

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

**ЖБАНКОВ ЯРОСЛАВ ГЕННАДІЙОВИЧ**



УДК 621.735.3–416

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО  
ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ І УДОСКОНАЛЕННЯ  
ТЕХНОЛОГІЙ КУВАННЯ КРУПНИХ ПОКОВОК**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Краматорськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Алієв Іграмотдін Серажутдінович**,  
Донбаська державна машинобудівна академія Міністерства освіти і науки України (м. Краматорськ),  
завідувач кафедри «Обробка металів тиском».

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Матвійчук Віктор Андрійович**,  
Вінницький національний аграрний університет  
(м. Вінниця), завідувач кафедри «Електромеханічні системи, технології і автоматизація в АПК»;

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

доктор технічних наук, професор  
**Фролов Ярослав Вікторович**,  
Національна металургійна академія України (м. Дніпропетровськ),  
завідувач кафедри «Обробка металів тиском».

Захист відбудеться «28» жовтня 2016 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

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

Автореферат розісланий «2» вересня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.01,  
кандидат технічних наук, доцент



Ю. К. Доброносів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Основна проблема розвитку сучасного важкого машинобудування полягає в підвищенні якості, отриманні унікальних механічних властивостей продукції і зниженні матеріальних витрат в поєднанні з прийнятними експлуатаційними властивостями продукції. До найбільш поширених типів деталей заготівельного виробництва машинобудівних підприємств відносяться вироби типу роторів, валів, плит, кілець, труб і дисків. Обсяг виробництва таких деталей доходить до 95% всієї номенклатури заготівельного виробництва підприємства важкого машинобудування.

В сучасних економічних умовах, при скороченні ринків збуту вітчизняної продукції в країнах ближнього зарубіжжя, виникає необхідність в пошуку нових ринків збуту таких як ринок країн ЄС. Вимоги до якості продукції в західних країнах традиційно високі, крім того світовий ринок активно забезпечується продукцією Китаю та Індії, які пропонують прийнятну якість і низьку ціну. У зв'язку з цим гострим стає питання підвищення якості одержуваної продукції при мінімальній собівартості. Вирішення даного питання нерозривно пов'язане з впровадженням нових ресурсозберігаючих технологій, у тому числі, кування великих поковок на заводах важкого машинобудування України.

Якість крупних поковок багато в чому визначається способом кування, який істотно впливає на такі властивості матеріалу, як ударна в'язкість, відносне подовження і звуження. Спосіб кування (інструмент і режим деформування) дуже впливає на заварювання внутрішніх порожнин, що утворилися в зливку при його кристалізації. Для певних груп матеріалів схема кування грає визначальну роль при формуванні мікроструктури матеріалу. На даний момент існує низка способів кування описаних вище груп поковок, проте їх велика кількість і протиріччя в рекомендаціях щодо їх застосування не дозволяють з високим ступенем достовірності визначитися з конкретними технологіями для певних груп поковок. Це призводить до необхідності проведення великого числа додаткових досліджень в кожному конкретному випадку.

Основна частина теоретичних досліджень проводяться на основі методу скінченних елементів (МСЕ), який дозволяє прогнозувати з високим ступенем вірогідності параметри напружено-деформованого стану заготовки в процесі кування. Однак цей метод заснований на застосування великої кількості експериментальних даних і не дозволяє моделювати багато фізико-хімічних процесів, які супроводжують гаряче пластичне деформування сталі.

У зв'язку з викладеним, подальший розвиток методів розрахунку і удосконалення технологічних режимів, оснащення і заготовок для кування великих поковок є актуальною науковою проблемою і має важливе науково-практичне та народногосподарське значення для економіки України.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Результати роботи спрямовані на вирішення завдань, поставлених у Державній програмі розвитку і реформування гірничо-металургійного комплексу України на період до 2011 року і в Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року (постанова обласної Ради від 22.03.2002 р, номер 3 / 25-656). 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 кафедри "Обробка металів тиском" (ОМТ) Донбаської державної машинобудівної академії. Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), згідно планів Міністерства освіти і науки України та виконаних на кафедрі ОМТ ДДМА (№ держреєстрації 0106U001619, 0111U000883, 0113U000608, 0115U003123, 0109U002664, 0106U003216, 0111U006174, 0115U004736, 0112U001244), а також в рамках госпдоговірної науково-дослідної роботи з ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (договір Х-14-2013, № 0113U004776). Автор був відповідальним виконавцем при виконанні держбюджетної теми №0115U003123.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи - підвищення техніко-економічних параметрів технологічних процесів кування крупних поковок на базі розвитку наукових основ процесів гарячого пластичного деформування і вдосконалення технологічних способів і режимів кування.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і вирішені наступні завдання:

- систематизувати схеми кування крупних поковок і їхній вплив на параметри напружено-деформованого стану (НДС) заготовки та фізичні і механічні зміни в матеріалі, виділити основні фактори, що впливають на параметри НДС;

- скласти класифікації технологічних схем процесів кування крупних поковок на підставі виділених факторів впливу на НДС заготовки;

- розробити новий підхід до проектування технологічних процесів кування крупних поковок на основі застосування нових методів розрахунку;

- розробити метод розрахунку технологічної деформованості із врахуванням відновлення пластичності в процесах гарячого дробового деформування металів і сплавів, що дозволяє моделювати складні багатоперехідні процеси кування і прогнозувати можливі руйнування;

- адаптувати метод розрахунку еволюції мікроструктури металу в процесі гарячого пластичного деформування до процесів кування крупних поковок, провести аналіз і підібрати раціональні параметри нових схем кування на підставі даного методу;

- розвинути метод розрахунку механічних властивостей металів у вигляді кривих течії для процесів гарячого пластичного деформування на основі використання стандартних характеристик металу з метою збільшення ефективності використання МСЕ для моделювання процесів кування крупних поковок в виробничих умовах;

- вивчити особливості зміни параметрів НДС заготовки і зміни мікроструктури в процесах кування валів і плит інструментом спеціальної форми і створити на їх основі нові способи кування; розробити науково обґрунтовані рекомендації для проектування технологічних процесів кування валів і конструкції кувального інструменту;

- отримати залежності, що описують параметри НДС заготовки та особливості зміни мікроструктури в процесах кування дисків інструментом різної конфі-

гурації за спеціальними термомеханічними режимам; розробити науково обґрунтовані рекомендації для проектування процесів кування дисків;

- визначити особливості формування НДС заготовки в процесах кування кілець і труб інструментом різної конфігурації за спеціальними термомеханічними режимами; розробити науково обґрунтовані рекомендації для проектування технологічних процесів кування кілець і труб;

- розробити та впровадити у виробництво нові схеми деформування та методики проектування технологічних процесів кування;

- розробити і передати у виробництво нові рекомендації для дослідження і створення нових ресурсозберігаючих технологічних процесів кування крупних поковок.

**Об'єкт досліджень.** Технологічні процеси і оснащення кування крупних поковок.

**Предмет дослідження.** Закономірності процесів гарячого пластичного деформування, методи розрахунку напружено-деформованого стану та способи інтенсифікації процесів кування крупних поковок.

**Методи дослідження.** Математичне і фізичне моделювання процесів кування виконані з урахуванням основних положень теорії пластичності, теорії ОМТ, механіки деформованого твердого тіла, теорії теплопровідності і варіаційного числення. Для теоретичних досліджень був застосований метод скінченних елементів для визначення формозміни, розподілу температур, деформацій, напружень і силових характеристик процесу деформування.

Експериментальні дослідження включають в себе моделювання в лабораторних умовах і натурні дослідження в промислових умовах, метод координатних сіток, методи вимірювання механічних властивостей, а також методи планованого експерименту і математичної статистики. Промислові дослідження показників якості великих поковок проводилися на підставі даних ультразвукового контролю.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Отримав подальший розвиток метод оцінки технологічної деформівності в процесах гарячого дробового пластичного деформування, який враховує ефект відновлення пластичності металу в технологічних паузах, що дозволило розробити раціональні режими кування поковок типу дисків і валів, які забезпечують підвищену деформівність заготовки.

2. Отримала подальший розвиток модель процесу гарячого пластичного деформування, яка описується аналітичною залежністю, що дозволяє розраховувати зміну напружень течії металу під впливом температури і швидкості деформування і заснована на використанні та узагальненні стандартних механічних характеристик металу.

3. Вперше на основі моделей оцінки еволюції мікроструктури металу при гарячій пластичній деформації отримано залежності розподілу величини зерна в об'ємі заготовки при куванні за новими схемами деформування з керованим плином металу, що дозволили встановити раціональні режими кування які забезпечили підвищення рівномірності розподілу механічних властивостей крупних поковок типу валів і дисків.

