем і типу гільз і втулок, а також крупних заготовок типу валів, фланців і чаш.

На основі проведених досліджень і встановлених закономірностей комбінованого деформування обґрунтовані і запропоновані вдосконалені і перспективні способи видавлювання: маловідходного і безвідходного видавлювання порожнистих деталей типу втулок і кілець з напівбезперервних багатоштучних заготовок; видавлювання порожнистих деталей з попередженням появи дефектів форми за допомогою технологічних буртів; видавлювання складнопрофільованих порожнистих деталей в рухомій матриці. Розроблено технологічні способи отримання порожнистих деталей зі змінною товщиною стінки і зі складним зовнішнім профілем, що сприяють розширенню можливостей процесів штампування за рахунок ускладнення конфігурації одержуваних деталей. Запропоновано нові способи: радіально-поздовжнього видавлювання, що дозволяє отримати фасонні бічні поверхні стаканів, комбінованого деформування з поділом для відрізки заготовок і отримання деталей типу втулок і кілець з гладкими і фасонними поверхнями. Спосіб комбінованого деформування з переважним розвитком зсувних компонент деформації ефективний для поліпшення опрацювання металу і рекомендований для виготовлення крупногабаритних заготовок. На нові способи деформування, що дозволяють істотно розширити номенклатуру отримуваних виробів, отримані патенти України.

Підвищення ефективності нових технологій досягнуто за рахунок зниження матеріаломісткості і трудомісткості виробництва, розширення номенклатури деталей, підвищення якості деталей і надійності технологічного оснащення.

Результати досліджень та розроблені на їх основі методи розрахунків, лабораторні установки та програми використовуються також в наукових дослідженнях і навчальному процесі ДДМА.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів об'ємного пластичного формоутворення на базі розвитку наукових основ і вдосконалення технологічних способів і режимів комбінованого деформування.

1. На підставі проведеного літературного аналізу встановлено проблеми і шляхи розвитку процесів об'ємного пластичного формоутворення заготовок і точного штампування деталей. Визначено основні напрями вдосконалення даної галузі обробки тиском, які полягають у створенні нових способів, що базуються на комбінованих методах обробки, застосуванні нових методик проектування процесів, заснованих на нових і вдосконалених методах моделювання процесів об'ємного деформування, в тому числі, на методах прогнозування закономірностей формоутворення і деформовності матеріалів. На основі комбінаторного методу і методу розробки морфологічних карт розширена сфера пошуку та запропоновано нові схеми комбінованого деформування.

2. Встановлено можливості і властивості розроблених кінематичних модулів нових конфігурацій, що моделюють течію металу в умовах об'ємного і плоского деформованого стану. Проаналізовано такі їх властивості, як універсальність, пристосовність, здатність до використання рішень, отриманих в одних умовах, при зміні напрямків навантаження і витікання, що сприяло подальшому розвитку методу кінематичних модулів для аналізу процесів пластичного деформування на основі балансу енергетичних витрат на кінематично можливих швидкостях переміщень. Співставленні різні кінематичні модулі і встановлено перевагу трикутних модулів з криволінійними сторонами для процесів видавлювання металу к осі симетрії і трапецеїдальних модулів при витіканні від осі симетрії.

3. Визначено на основі аналізу експериментальних даних проведених в камері високого тиску на зразках, що піддаються спільному крученню з розтягуванням, що основний вплив на накопичення пошкоджень і їх заліковування надає не тільки схема напружено-деформованого стану та рівень деформації, але і швидкість зміни показників напруженого стану, тобто похідна шляху деформування по накопиченій інтенсивності деформацій. Результати досліджень впливу на пластичність металів 3-го інваріанту тензора напружень дозволили встановити межі застосовності феноменологічних критеріїв деформовності без руйнування в залежності від інтервалу значень другої похідної від показника напруженого стану. Для шляхів деформування з великою кривиною на величину граничних деформацій помітний вплив здійснюють перша і друга похідні від показників напруженого стану. Ці похідні для сталей різних марок істотно впливають на величину коефіцієнта, що враховує історію деформування. Максимальне значення цей коефіцієнт досягає при $\frac{d\eta}{de_u} > 3,0$.

4. Отримав подальший розвиток метод розрахунку технологічної деформовності металу, що дозволяє прогнозувати граничне формозмінення

заготовки в процесах поетапного деформування за допомогою урахування ефекту відновлення пластичності холоднодеформована металу при використанні проміжних відпалів. Метод поширений також на процеси гарячого пластичного деформування для прогнозування ефекту відновлення пластичності металу в технологічних паузах, що дозволило розробити режими підвищення в 1,3-1,6 рази граничної ступеня формозміни заготовок в складних умовах деформування.