4. Вперше на основі методу скінченних елементів встановлено закономірності зміни компонент зсувних деформацій в процесах протягування довгомірних поковок похилими та ступінчастими асиметричними бойками, які інтенсифікують проробку литого металу, що дозволило встановити раціональні форму і розміри ковальського інструменту.

5. Вперше на основі результатів теоретичних досліджень процесів кування валів встановлені залежності параметрів напружено-деформованого стану заготовки від форми і градієнта температурного поля, а також його розташування по відношенню до деформувального інструменту, що дозволило запропонувати механізм керування деформаційним полем поковки і розробити раціональні режими деформування.

6. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив термомеханічного режиму деформування заготовок з карбідних малопластичних сплавів на пластичність металу, які полягають у встановлених залежностях деформівності металу від технологічних режимів обробки, особливістю яких є нагрівання і витримка заготовки при температурі яка, перевищує верхню межу температурного інтервалу кування та диференційоване кування з паузами.

7. Вперше на основі теоретичних та експериментальних досліджень отримані аналітичні залежності, які описують формоутворення заготовки та враховують її вихідну форму, температурне поле, форму інструмента та кінематику його руху в процесах осадження, що дозволило розробити раціональні режими кування поковок типу дисків з мінімальною величиною відхилень форми та нерівномірності розподілу деформацій.

8. Отримали подальший розвиток закономірності формозміни заготовки в процесах кування порожнистих поковок типу труб і профільованих кілець, що дозволили запропонувати механізм перерозподілу металу заготовки в заданих напрямках за рахунок узгодження режимів обтисків і подач інструменту, а також варіювання параметрів температурного поля для підвищення точності і розширення номенклатури виробів що отримуються.

**Практичну цінність** дисертаційної роботи становлять наступні її основні результати:

- класифікації процесів кування поковок типу валів, плит, дисків, кілець і труб, отримані на основі застосування методу морфологічних карт і загального літературного аналізу стану питання в області кування крупних поковок. Розроблені класифікації дозволили отримати нові схеми кування наведених вище типів поковок;

- методики моделювання процесів гарячого пластичного деформування, що дозволяють найбільш повно досліджувати процеси кування великих поковок з урахуванням таких фізичних процесів в металі, як еволюція розмірів зерна і відновлення пластичності. Методика побудови кривих течії металу за стандартними довідковими характеристиками, що дозволяє мінімізувати тривалість та вартість підготовчого етапу моделювання процесів гарячого деформування;

- нові способи кування поковок типу валів і плит, засновані на застосуванні спеціальних форм інструменту, кінематичного і температурного факторів, що дозволяють підвищити рівень проробки металу заготовки і забезпечити в ній міні-

мальну нерівномірність розподілу деформацій. Рекомендації з призначення геометричних параметрів інструменту і температурно-швидкісних умов деформування заготовок;

- нові способи кування поковок дисків, засновані на застосуванні нових форм інструменту, механічного режиму і температурного стану заготовки, що дозволяють мінімізувати нерівномірність розподілу деформацій в заготовці, підвищити точність одержуваних виробів і розширити їх номенклатуру. Рекомендації з призначення геометричних параметрів інструменту та заготовки і температурно-швидкісних умов деформування заготовок;

- методики проектування технологічних процесів кування поковок труб і кілець. Рекомендації з призначення геометричних параметрів інструменту та заготовки і температурно-швидкісного режиму деформування протягуванням на оправці і розкочуванням на дорні;

- алгоритм проектування технологічних процесів кування крупних поковок основних типів, заснований на застосуванні нових методів розрахунку процесів гарячого пластичного деформування;

- розроблено, апробовано та впроваджено нові технологічні процеси кування великих валів, кілець і дисків, які дозволяють підвищити якість поковок, знизити кількість браку і зменшити їх собівартість за рахунок зменшення кількості переходів кування, нагрівань і часу підготовки виробництва. Розроблено і впроваджено режими кування поковок з карбідної сталі X12MФ, що дозволили істотно знизити кількість браку на виробництві. Сумарний економічний ефект від впровадження розробок склав 2720 тис. грн.

**Особистий вклад здобувача.** Всі основні наукові результати отримані автором самостійно. При проведенні науково-дослідних робіт, результати яких опубліковані в співавторстві, автором розроблена ідеологія, поставлені наукові завдання, виконані теоретичні дослідження, розроблені математичні моделі, алгоритми, проведений аналіз результатів чисельної реалізації, сформульовані висновки і розроблені рекомендації щодо вдосконалення технологій і оснащення для кування великих поковок. Автор брав участь у плануванні і проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманих результатів, а також у впровадженні результатів роботи у виробництво. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора відображений в анотації до списку опублікованих робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідались на міжнародних, всеукраїнських і регіональних науково-технічних (НТК) та науково-практичних конференціях (НПК), в тому числі: міжнародних НТК з проблем дослідження і вдосконалення технології та обладнання обробки тиском 2010-2015 рр. (Краматорськ, ДДМА); XIII International Scientific Conference. «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering» 2012 (м. Ченстохов, Польща); XII International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" 2012 (Vrnjačka Banja, Serbia); VIII, X та XI МНПК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» 2010, 2012, 2013 (м. Краматорськ, ДДМА); XI та XII МНТК «Высокие давления. Фундаментальные и прикладные аспекты», 2010, 2012 (м. Судак, ДонФТИ); МНТК «Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тис-

ком та автотехнічних експертиз», 2011 (м. Вінниця, ВНТУ); ІХ Російська щорічна конференція молодих наукових співробітників та аспірантів «Физико-химия и технология неорганических материалов» 2012 (м. Москва, Росія); ІІ МНТК «Машины і пластична деформація металів» 2012 (м. Запоріжжя, ЗНТУ); V МНПК «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 2012 (м. Ростов-на-Дону, Росія); V Міжнародна конференція «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» 2013 (м. Москва, Росія); VII МНПК «Научно-технический прогресс в металлургии» 2013 (м. Тіміртау, Казахстан); IV МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» 2013 (м. Київ, НТУУ «КПІ»); МНТК «Современные технологии обработки металлов давлением: моделирование, проектирование, производство» 2013 (м. Москва, Росія); МНТК присвячена 80-річчю кафедри Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением» 2014 (м. Санкт-Петербург, Росія); XVI МНТК «Прогрессивна техніка, технологія та інженерна освіта» 2015 (м. Одеса); III і V НТК молодих спеціалістів «Энергомаш-спецсталь» 2011, 2013 (м. Краматорськ), науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу ДДМА (2004-2015), на науковому семінарі при спеціалізованій раді Д.12.105.01 ДДМА 2014-2015 рр, наукових семінарах НТУУ «КПІ» (м. Київ), Вінницького НТУ і Національної металургійної академії України (м. Дніпропетровськ).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 82 роботах, з них 4 статті в міжнародних наукових журналах, що входять в міжнародну базу даних Scopus і мають імпаکت-фактор більше 1,0, 64 статей в збірках наукових праць з, них 20 статей в зарубіжних виданнях, 26 статей в фахових виданнях України, 18 тез за матеріалами МНТК. Також матеріали опубліковано в 1 навчальному посібнику з грифом МОН України та 1 колективній монографії. Нові технічні рішення захищені 19 патентами України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний об'єм роботи становить 594 сторінки, в тому числі основного тексту 282 сторінки, 307 рисунків і 53 таблиці, в тому числі 307 рисунків і 51 таблиця розміщені на окремих 198 сторінках, список використаних джерел з 357 найменувань на 41 окремій сторінці, додатки на 66 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність наукової проблеми, наводиться загальна характеристика роботи, сформульовані мета роботи та завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана характеристика науковій новизні і практичній цінності отриманих результатів, їх апробація і впровадження, відзначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** розглянуті основні проблеми розвитку процесів гарячого пластичного деформування і технологій кування крупних поковок. Проведено огляд основних схем кування крупних поковок типу валів, плит, дисків, кілець і труб. На підставі проведеного аналізу встановлено напрямки подальшого вдосконалення технологічних процесів кування, основних типів поковок.