5. Встановлено області раціонального застосування розрахункових схем, що містять кінематичні модулі з прямолінійними і криволінійними межами, із залученням прийомів отримання верхніх оцінок потужності сил деформування без використання процедур лінеаризації інтенсивності швидкостей деформації, що дозволяє більш повно відобразити характер зміни швидкостей одночасного видавлювання металу в декількох напрямках. Розроблено на основі вдосконалених трапецеїдальних, трикутних і криволінійних кінематичних модулів комплекс залежностей для розрахунку силового режиму деформування і поетапного збільшення розмірів деталей в залежності від технологічних параметрів процесів осесиметричного суміщеного радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем і осьовим відростком. При цьому уточнення верхньограничних оцінок для силових параметрів досягає до 40%, а в прогнозуванні параметрів формозміни - до 60%.

6. На основі проведених експериментальних і теоретичних досліджень холодного комбінованого видавлювання деталей з фланцем встановлені зони з граничним вичерпанням ресурсу пластичності на зовнішній поверхні і на поверхні розділу течії, уточнені обмеження і можливості процесу формозміни заготовок з різних матеріалів. При суміщеному радіально-поздовжньому видавлюванні порожнистих деталей типу «стакан з фланцем» небезпечною зоною є периферія фланця, а при видавлюванні стрижневих деталей з фланцем і відростком – поверхні поділу течії металу. Запропоновані способи підвищення граничного ступеня формозмінення осесиметричних заготовок шляхом використання протитиску, поділу осередків деформації, комбінування видавлювання з висадкою та ін.

7. Визначено енергетичним методом, що на приведений тиск радіально-прямого видавлювання з роздачею порожнистих деталей найбільш впливають відносні товщина стінки, товщина дна стакану і умови контактного тертя. При зменшенні значень безрозмірного параметра, що характеризує товщину стінки, від 0,6 до 0,2 відбувається збільшення величини приведенного тиску на 40% через підвищення ступеня деформації в зоні розвороту течії металу з радіального напрямку на пряме. Експериментальний аналіз і МСЕ-моделювання впливу параметрів деталі на силовий режим процесу радіально-прямого видавлювання і ступінь накопиченої деформації підтвердили адекватність результатів розрахунків по енергетичній моделі. Найбільше перевищення розрахункових значень сил деформування над експериментальними даними склало для заготовок з алюмінієвих сплавів 11%.

8. Встановлено шляхом співставлення силового режиму виготовлення порожнистих виробів типу стакану в процесах зворотного, прямого, прямого - «безматричного», радіально-прямого з роздачею (і його різновидів) видавлювання, що в процесі радіально-прямого видавлювання з роздачею сила деформування може бути знижена в кілька разів у порівнянні зі зворотним і прямим видавлюванням. Для способу прямого видавлювання з роздачею визначені оптимальні для опрацювання металу кути матриці, рівні 25° - 30° . Для зниження нерівномірності деформованого стану запропоновано зворотне видавлювання (або наскрізну прошивку) доповнити прямим видавлюванням порожнистого напівфабрикату, перевернутого на 180° . Результати дослідження силового режиму дозволили запропонувати новий спосіб експлуатації пуансона, як найбільш навантаженого при зворотному видавлюванні інструменту, за яким не допускається витягування пуансона з видавленої деталі до моменту їх спільного видалення з порожнини матриці.

9. Встановлено енергетичним методом верхньої оцінки і МСЕ режими видавлювання і оптимальні значення кута нахилу твірної конусної оправки ($\beta = 46^{\circ}$ - 52°), при яких приведений тиск процесу радіально-прямого видавлювання з обтисненням мінімальний. Тиск деформування при послідовному комбінованому видавлюванні вище тисків радіального (доцентрового) видавлювання в 1,5-2,1 рази залежно від величини зазору для прямої течії металу. Процес ефективний для профілювання внутрішньої поверхні трубчастих деталей за рахунок зміни зазорів між рухомою оправкою і матрицею, а також профілювання самої оправки.

10. Розширено уявлення про закономірності процесів комбінованого деформування, що дозволили розробити нові способи формоутворення і маловідходного видавлювання деталей: напівбезперервне видавлювання порожнистих деталей типу кілець і втулок зі змінною товщиною стінки з багатоштучної заготовки; видавлювання деталей з попередженням дефектів за допомогою заготовок спеціальної форми; комбіноване деформування із зсувом; видавлювання порожнистих деталей з потовщеннями на зовнішній поверхні; комбіноване видавлювання складнопрофільованих деталей; видавлювання фланців з протитиском та ін. Розроблено і запатентовано пристрої для способів деформування в рухомих і роз'ємних матрицях, а також для дослідження умов деформування і вимірювання сил контактного тертя.