Встановлено, що найбільший вклад в розвиток теорії і технології кування крупних поковок зробили такі провідні вітчизняні та закордонні вчені як Ю.М. Антощенко, Л.П. Белова, В.К. Воронцов, Н.К. Голубятніков, В.О. Гринкевич, М.Я. Дзугутов, В.О. Дуринін, В.М. Єфімов, В.І. Залеський, М.Г. Златкін, П.В. Камнєв, Б.С. Каргін, О.В. Котелкін, О.А. Кобелєв, В.П. Кривошеєв, В.А. Лазоркін, С.А. Машеков, А.О. Мішулін, В.М. Михалевич, О.Є. Марков, А.Б. Найзабєков, А.Г. Овчінніков, В.А. Огородніков, А.К. Онищенко, Є.Д. Орлов, Я.М. Охріменко, Д.А. Павлік, В.А. Петров, Г.А. Піменов, М.Б. Савонькін, Л.М. Соколов, Ю.П. Солнцев, І.Я. Тарновський, В.Н. Трубін, В.А. Тюрін, Є.П. Унксов, І.П. Шелаєв, В.А. Шелохов, G. Banaszek, H. Duja, C.Y. Park, D.Y. Yang, а також цілий ряд вітчизняних та закордонних науковців.

Аналіз великої кількості процесів кування дозволив виділити три типи факторів, що впливають на параметри напружено-деформованого стану заготовки в процесі кування, і як наслідок, на параметри якості кінцевого виробу. До цих факторів належать фактор форми, кінематичний фактор і температурний фактор. Фактор форми передбачає залежність параметрів НДС заготовки від форми заготовки, яку деформують, і форми інструмента. Кінематичний фактор - це механічний режим деформування, тобто величина і черговість обтисків і подач і кінематика руху інструменту (напрямок, швидкість). Температурний фактор включає в себе тепловий стан заготовки. Вплив кінематичного і температурного факторів на параметри НДС заготовки в процесах кування досліджені незначно, що пов'язано як зі складністю їх врахування в процесах моделювання, так і зі складністю варіювання даними параметрами в реальних процесах. Вплив фактора форми на НДС неоднозначний для різних схем деформування, і зустрічаються протиріччя з рекомендаціями для промислового використання.

На підставі обзору вітчизняної та зарубіжної літератури встановлено вплив гарячої пластичної деформації на структурні зміни в металі і зміни його механічних властивостей. Найбільший вплив на структуру і механічні властивості металу має термічна обробка, однак поряд з термічною обробкою істотний вплив для сталей карбідного і аустенітного класу має і гаряча пластична деформація. При деформації таких матеріалів буде спостерігатися зміна карбідної неоднорідності і розміру зерна. Найбільш чутливими до деформації є сталі, леговані Cr, Mo, W, V, Ti. Такий вплив підтверджується результатами значної кількості досліджень зарубіжних вчених.

Що стосується механічних властивостей, то деформація литого металу, за умови подальшої багаторазової термічної обробки з ізотермічним відпалом не дозволяє значно підвищити твердість або межу міцності металу, проте дозволяє істотно, до декількох разів, підвищити ударну в'язкість і показники пластичності металу (відносне подовження і звуження). Таким чином, гаряча пластична деформація дозволяє підвищити якість кінцевого виробу, і схемі кування належить роль не тільки формозміни заготовки, а й надання їй певних властивостей і якості.

Для проведення досліджень процесів кування крупних поковок використовується ряд методів, найбільш сучасним і затребуваним з яких є метод скінчених елементів, який дозволяє вирішувати завдання об'ємного напружено-деформованого стану. Даний метод має високий ступінь адекватності, що підтвер-

джується безліччю дослідників і його популярністю. Однак така точність істотно залежить від коректних вихідних даних, кількість яких досить велика. У зарубіжних публікаціях все частіше зустрічаються роботи з моделювання еволюції мікроструктури матеріалу заготовки в процесах гарячої пластичної деформації. У вітчизняних роботах такий напрямок практично повністю відсутній.

Якщо ґрунтуватися на наявних рекомендаціях з призначення схеми і режиму кування, то по-перше, при проектуванні технологічного процесу кування злитків виникне ряд невизначеностей для основних типів поковок, пов'язаних з протиріччями, що зустрічаються в літературі, і недостатньою інформацією щодо впливу ряду факторів на параметри якості виробу. По-друге, рекомендації, розроблені раніше, були отримані часто на підставі застосування застарілих і менш точних методів розрахунку і без застосування нових методів, що дозволяють моделювати зміну мікроструктури металу.

В результаті проведеного огляду обґрунтовано необхідність подальшого розвитку наукових основ процесів гарячої пластичної деформації і вдосконалення технологічних процесів кування крупних поковок, що вимагає проведення додаткових комплексних досліджень. Рішення наукової проблеми може бути забезпечене за рахунок розвитку методів розрахунку процесів гарячого пластичного деформування. В розділі поставлені мета та завдання роботи.

**У другому розділі** на основі методу морфологічних карт проведено розширення області пошуку технологічних рішень для основних груп поковок. На підставі виділених раніше факторів впливу на НДС заготовки складено морфологічні карти процесів протягування довгомірних виробів, осадження дисків і кування порожнистих поковок типу кілець і труб. Для кожного виду процесу виділені такі параметри варіювання в морфологічній карті, як форма інструменту (поздовжня і поперечна), форма заготовки (поздовжня і поперечна), кінематика руху інструменту, механічний режим і температурне поле заготовки. З використанням морфологічних карт отримано велику кількість схем кування. З метою систематизації отриманих даних і відкидання свідомо нездійснених схем кування складено класифікації процесів кування валів, плит, дисків, кілець і труб. Класифікації зроблені за основними параметрами варіювання морфологічних карт.

На підставі проведеного аналізу з метою проведення подальших досліджень, відібрані найбільш перспективні схеми кування поковок різних типів, інформація з яких або відсутня повністю, або має суперечливий характер (рис. 1).

Для технологічних процесів кування довгомірних виробів до таких схем відносяться: кування в скошених, несиметричних комбінованих і вирізних бойках, кування заготовок ступінчастими бойками, протягування бойками зі скошеною кромкою і кування заготовок з нерівномірним температурним полем традиційним ковальським інструментом. Для кування поковок типу дисків увага зосереджена на осадженні скошеними плитами, осадженні профільованої заготовки, осадженні розгонкою, куванні безприбуткових злитків і осадженні заготовки з нерівномірним температурним полем різних форм. Що стосується порожніх виробів, то це протягування труб на оправці, розкочування складнопрофільованих кілець, закрите прошивання труб і розкочування заготовок з нерівномірним температурним полем.

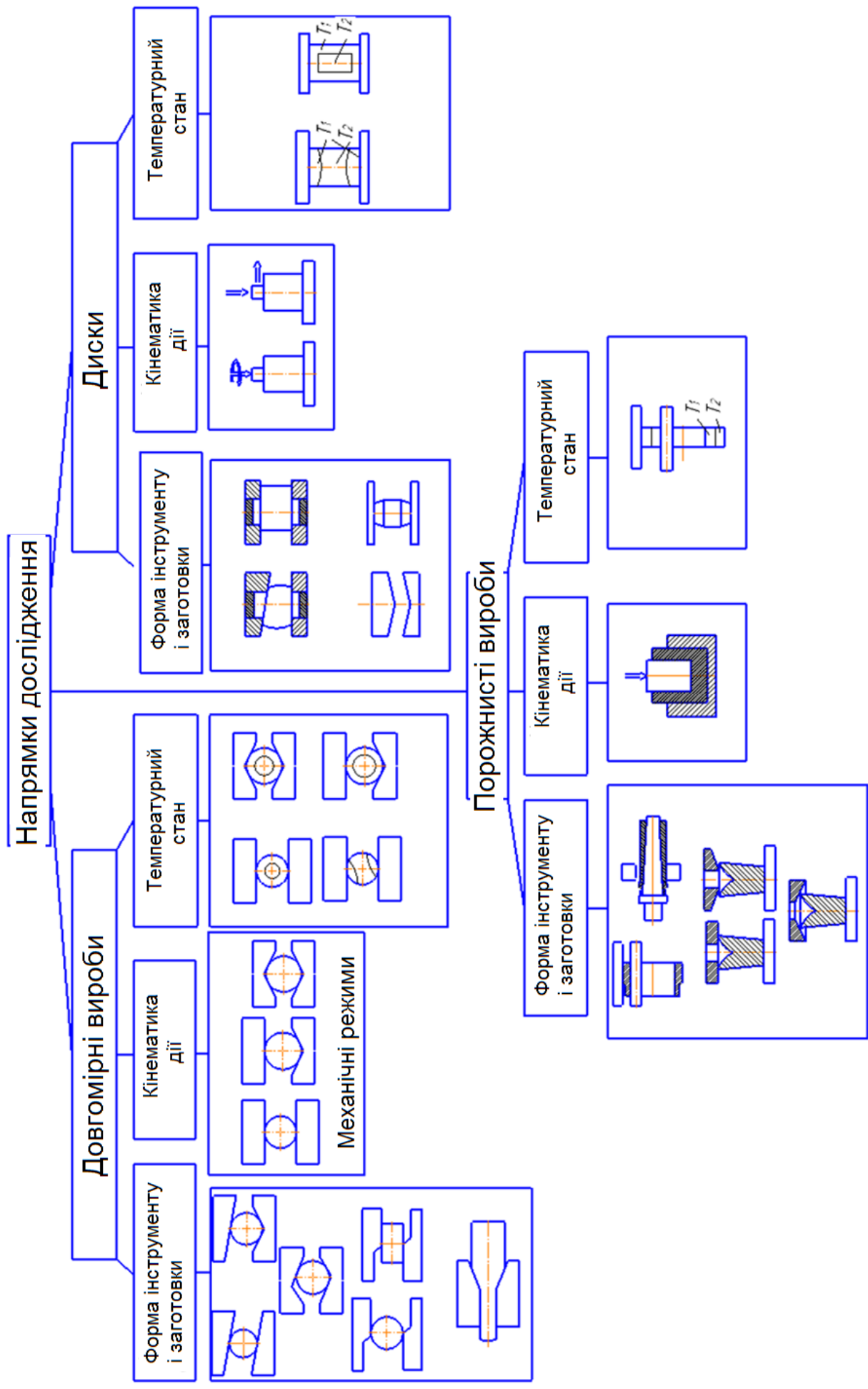


Рис.1. Напрямки дослідження перспективних схем кування поковок типу валів, плит, дисків, кілець та труб

У розділі проведено огляд та обґрунтування вибору методів дослідження схем кування основних груп поковок. З урахуванням складності наукової проблеми, що вирішується, обґрунтований вибір комплексного підходу теоретичного і експериментального дослідження процесів кування крупних поковок. Для оцінки якості великих поковок, що отримуються за допомогою досліджуваних схем деформування, використовувалися такі найбільш вагомі критерії, яка нерівномірність розподілу деформацій по перерізу ( $\Delta e = e_{\max} - e_{\min}$ ), середньозважена деформація зсуву ( $\langle \gamma_{xy} \rangle = \sum (\gamma_{xy_i} \cdot F_i) / \sum (F_i)$ , де  $|\gamma_{xy_i}|$  - величина деформації зсуву і - тої області заготовки за модулем,  $F_i$  - площа області заготовки із певною величиною деформацій зсуву  $\gamma_{xy_i}$ ), рівень середніх напружень ( $\sigma_{cp}$ ) в об'ємі заготовки, показник жорсткості схеми напруженого стану  $\eta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i$  і параметри геометричної точності виробів.

Теоретичні дослідження виконані із застосуванням методу верхньої оцінки і методу скінченних елементів, реалізованого в програмному комплексі QForm 2D і DEFORM 3D. Наведено вихідні дані для моделювання (властивості матеріалу, розміри заготовки та інструменту, термомеханічні режими деформування, граничні умови та ін.) і основні чинники, які впливають на процес деформування.

Методика експериментальних досліджень розроблялася для уточнення вихідних даних за механічними властивостями матеріалу в залежності від температури, показника жорсткості схеми напруженого стану, ступеня і швидкості деформації. Для підтвердження адекватності теоретичних досліджень, формозмінення заготовки, деформованого стану процесів осадження і протягування, використана методика моделювання на свинцевих зразках за допомогою методу координатних сіток та теорії планування повнофакторного експерименту.

**У третьому розділі** виконано розробку методів гарячого пластичного деформування металів. Розвинуто метод оцінки технологічної деформівності металу який враховує відновлення його пластичності під час паузи при дробовій ізотермічній деформації. Метод заснований на феноменологічному описі фізичного процесу відновлення пластичності металу в паузах при складній кінематиці деформування заготовки. Експериментальні криві відновлення пластичності, можуть бути описані рівнянням такого вигляду:  $\Delta\psi = K(1 - e^{-t^n})$ , де  $K$  – коефіцієнт, який відображує граничне значення відновлення пластичності;  $t$  – тривалість паузи,  $s$ ;  $n$  – коефіцієнт який відображує швидкість відновлення пластичності.

Існує критична величина пошкодженості, перевищення якої вже не дозволяє відновлювати вихідну пластичність металу. Будемо вважати, що максимальне значення  $\Delta\psi$  при малих величинах  $\psi_i$  використаного ресурсу пластичності на і-му етапі деформування дорівнює  $\psi_i$ , а при більших, близьких до 1, наближається до 0. В цьому випадку коефіцієнт  $K$  залежності (1) має наступний вигляд:

$$K = m \cdot \psi_i, \text{ причому } \begin{cases} \psi_i = 0 \rightarrow m = 1 \\ \psi_i = 1 \rightarrow m = 0 \end{cases}$$

В такому випадку формула (1) приймає наступний вигляд  $\Delta\psi = \psi_i \cdot m(1 - e^{-t^n})$ . В загальному випадку параметри  $m$  і  $n$  визначаються матеріалом і температурою деформації. На основі проведеного аналізу параметр  $m$  можна представити в наступному вигляді  $m = (1 - \psi_i)^{f(\psi_i, T)}$ . Функція  $f(\psi, T)$ , є характеристикою матеріалу, яку необхідно встановити експериментально. Після трансформації вираз (1) приймає наступний вигляд  $\Delta\psi = \psi_i \cdot (1 - \psi_i)^{f(\psi_i, T)}(1 - e^{-t^n})$ .

Виконано розрахунок тестового завдання з осадження циліндричної заготовки зі сталі У7. Для даної сталі на підставі наявних експериментальних даних підібрані коефіцієнти для рівнянь, які описують відновлення пластичності металу. Встановлено, що дробовим деформуванням можливо підвищити технологічну пластичність заготовки, що підтверджується експериментально.

При проведенні експрес аналізу технологічного процесу в умовах виробництва з використанням сучасних програмних засобів, заснованих на методі скінченних елементів необхідно мати велику кількість механічних даних по матеріалу об'єкта, що моделюється. Отримання цих даних пов'язано з проведенням дорогих експериментальних досліджень і істотними витратами часу. Особливо це стосується отримання властивостей металів при підвищених температурах в різних швидкісних умовах деформації. У той же час для великої кількості матеріалів є стандартні характеристики у вигляді межі міцності і текучості при різних температурах.

На підставі цього запропоновано підхід побудови кривих течії металу при гарячій деформації із використанням межі міцності і межі текучості. Підхід дозволяє отримати велику кількість кривих течії металу для широкого діапазону швидкостей деформацій.

Залежність опору деформації при постійній температурі коректно описується залежністю, яка запропонована П. Людвігом  $\sigma_s = C \cdot e^n$ . Для визначення коефіцієнтів  $C$  і  $n$  достатньо знати декілька стандартних характеристик матеріалу, таких як межа міцності  $\sigma_B$  та умовна межа текучості  $\sigma_{0,2}$ .

$$\sigma_{0,2} = C \cdot 0,002^n; \sigma_B = Cn^n.$$

Зміну опору деформації від однієї швидкості до іншої можна визначити аналітично, використовуючи формулу, запроповану В.В. Вітманом і В.А. Степановим  $\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = m \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ . Значення коефіцієнта пропорційності  $m$  в різній літературі відрізняється, тому з метою уточнення його значення проведені експериментальні дослідження по розтягуванню зразків з різних матеріалів при різних температурно-швидкісних умовах. Крім того, проведена обробка експериментальних кривих течій різних сталей, наведених в літературі.

Виявлено залежності коефіцієнта  $m$  від: виду матеріалу, температури деформації і діапазону швидкостей деформації (рис. 2). Зіставлення кривих течії мета-

лу, побудованих за стандартними характеристиками з експериментальними кривими, показало прийнятне відхилення до 25% (рис. 3). Застосування даного підходу при проведенні досліджень методом скінчених елементів дозволило істотно знизити матеріальні і часові витрати.