11. Розроблено технологічні рекомендації з проектування процесів комбінованого деформування з розглядом основних етапів розробки процесів на основі створеної бази розрахункових моделей. Запропоновано нові способи і оснащення комбінованого деформування великих заготовок і прецизійних деталей. Методики і результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються в навчальному процесі і в науково-дослідних роботах академії. Методичні матеріали, рекомендації з проектування технологічних процесів комбінованої обробки великих заготовок, процеси і штампове оснащення передані для освоєння на промислові підприємства. Впровадження розробок дозволило підвищити техніко-економічні показники процесів точної об'ємного штампування

деталей і формоутворення великих заготовок типу валів, фланців і чаш. Сумарний частковий економічний ефект від впровадження розробок склав 1750 тис. грн., очікуваний економічний ефект становить 2890 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Алиева Л. И. Оценка и прогнозирование отклонений формы деталей при холодном выдавливании / Л. И. Алиева // Пластическая деформация металлов : Коллективная монография. – Днепропетровск : НМетАУ, 2014. – С. 353–369. – ISBN 978-617-7109-18-0.

2. Aliieva L. Application of fracture criteria in technological problems of metal forming / L. Aliieva // XVI International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» : a collective monograph. – Chénstohov, 2015. – P. 94–99. – ISBN 978 -83-63989-27-9.

3. Aliieva L. Cold extrusion shaping of parts with flange / L. Aliieva // XVII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» : a collective monograph. – Chénstohov, 2016. – P. 183–188. – ISBN 978-83-63989-38-5.

4. Огородников В. А. Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении / В. А. Огородников, И.А. Деревенько, Л. И. Алиева // Монография. – Винница : ВНТУ, ООО «Меркьюри-Подолье», 2016. – 176 с.– ISBN 978-966-2696-69-1.

5. Алієва Л. І. Основи феноменологічної теорії деформовності та її застосування до процесів обробки металів тиском / Л. І. Алієва, В. А. Огородніков, О. В. Грушко. // Теорія та практика обробки матеріалів тиском : колективна монографія. – Запоріжжя: вид. АТ «Мотор-Січ», 2016. – С. 5–31. – ISBN 978-966-2906-60-8.

6. Алиева Л. И. Анализ силового режима и формоизменения при поперечном выдавливании деталей с отрезками / Л. И. Алиева, Р. С. Борисов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 11. – С. 9–11.

7. Оценка деформируемости заготовок при радиальном выдавливании с противодавлением / Е. И. Коцюбивская, И. О. Сивак, Л. И. Алиева, С. В. Куценко // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 29–33.

8. Формоизменение заготовки при радиально-прямом выдавливании на оправке / И.С. Алиев, Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков [и др.] // Наукові праці ДНТУ. Серія «Металургія». – 2008. – № 10 (141). – С. 201–205. – URL: <http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/10404> .

9. Новые способы выдавливания для безотходного изготовления полых деталей типа втулок и колец / Л. И. Алиева, О. В. Чучин, Е. Н. Бондарева, Я. Г. Жбанков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3 (24). – С. 86–91.*

10. Особенности формоизменения полых деталей с фланцем в процессах комбинированного радиально-обратного выдавливания / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина, Я. Г. Жбанков, К. Крюгер // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 115–119.*

11. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion / I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhibankov // *Metallurgical and Mining Industry. – Dnepropetrovsk, 2011. – Vol. 3. – № 7. – P. 17–22.*

12. Параметры модели, формирующей карту материала в процессах обработки давлением / В. А. Огородников, Л. И. Алиева, В. М. Кожушаный, И. А. Деревенько // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 91–98.*

13. Алиева Л. И. Анализ заполнения полости штампа в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, П. Абхари, Е. Н. Бондарева // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». – Київ, 2011. – № 63. – С. 285–288.*

14. Алиева Л. И. Силовые режимы радиального выдавливания деталей с высоким фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 4. – С. 24–26.*

15. Огородников В. А. Параметры напряженного состояния диаграмм пластичности / В. А. Огородников, Л. И. Алиева, И. А. Деревенько // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 10–18.*

16. Алиева Л. И. Моделирование процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа стакан с фланцем / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // *Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2012. – № 47 (953). – С. 3–9.*

17. Aliieva L. Analysis of billet deformation during the combined radial-backward extrusion / L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhibankov // *New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. – Czestochowa : Quick-druk, 2012. – P. 389–396.*

18. Огородников В. А. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / В. А. Огородников, Л. И. Алиева, И. А. Деревенько // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». – 2012. – № 64. – С. 201–207.*

19. Алиева Л. И. Исследование деформированного состояния при комбинированном радиально-обратном выдавливании полых деталей с фланцем / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // *Вестник Донского ГТУ : сб. науч. тр. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2012. – С. 195–198.*

20. Алиева Л. И. Ресурс пластичности в процессах комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, Р. И. Сивак // *Обработка*

материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 11–17.

21. Алиева Л. И. Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей с фланцем / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия 2 «Технология машиностроения и материалы». – М. : МГТУ «МАМИ», 2013. – № 2 (16). – Т. 2. – С. 163–172.

22. Комбинированная пластическая деформация со сдвигом для получения крупных заготовок / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, М. А. Маркова, Л. В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36). – С. 3–9.

23. Технологическая деформируемость при штамповке стаканов с фланцем / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Н. С. Грудкина, А. Д. Комиренко // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (11). – С. 20–24. – URL : [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(11%D0%95\)_2013/article/5.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(11%D0%95)_2013/article/5.pdf).

24. Калюжний В. Л. Порівняльний аналіз процесів зворотного видавлювання і прямого видавлюванням з роздачою вісесиметричних виробів з порожниною постійного діаметру / В. Л. Калюжний, Л. І. Алієва, І. П. Куліков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 4 (37). – С. 87–92.

25. Алиева Л. И. Влияние гидростатического давления и истории его изменения на пластичность в задачах обработки металлов давлением / Л. И. Алиева, В. А. Огородников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 118–128.

26. Алиева Л. И. Исследование процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей с фланцем с разьединенным очагом деформации / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // Вестник КГИУ. Республ. науч. журнал. – Темиртау, 2014. – № 1 (4). – С. 19–24.

27. Zhbankov I. G. New schemes of forging plates, shafts and discs / I. G. Zhbankov, A. V. Perig, L. I. Aliieva // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 82. – P. 287–301. – Access : DOI : 10.1007/s00170-015-7377-7.

28. Aliieva L. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / L. Aliieva, Y. Zhbankov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 11. – P. 175–183.

29. Експериментальне дослідження деформованого стану при комбінованому радіально-поздовжньому видавлюванні / Алієва Л. І., Солодун Є. М., Гончарук Х. В., Шкіра О. В. // Вісник ХНТУ. – Херсон, 2015. – № 4 (55). – С. 82–87.

30. Алиева Л.И. Анализ процесса последовательного радиально-прямого выдавливания методом кинематических модулей / Л.И. Алиева, О.В. Чучин // Научный вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2015. – № 3 (18E). – С. 5–21. – URL : [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963\(18%D0%95\)_2015/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963(18%D0%95)_2015/article/3.pdf).

31. Алиева Л.И. Моделирование процесса комбинированного выдавливания фланцев на полых деталях / Л. И. Алиева // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». – 2016. – № 1 (76). – С. 20–30.
32. Алиева Л. И. Процессы комбинированного деформирования и выдавливания // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 100–108.
33. Алиева Л. И. Способы снижения сил деформирования при холодном выдавливании / Л. И. Алиева, О. В. Чучин, П. В. Гнездилов // Вісник ХНТУ. – Херсон, 2016. – № 1 (56). – С. 18–25.
34. Алиева Л. И. Оценка деформированного состояния деталей в процессе холодного выдавливания / Л.И. Алиева // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 2. – С. 77–85.
35. Алиева Л. И. Деформирование заготовок способом радиального выдавливания с противодавлением / Л.И. Алиева // Вісник ХНТУ. – Херсон, 2016. – № 2 (57). – С. 29–36.
36. Алиева Л. И. Критерии деформируемости и возможности их использования в задачах обработки давлением / Л. И. Алиева // Вісник ДДМА : сб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 17–21.
37. Алиева Л. И. Комбинированное радиально-обратное выдавливание стержневых деталей с фланцем / Л.И. Алиева // Вестник КГИУ. Республ. науч. журнал. – Темиртау, 2016. – №4 (15). – С. 14–22.
38. Алиева Л.И. Радиально-обратное выдавливание деталей с фланцем / Л.И. Алиева // Физика и техника высоких давлений. – 2016. – Том 26. – № 3–4. – С. 43–56.
39. Zhbakov I. G. Calculation of recovery plasticity in multistage hot forging under isothermal conditions / Iaroslav G. Zhbakov, Alexander V. Perig, Leila I. Aliieva // Springer Plus – 2016. – 5:1881. DOI: 10.1186/s40064-016-3570-x.
40. Алиева Л. И. Управление формообразованием деталей с фланцем при холодном выдавливании / Л.И. Алиева // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2016. – № 30 (1202). – С. 13–20.
41. Алиева Л. И. Образование дефектов деталей в процессах холодного выдавливания / Л.И. Алиева // Вісник ХНТУ. – Херсон, 2016. – № 4 (59). – С. 18–27.
42. Калюжный А. В. Силовые режимы извлечения пуансонов из деталей после холодного обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей / А. В. Калюжный, Л. И. Алиева, Л. В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 2 (43). – С. 67–76.
43. Алиева Л.И. Формоизменение стержневых деталей с фланцем при радиально-прямом выдавливании / Л.И. Алиева, К.В. Гончарук, А.В. Шкира // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2016. – № 31 (1203). – С. 5–10.
44. Алиева Л. И. Силовой режим формообразования полых деталей при холодном радиально-прямом выдавливании с обжатием / Л. И. Алиева // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – № 38 (1210). – С. 5–12.