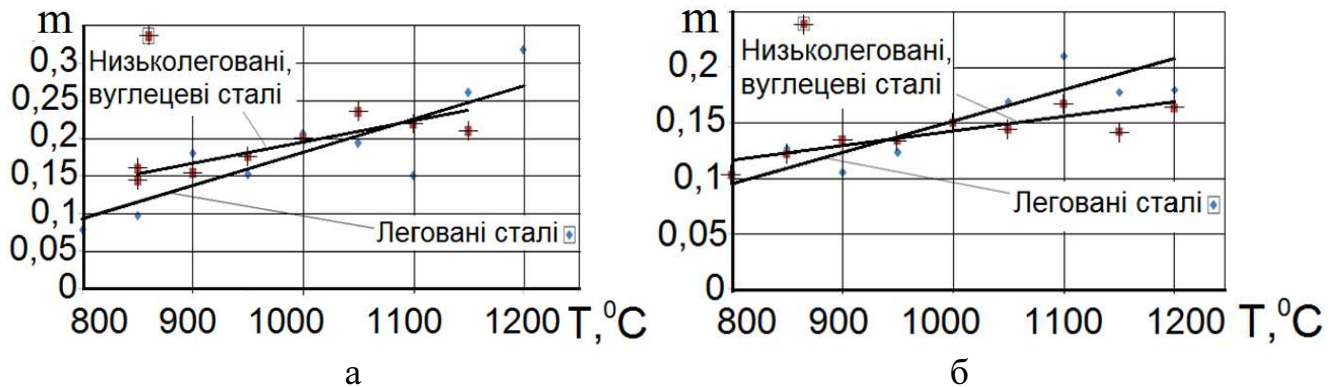


Рис. 2. Залежність коефіцієнта  $m$  від температурно-швидкісних умов для різних груп матеріалів (а -  $\dot{\epsilon} = 0,001 - 0,01 \text{ c}^{-1}$ , б -  $\dot{\epsilon} = 0,01 - 0,1 \text{ c}^{-1}$ )

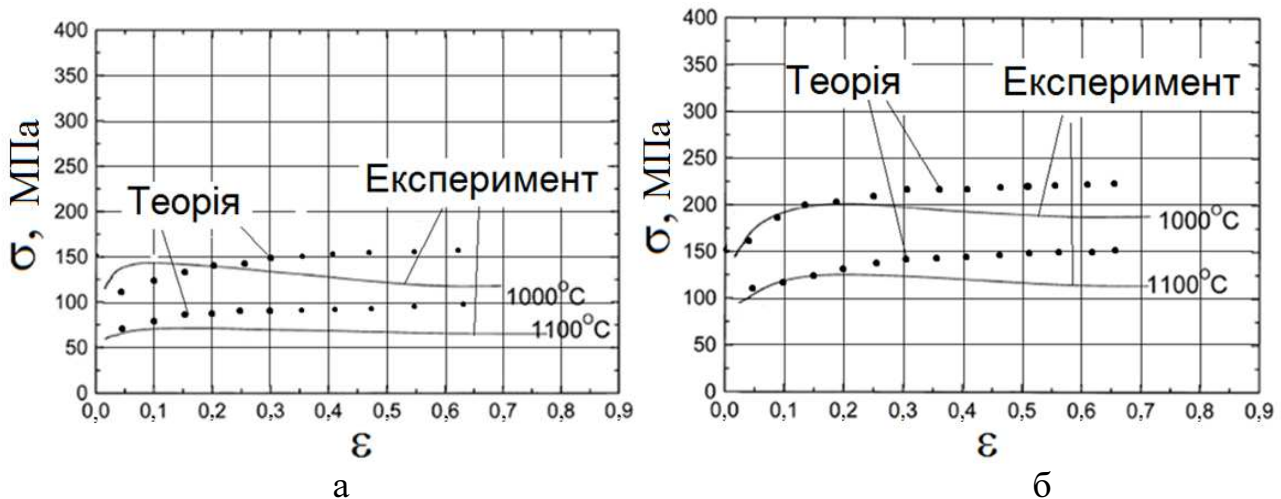


Рис. 3. Криві течії сталі AISI T1 при різних температурно-швидкісних умовах (а -  $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ c}^{-1}$ , б -  $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ c}^{-1}$ )

В даному розділі описана модель еволюції мікроструктури металів при гарчій пластичній деформації. Модель передбачає розрахунок розміру зерна, яке зазнало деяке зростання, в процесі витримки металу без деформування при високій температурі і об'єму металу, в якому відбулася рекристалізація на стадіях статичної, метадинамічної і динамічної рекристалізації. Описано основні рівняння і наведені коефіцієнти для їх розрахунку. За даною моделлю запропонована послідовність розрахунку мікроструктури заготовки при моделюванні процесу кування. Проведено розрахунок тестового завдання з осадження циліндричної заготовки зі сталі Mn18Cr18N (рис. 4).

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню впливу форми інструмента на напружено-деформований стан заготовки в процесах протягування заготовок. Проведено дослідження схем кування, відібраних за допомогою методу морфологічних карт. Розглянуто протягування бойками несиметричною форми (пласкі

скошені, асиметричні комбіновані, вирізні і ступінчасті бойки). Несиметрична форма інструменту дозволяє створити такі умови деформування заготовки, при яких виникають інтенсивні деформації зсуву.

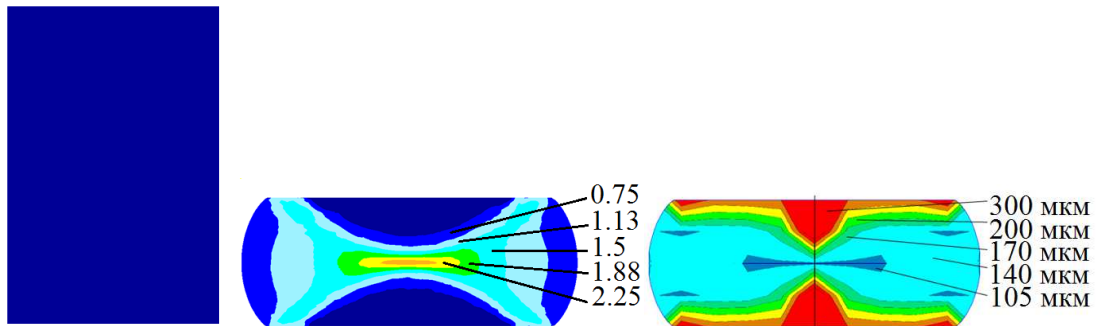


Рис. 4. Поля розподілу логарифмічних деформацій і розміру зерна в поперечному перерізі заготовки

Дослідження проведені з метою визначення раціональних параметрів інструменту, що забезпечують інтенсивні деформації зсуву в металі в поєднанні з сприятливим напруженим станом. У процесі досліджень використані запропоновані методи розрахунку мікроструктури металу і побудови кривих течії металу.

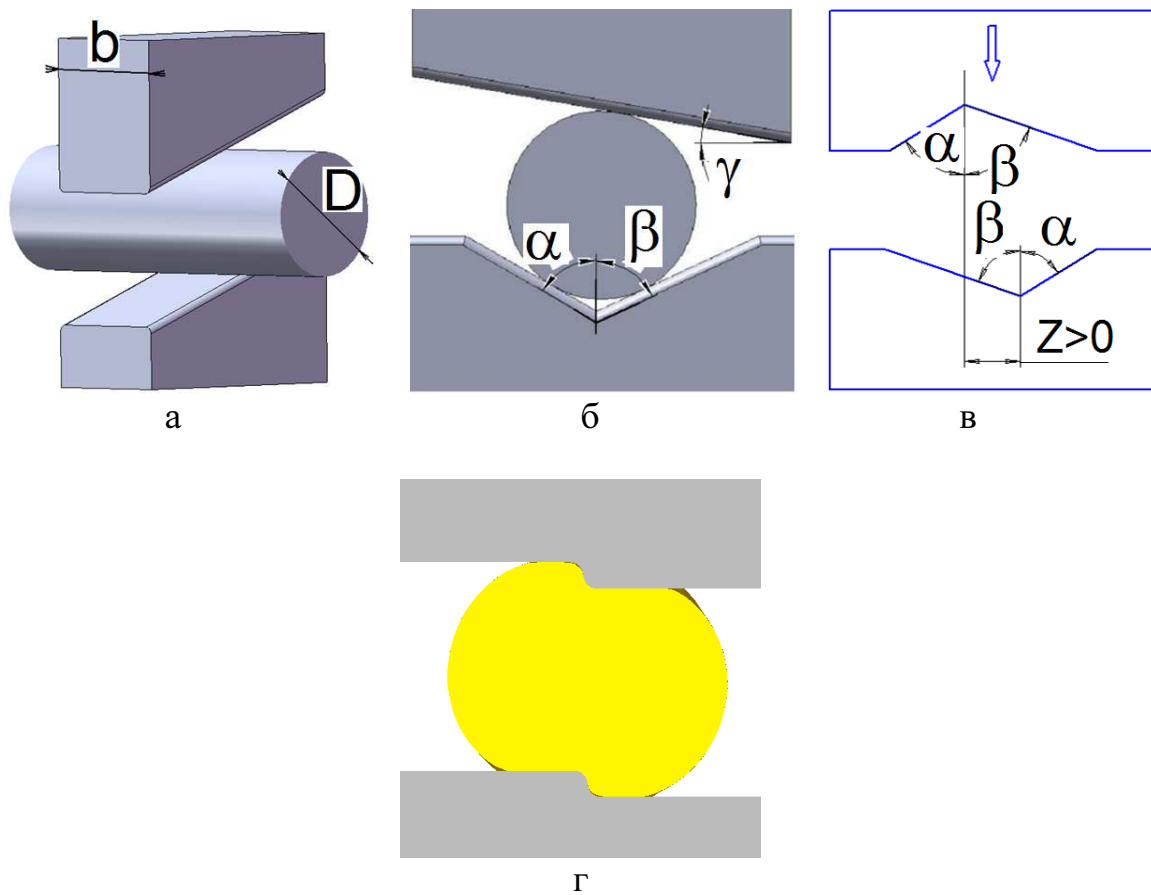


Рис. 5. Схеми кування протягуванням інструментом несиметричної форми (а – скошені бойки, б – комбіновані, в – вирізні, г – ступінчасті)

Визначили, що в процесі протягування циліндричної заготовки скошеними боками (рис. 5 а), зі збільшенням обтиску заготовки середня величина логарифмічних деформацій зсуву вздовж лінії зсуву збільшується по прямо пропорційній залежності. При збільшенні відносної подачі заготовки в бойках від 0,6 до 1,0 середня величина зсувів уздовж лінії інтенсивного зсуву збільшується в середньому на 25%. Подальше збільшення відносної подачі від 1,0 до 1,4 не призводить до істотного збільшення рівня зсувів. Для забезпечення максимального рівня зсувів в заготовці рекомендується застосування бойків зі скосом  $10-15^{\circ}$ , а протягування здійснювати з подачею, рівною 1 або близькою до неї. Кування повинне вестися з одиничними обтисканнями до 30%. Крім того, кування повинне здійснюватися з постійними кантування заготовки при протягуванні за наступною схемою «обтиск - кантування на  $90^{\circ}$  - обтиск - кантування на  $45^{\circ}$  - обтиск - кантування на  $90^{\circ}$  - обтиск».

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що в процесі протягування бойками зі скосом при збільшенні ступеня обтиску від 18,5% до 33%, величина найбільших зсувів зосереджується в центрі заготовки і зростає від 0,3 до 0,65. Експериментально підтверджено адекватність отриманих математичних моделей. Істотним недоліком даної схеми кування є наявність горизонтальної складової сили деформування, яка через інструмент діє на колони преса.

Проведено дослідження кування заготовки в несиметричних комбінованих бойках (рис. 5 б). Встановлено, що зсувні деформації при зануренні верхнього інструменту в заготовку зосереджені локально у верхній її частині, але вже при висотній деформації, рівній 20%, в заготовці з'являється область зсувів, що має досить велику площу і проходить через центр заготовки. Встановлено, що кут вирізу нижнього бойка має незначний вплив на величину середньозваженої деформації зсуву. Рівень зсувів в заготовці при куванні комбінованими і бойками зі скосом відрізняється незначно (рис. 6), однак більш сприятливий напружений стан заготовки забезпечується при куванні комбінованими бойками. Таким чином, можна рекомендувати кування комбінованими бойками: верхнім скошеним і нижнім вирізним несиметричним бойками. Причому кут скосу верхнього бойка повинен складати від  $10^{\circ}$  до  $20^{\circ}$ , кут  $\beta$  вирізного бойка  $75^{\circ} \dots 85^{\circ}$ . Кування повинне вестися з одиничними обтисканнями, не меншими 20% від діаметра заготовки.

В результаті дослідження процесу кування вирізними несиметричними бойками (рис. 5 в) встановлено, що високий рівень деформацій в заготовці забезпечується в тому випадку, коли верхній вирізний бойок контактує із заготовкою тільки однією стороною вирізу, тобто як при куванні комбінованими бойками.

Наступною схемою, що дозволяє збільшити рівень деформацій в заготовці при відсутності горизонтальних сил, діючих на колони преса, є протяжка заготовки в ступінчастих бойках (рис. 5 г). Встановлено, що в процесі кування циліндричної заготовки ступінчастими бойками при збільшенні висоти ступені бойків і ходу обтискання рівень деформації зсуву в заготовці зростає (рис. 7).

Обтискання заготовки ступінчастими бойками не повинні перевищувати 10-15% від діаметра заготовки, що забезпечить якісну, рівномірну проробку і дозволить уникнути дефектоутворення. Запропоновано спосіб протягування поковок типу валів через пластину з проміжним профілюванням заготовки ступінчастими бойками.



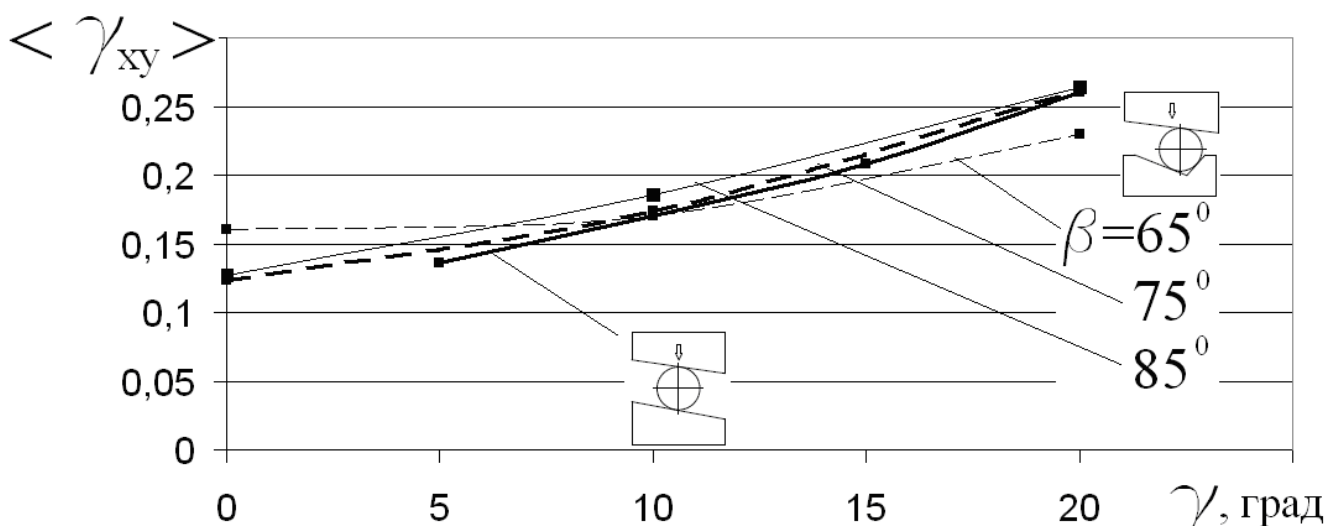


Рис. 6. Графічна залежність величини середньозваженої логарифмічної деформації зсуву від параметрів інструменту при деформуванні циліндричної заготовки різними бойками