45. Алиева Л. И. Моделирование процесса радиально-обратного выдавливания полых деталей / Л. И. Алиева, Н.С. Грудкина, К. Крюгер // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2017. – № 1 (79). – С. 91–99. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.95873>.

46. Алиева Л. И. Технологические возможности процессов комбинированного радиально-продольного выдавливания / Л. И. Алиева // *Технологические системы*. – 2017. – № 1 (78). – С. 31–40.

47. Моделирование процесса холодного выдавливания полых изделий / В. Л. Калюжный, Л. И. Алиева, Д. А. Картамышев, И. Г. Савчинский // *Металлург*. – 2017. – № 5. – С. 22–27.

48. Пат. 104817 Україна, МПК В 21 К 22/04. Спосіб виготовлення деталей з фланцем / Л. І. Алієва; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201506428; заявл. 30.06.15; опубл. 25.02.16, Бюл. № 4.

49. Пат. 105542 Україна, МПК G 01 N 3/08, В 21 J 13/00. Пристрій для дослідження умов контактного тертя / Л. І. Алієва, заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201508939; заявл. 16.09.2015; опубл. 25.03.2016. – Бюл. № 6.

50. Пат. 108568 Україна, МПК В 21 J 1/04. Спосіб інтенсивного пластичного деформування заготовок/ Л. І. Алієва, заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201513087; заявл. 30.12.2015; опубл. 25.07.2016. – Бюл. № 14.

51. Пат. 108586. Україна, МПК В21J 5/12, В21J 13/02. Пристрій для видавлювання порожнистих виробів з фасонною зовнішньою поверхнею / Л. І. Алієва, заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201600088; заявл. 04.01.2016; опубл. 25.07.2016. – Бюл. № 14.

52. Пат. 82189 Україна, МПК В 21 J 1/04. Спосіб пластичного деформування виробів Л. І. Алієва, І. А. Деревенько, Я. Г. Жбанков, Л. В. Таган; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201301279; заявл. 04.02.2013; опубл. 25.07.2013. – Бюл. № 14.

53. Aliiev I. S. Press tools for the extrusion hollow parts with complex surface profiles / I. S. Aliiev, L. I. Aliieva, I. G. Zhbankov // 9th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry» RaDMI. – Serbia : Vrnjačka Banja, 2009. – September. – P. 139–143.

54. Коцюбивская Е. И. Пластичность металлов при плоском напряженном состоянии / Е. И. Коцюбивская, Л. И. Алиева // *Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов ОМД. Материалы МНТК 11–14 октября 2005*. – Санкт-Петербург: БГТУ. – С. 86–90.

55. Алиева Л. И. Перспективные направления развития процессов точной объемной штамповки / Л. И. Алиева // *Машины та пластична деформація металів. Матеріали II МНТК*. – Запоріжжя, 2012. – С. 71–72.

56. Алиева Л. И. Феноменологические критерии разрушения и их применение в задачах технологической механики / Л. И. Алиева,

В. А. Огородников // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов ОМД. Материалы МНТК. – СПб, 2014. – С. 33–39.

57. Алиева Л. И. Конструирование штампов для комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали XVI МНТК – Одеса–Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – С. 77.

58. Алиева Л. И. Комбинированное радиально-прямое выдавливание деталей с фланцем / Л. И. Алиева // Научно-технический прогресс в металлургии. Материалы VIII МНТК 23–24 октября 2015 года. – Темиртау, 2015. – С. 377–382.

59. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. XVI International scientific conference. – Czestochowa, 2015. – P. 90–93.

60. Алиева Л. И. Технологические возможности процессов радиально-прямого выдавливания с раздачей / Л. И. Алиева, О. В. Чучин // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Материалы XII МНТК. – Старый Оскол : НИТУ МИСиС, 2015. – С. 148–153.

61. Дефектообразование в процессах холодного выдавливания / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, Н. С. Грудкина, П. Б. Абхари // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Матеріали VII МНТК. – Київ – Херсон, 2016. – С. 148–152.

62. Алиева Л. И. Свойства кинематических модулей для анализа процессов выдавливания / Л. И. Алиева // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали XVII МНТК. – Одеса–Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – С. 69–71.