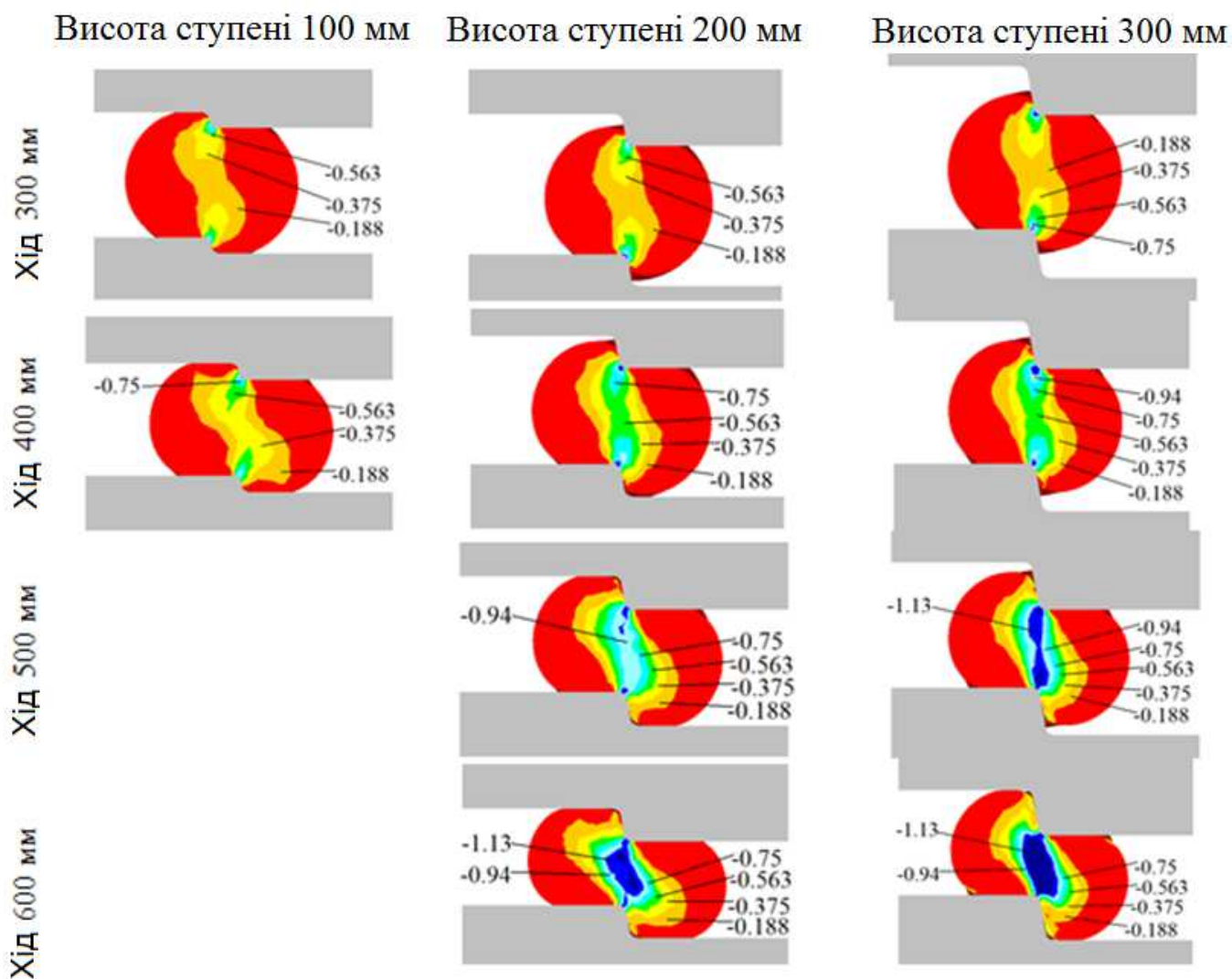


Рис. 7. Поля розподілу деформацій зсуву в поперечному перетині заготовки при деформуванні бойками з різною висотою ступені

Визначили, що для найбільшої деформаційної проробки заготовки, протягування повинне здійснюватися бойком з кутом скосу ступені  $\alpha=15^\circ \dots 45^\circ$ ; відносна величина подачі заготовки повинна бути рівною  $f/H=0,5 \dots 1,0$ , відносний зазор між боками  $z/H= -0,15 \dots -0,3$ , відносна висота ступені бойка (та відносне обтискання)  $h/H= 0,1 \dots 0,2$ , відносні розміри заготовки  $V/H= 1,5 \dots 2$ . Запропоновано конструкцію бойків, яка забезпечує швидкозмінність і дозволяє здійснювати протягування на різних етапах технологічного процесу в різних режимах.

В даному розділі проведено дослідження процесу протягування поковок типу плит плоскими бойками з крайкою у вигляді фаски. Встановлено, що з точки зору мінімальної нерівномірності розподілу деформацій і мікроструктури в заготовці необхідно, щоб бойок мав скошену крайку з кутом скосу  $\alpha = 10^\circ$ , і довжиною фаски  $L/B = 0,35$  при постійній подачі, яка дорівнює  $2/3$  ширини бойка. Визначили, що найменша ймовірність утворення поверхневих тріщин у заготовці буде при протягуванні бойками з кутом фаски  $10^\circ$  і довжиною  $L/B = 0,45$ . З точки зору найкращої формозміни заготовки в процесі протягування плоскими бойками є бойок з кутом скосу  $10-15^\circ$  і відносною довжиною скосу, рівною  $0,35$  від ширини бойка. Таким чином, можна рекомендувати для протягування плит плоскі бойки з кутом скосу  $10-15^\circ$  і відносною довжиною фаски  $L/B = 0,35 \dots 0,45$ .

**У п'ятому розділі** встановлено вплив температури і кінематики деформування на напружено-деформований стан заготовки в процесах протягування. Розглянуто кування традиційним інструментом: плоскими, комбінованими і вирізними бойками.

Температура має визначальний вплив на параметри НДС заготовки в процесі гарячого пластичного деформування. При цьому в процесах кування протягуванням завжди в заготовці утворюється нерівномірне температурне поле. Даних по виду і впливу такого температурного поля на параметри НДС заготовки і, як наслідок, механічний режим кування недостатньо. Для цього проведені дослідження формування нерівномірного температурного поля в заготовці при її охолодженні. Дослідження проведені за допомогою методу скінченних елементів з експериментальної верифікацією (рис. 8). Після визначення параметрів температурного поля заготовки в процесі кування проведено моделювання процесів протягування плоскими, комбінованими і вирізними бойками.

Встановлено, що у випадку протягування плоскими бойками циліндричної заготовки для забезпечення сприятливого напружено-деформованого стану необхідно, щоб при рівномірному температурному полі заготовки відносна подача дорівнювала  $0,5 \dots 1,1$  і величина обтиску дорівнювала  $0,1 \dots 0,2$ . Після падіння температури поверхні заготовки в процесі кування на  $100^\circ\text{C}$  слід здійснювати протягування з відносною подачею  $0,5 \dots 1,1$  і величиною обтиску  $0,1 \dots 0,15$ . При охолодженні поверхні заготовки на  $200^\circ\text{C}$  необхідно здійснювати протягування з відносною подачею від  $0,3$  до  $1,1$  з тією ж величиною обтиску, а при зменшенні температури поверхні ще на  $100^\circ\text{C}$  необхідно зменшити величину обтискання до  $0,05 \dots 0,1$  при тих же подачах. Рекомендується при наступному проході здійснювати протягування зі зміщенням заготовки на половину ширини бойка, що дозволить забезпечити більш рівномірний розподіл інтенсивності логарифмічних деформацій уздовж осі заготовки.

Для забезпечення мінімальної нерівномірності розподілу деформацій в заготовці, в процесі протягування комбінованими бойками необхідно на першому етапі, тобто при наявності рівномірного температурного поля заготовки забезпечити відносну подачу 0,3...0,5 і величину обтискання 0,15...0,25. Після зниженні температури поверхні заготовки в процесі кування на 100°C слід здійснювати протягування з відносною подачею 0,5...0,7 і величиною обтискання 0,2...0,25. При охолодженні поверхні на 200°C необхідно здійснювати протяжку з відносною подачею 0,7...1,1 з тією ж величиною обтискання, а при падінні температури поверхні ще на 100°C необхідно зменшити величину обтискання до 0,15...0,2 при тих же подачах.