63. Алиева Л. И. Восстановление пластичности при радиальном выдавливании с промежуточными отжигами / Л. И. Алиева, Л. В. Таган, Е. И. Коцюбивская // Сучасні технології промислового комплексу-2015. Матеріали I МНПК. – Херсон, 2015. – С. 33–35.

64. Алиева Л. И. Методика исследования контактного трения в процессе холодного выдавливания // Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Сучасні технології промислового комплексу-2016. Матеріали II МНПК 14–18 вересня 2016 року. – Херсон, 2016. – С. 121–124.

65. Алиева Л. И. Комбинированное трехстороннее выдавливание полых деталей с отростком и фланцем / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, А. В. Шкира // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали XVIII МНТК. – Київ : НТУ України «КПІ», 2017. – С. 164–166.

66. Алієва Л. І. Розвиток процесів об'ємного пластичного деформування на основі застосування схем комбінованої течії / Л. І. Алієва // Пластична деформація металів. Матеріали XI МНТК. – Дніпро : Національна металургійна академія України, 2017. – С. 41–42.

67. Оценка технологической деформируемости при поперечном выдавливании / Л. И. Алиева, Р. И. Сивак, Е. И. Коцюбивская, С. И. Сухоруков //

Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали XVIII МНТК 29 червня – 1 липня 2017 – Київ : НТУ України «ХП», 2017. – С. 108–110.

Додатково наукові результати відображені в роботах:

68. Буренников Ю. А. Применение промежуточных отжигов для улучшения механических характеристик заготовок, получаемых выдавливанием / Ю. А. Буренников, К.И. Сивак, Л.И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 384–387.

69. Жбанков Я. Г. Восстановление пластичности при изотермическом горячем дробном деформировании / Я. Г. Жбанков, Л. И. Алиева, В. М. Михалевич // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 7. – С. 12–17.

70. Алиева Л. И. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, В. Ю. Станков // Вісник НТУ «ХП». – Харків, 2013. – № 43 (1015). – С. 3–11.

71. Алиева Л. И. Деформируемость металла в процессе трехстороннего комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук // Вісник НТУ «ХП» – Харків, 2014. – № 43 (1086). – С. 3–7.

72. Алиева Л. И. Особенности проектирования процессов холодного выдавливания на основе развития модульного подхода в рамках энергетического метода / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // Вісник НТУ «ХП». – Харків, 2015. – № 24 (1133). – С. 21–32.

73. Алиева Л. И. Неравномерность деформированного состояния заготовок при холодном выдавливании / Л. И. Алиева // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2016. – № 2 (43). – С. 57–66.

74. Алиева Л. И. Комбинированное выдавливание упрочняющегося материала / Л.И. Алиева, О.В. Чучин, Е.В. Мироненко // Научный вестник ДГМА сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (20Е). – С. 70–79. – URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(19%D0%95\)_2016/article/18.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(19%D0%95)_2016/article/18.pdf).

75. Формоизменение в процессе комбинированного выдавливания полых деталей типа стакана / Л. И. Алиева, И.С. Алиев, Д.А. Картамышев, О. В. Чучин // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2017. – №1 (44). – С. 100–107.

76. Напряженно-деформированное состояние при холодном выдавливании втулок с внутренним фланцем / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Н. С. Грудкина А. Р. Гарифулина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 9. – С. 18–21.

77. Алиева Л. И. Проектирование процессов холодного выдавливания деталей с фланцами / Л. И. Алиева // Научный вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2016. – № 3 (21Е). – С. 19–27. – URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963\(21%D0%95\)_2016/article/5.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963(21%D0%95)_2016/article/5.pdf).

78. Технологія кування : підручник для студентів вищих технічних навчальних закладів / Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є. Марков, Л. І. Алієва. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 268 с.

79. – 95. Патенти №№ 32102, 67960 А, 72113 А, 32229, 32661, 38879, 45702, 48902, 51926, 59104, 60575, 73920, 74207, 74528, 84078, 107950, 117796.

Особистий внесок автора в роботах, які опубліковані у співавторстві:

[10, 11, 16, 17, 21, 26] – постановка задач математичного моделювання, розробка розрахункових схем, аналіз впливу параметрів процесу деформування на технологічні режими і кінцеву формозміну порожніх виробів з фланцем; [30, 45] – вибір кінематичних модулів, аналіз властивостей і можливості їхнього застосування для моделювання процесів видавлювання; [14, 29, 43, 65] – проведення теоретичних і експериментальних досліджень формозміни при комбінованому видавлюванні стрижневих деталей; [28, 53] – розробка розрахункових схем, аналіз процесу радіально-прямого видавлювання з обтисненням і розробка основних функціональних залежностей; [4, 5, 18, 25, 57, 67] – дослідження феноменологічних критеріїв деформовності та можливості їхнього застосування в технологічних задачах ОМТ; [12, 15, 20, 23] – розробка методик оцінки деформовності в процесах видавлювання з урахуванням умов навантаження; [38, 63, 68, 69] – розробка феноменологічних моделей оцінки впливу проміжних відпалів і технологічних пауз на відновлення пластичності; [7, 67] – виконання розрахунків і оцінка деформовності заготовок у процесах холодного видавлювання з протитиском; [24, 47] – розробка розрахункових схем скінчено-елементної моделі процесів прямого видавлювання з роздачею і узагальнення результатів дослідження; [30, 60, 74, 75] – розробка розрахункових схем, математичних моделей силових, деформаційного режимів процесів поперечно-прямого видавлювання з роздачею порожніх деталей і аналіз отриманих залежностей; [42] – аналіз умов навантаження й шляхів підвищення стійкості інструмента, розробка конструкцій штампів для процесів видавлювання; [8, 28, 60] – розробка методик і оснащення для експериментів, оцінка силового режиму і можливостей радіально-поздовжнього видавлювання порожніх виробів зі складним профілем; [9] – моделювання й аналіз процесу прошивання порожніх деталей з суцільних заготовок; [13, 19, 29, 59, 61, 76] – експериментальне дослідження напружено-деформованого стану, дефектоутворення і можливостей процесів комбінованого деформування; [22, 27, 70] – обґрунтування вдосконалення процесів виготовлення довгомірних виробів на основі застосування способів комбінованого деформування з розвиненими деформаціями зсуву; [72] – розробка алгоритмів і методик проектування технологічних процесів об'ємного пластичного деформування; [52, 79-95] – пропонування основних ідей корисних моделей, теоретичне й експериментальне обґрунтування закономірностей нових способів і пристроїв деформування.

АНОТАЦІЯ

Алієва Л. І. Розвиток наукових основ і розробка ресурсозберігаючих процесів об'ємного формоутворення на основі способів комбінованого деформування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2018.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності технологічних процесів об'ємного деформування на базі розвитку наукових основ і вдосконалення технологічних способів і режимів комбінованого деформування.

На основі комбінаторного методу розроблені класифікації і систематизовано схеми комбінованого деформування, що дозволило запропонувати ряд нових способів об'ємного формоутворення.

Розвинено метод кінематичних модулів і дано оцінку їхніх властивостей, що сприяло розширенню їх застосування для вирішення задач аналізу процесів об'ємного деформування. Співставленні різні кінематичні модулі і встановлено перевагу трапецеїдальних і трикутних модулів з криволінійними сторонами.

Для оцінки технологічної деформовності при холодній об'ємній обробці тиском розглянуті можливості критеріїв руйнування, в основу яких покладена гіпотеза про вплив першого і третього інваріантів тензора напружень на величину витрат ресурсу пластичності при пластичній деформації металу.

Виконано теоретичні дослідження методами скінчених елементів і верхньої оцінки і розроблено комплекс математичних моделей процесів комбінованого суміщеного і послідовного радіально-поздовжнього видавлювання. Комп'ютерним моделюванням виявлені закономірності формоутворення з урахуванням кінематичного впливу і розроблені перспективні способи комбінованого деформування і видавлювання.

Розроблено рекомендації для проектування нових ресурсозберігаючих процесів об'ємного формоутворення деталей на основі використання комбінованих способів деформування. Впроваджено нові технологічні процеси комбінованого деформування, які дозволили підвищити якість виробів і знизити їх собівартість.

Ключові слова: комбіноване деформування, радіально-поздовжнє видавлювання, метод кінематичних модулів, метод скінчених елементів, теорія деформовності, напружено-деформований стан, силовий режим, формоутворення.

ABSTRACT

Aliieva L. I. Development of scientific foundations and elaboration of resource-saving processes of volumetric shaping on the basis of combined deformation methods. - Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technical Sciences in the Specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Donbass State Engineering Academy, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2018.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and technical problem of increasing the efficiency of technological processes of volumetric plastic deformation on the basis of the development of scientific foundations and improvement of technological methods and modes of combined deformation.

On the basis of the combinatorial method, the classification and systematization of the combined deformation schemes have been developed, which allowed us to propose a number of new methods of volumetric shaping.

The method of kinematic modules is developed and their properties are evaluated, which contributes to their successful application for solving the problems of volumetric deformation process analysis. Different kinematic modules are compared and the advantage of trapezoidal and triangular modules with a curvilinear boundary is established.

To assess the technological deformability while cold volumetric machining, the possibilities of failure criteria based on the hypothesis of the influence of the first and third invariants of the stress tensor on the magnitude of the plasticity resource flow during plastic deformation of a metal are considered.

Theoretical studies by finite element and upper bound methods have been carried out and a complex of mathematical models of combined and sequential radial-longitudinal extrusion processes have been developed. The patterns of shape formation by computer modeling have been studied, taking into account the influence of kinematic effects, and advanced methods of combined deformation and extrusion have been developed.

The recommendations for designing new resource-saving processes of volumetric shaping of parts based on the use of combined deformation methods have been developed. New technological processes of combined deformation were implemented, which allowed improving the quality of products and reducing their cost price.

Keywords: combined deformation, radial-longitudinal extrusion, method of kinematic modules, finite element method, deformability theory, stress-strain state, power regime, shape formation.

АННОТАЦИЯ

Алиева Л. И. Развитие научных основ и разработка ресурсосберегающих процессов объемного формообразования на основе способов комбинированного деформирования. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2018.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической проблемы повышения эффективности технологических процессов объемного пластического деформирования на базе развития научных основ и совершенствования технологических способов и режимов комбинированного деформирования.

На основании проведенного литературного анализа, установлены проблемы и пути развития процессов объемного пластического деформирования и точной объемной штамповки.

На основе метода морфологических карт и комбинаторного метода разработаны классификации процессов комбинированного деформирования и систематизированы основные схемы выдавливания, позволившие предложить ряд новых способов штамповки.

Развит метод кинематических модулей и дана оценка их свойствам, что способствует их успешному применению для решения задач анализа процессов объемного пластического формообразования. Сопоставлены различные кинематические модули – кинематически возможные поля скоростей перемещения и установлено преимущество трапецеидальных и треугольных модулей с криволинейными границами.

Для оценки технологической деформируемости при холодной объемной обработке рассмотрены возможности критериев разрушения, в основу которых положена гипотеза о влиянии первого и третьего инвариантов тензора напряжений на величину расхода ресурса пластичности при пластической деформации металла.

Введено пространство "Накопленная интенсивность деформаций – безразмерные показатели напряженного состояния», в котором даны пределы применимости критериев разрушения по параметрам первых и вторых производных от показателей напряженного состояния.

Развит метод учета восстановления пластичности холоднодеформированного металла при промежуточных отжигах и в паузах при горячем дробном деформировании, позволяющий рассчитать рациональные режимы деформирования, обеспечивающие высокую технологическую пластичность металла.

Выполнены теоретические исследования энергетическим методом верхней оценки и разработан комплекс математических моделей процессов совмещенного радиально-обратного и радиально-прямого выдавливания деталей с фланцем, а также последовательного радиально-прямого выдавливания с раздачей полых

деталей типа гильз и радиально-прямого выдавливания с обжатием деталей типа втулок с переменной толщиной стенки. Получены зависимости, позволяющие определить силовой режим деформирования с учетом влияния геометрии инструмента, схемы и формы очага деформации, условий контактного трения, а также прогнозировать поэтапное формообразование штампуемого изделия. Сравнение теоретических расчетных формул и экспериментальных значений давлений деформирования и скоростей течения между собой, а также с результатами, полученными методом конечных элементов и экспериментальными данными, показало приемлемость полученных зависимостей для технологических расчетов силовых параметров и оценки формообразования деталей.

Результаты компьютерного и физического моделирования напряженно-деформированного состояния и формообразования способствовали расширению представлений о закономерностях комбинированного деформирования и разработке новых способов выдавливания и объемного пластического деформирования. Разработаны схемы комбинированного деформирования, позволяющие создать интенсивные сдвиговые деформации в заготовке.

Анализ силового режима позволил разработать новую концепцию эксплуатации тяжело нагруженного инструмента – пуансонов для выдавливания глухих полостей, исключая растяжение пуансона при обратном ходе и съеме готовой детали. На новые способы и устройства получены патенты Украины.

Предложены рекомендации по проектированию новых ресурсосберегающих технологических процессов и штамповой оснастки для комбинированного выдавливания полых и стержневых деталей с фланцем и полых деталей типа гильз и втулок. Разработаны и переданы в промышленное освоение технологические процессы и чертежи оснастки для выдавливания точных заготовок полых деталей типа стаканов и стержневых деталей с фланцем и крупногабаритных изделий типа валов и стаканов. Внедрены новые технологические процессы комбинированного деформирования (при штамповке и ковке), которые позволили повысить эффективность производства за счет улучшения качества поковок и снижения их себестоимости.

Ключевые слова: комбинированное деформирование, радиально-продольное выдавливание, метод кинематических модулей, метод конечных элементов, теория деформируемости, напряженно-деформированное состояние, силовой режим, формообразование.

Підп. до друку 02.02.2018. Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк. 4,3.
Обл.вид. арк. 4,6. Тираж 130 пр. Зам. № 12.

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №1633 від 24.12.2003