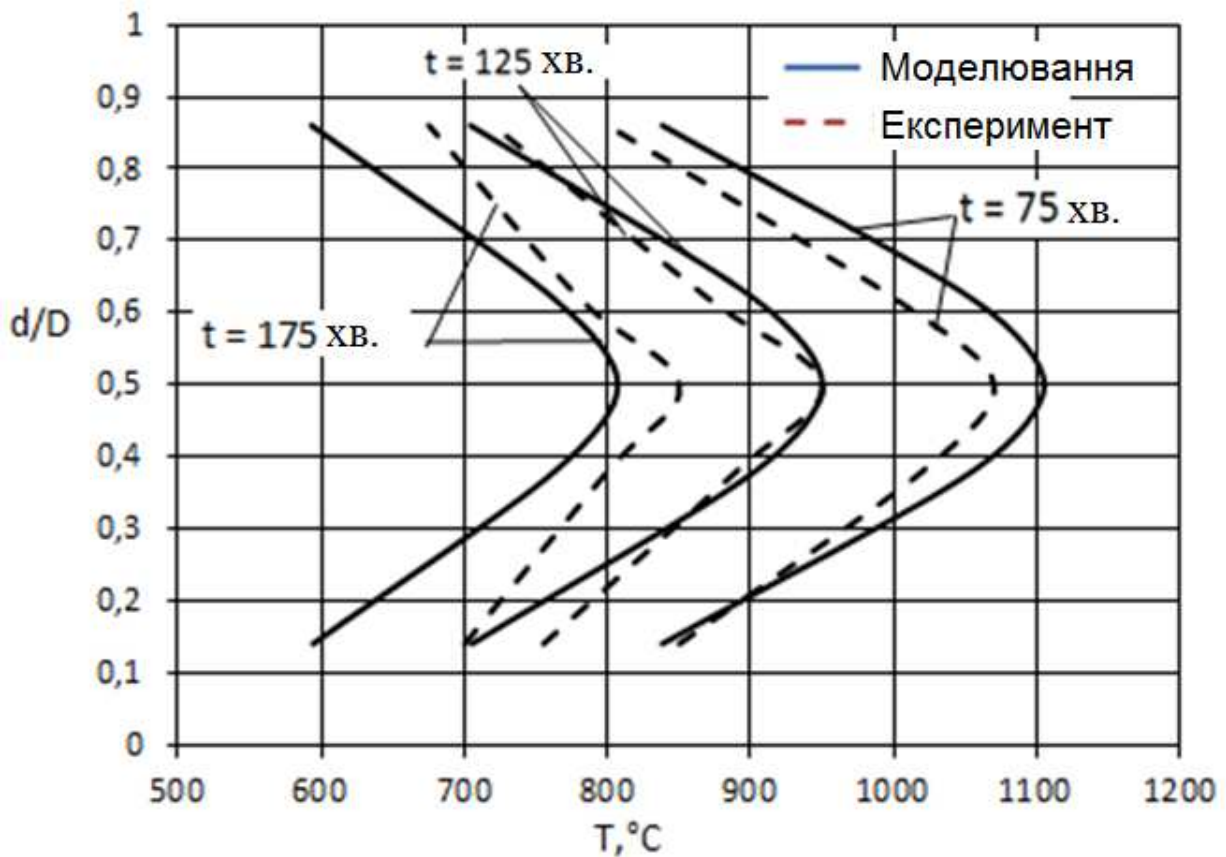


Рис. 8. Графік розподілу температур за перерізом злитка зі сталі 35 масою 10 т в різний момент охолодження

Кування вирізними бойками з кутом вирізу, рівним  $120^{\circ}$ , при необхідності рівномірного розподілу деформацій в заготовці рекомендується проводити з відносними подачами, більшими за 0,5, і обтисканнями 0,1..0,15 від діаметра заготовки. З метою інтенсивної проробки центральних шарів заготовки рекомендується протяжку здійснювати з відносними подачами, більшими 0,5, і обтисканнями, більшими 0,15 від діаметра заготовки.

Також проведено дослідження впливу несиметричного температурного поля на параметри НДС заготовки в процесі кування протягуванням плоскими бойками. Проводилось моделювання протягування заготовки з двома низькотемпературними симетрично розташованими зонами (рис. 9). Це дозволило підвищити рівень деформацій зсуву порівняно з куванням заготовки з рівномірним температурним полем.

В даному розділі приділено особливу увагу розробці ефективного режиму кування сталі Х12МФ. Виконані дослідження, які дозволили підвищити технологічну пластичність цієї сталі. Розроблений температурний режим включає в себе витримку злитка при температурі 1200 °С, зниження температури і витримку при 1160 °С перед куванням. Встановлено раціональні температурні умови кування злитків сталі Х12МФ на пресах для плавок з вакуумуванням (1160-950 °С) і без вакуумування (1200-1050 °С).

У шостому розділі на основі даних, отриманих методом морфологічних карт, із застосуванням нових способів розрахунку проведено дослідження процесів кування осадженням.

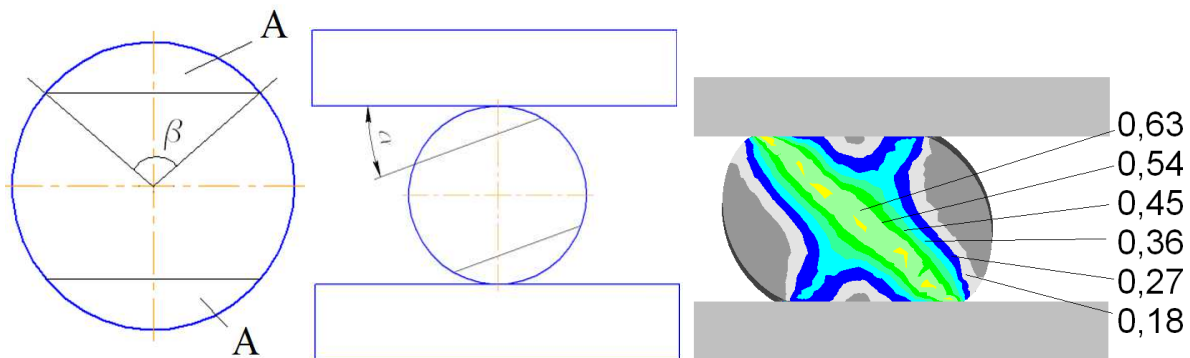


Рис. 9. Схема кування протягуванням заготовки з нерівномірним несиметричним температурним полем (А – низькотемпературна зона) і поле розподілу інтенсивності логарифмічних деформацій

Запропоновано та досліджено спосіб кування поковок типу дисків з ексцентрично розташованими відростками (рис. 10), який полягає в деформації циліндричної заготовки несиметричними плитами. Отримана математична модель, що дозволяє прогнозувати параметри формозміни заготовки в процесі осадження скошеними плитами. Встановлено вплив геометрії інструменту на положення зони розділу течії металу при осадженні, при збільшенні кута скосу плити збільшується відстань між віссю заготовки і зоною розподілу течії металу. Математичні моделі дозволили прогнозувати формозміну заготовки та розробити режими і технології кування спеціалізованих деталей з ексцентриситетом.

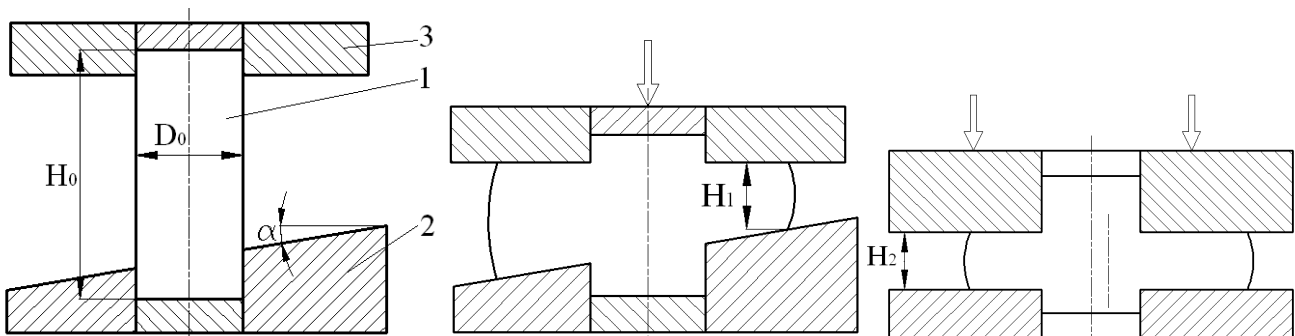


Рис. 10. Переходи виготовлення деталі типу ексцентрик

Запропоновано спосіб осадження профільованих циліндричних заготовок у вигляді циліндра з конусними уступами (рис. 11), що дозволяє знизити нерівномірність розподілу деформацій в поперечному перерізі заготовки і підвищити точність поковок типу дисків, одержуваних з застосуванням операції осадження. Встановлено, що на величину нерівномірності розподілу деформацій істотно впливає діаметр і довжина уступів заготовки. Чим менше діаметр уступів заготовки, тим менше нерівномірність розподілу деформацій. Найбільша рівномірність розподілу деформацій спостерігається при осадженні заготовки з уступами, довжина яких дорівнює 10...15% довжини вихідної заготовки. Встановлено, що при осадженні заготовок з конічними уступами можна зменшити зону малих деформацій від 10...14% площі поперечного перерізу для кування циліндричної заготовки до 2...4% для осадження профільованої заготовки з відносним діаметром уступів 0,7. Відносна довжина уступів не впливає на величину зони малих деформацій. Бочкоподібність заготовки зменшується зі збільшенням довжини уступів і зменшенням їх діаметра. В процесі осадження профільованої заготовки на її бічній поверхні виникають напруження стиску, величина яких тим більша, чим менший діаметр уступів заготовки. Рекомендоване співвідношення висоти до діаметру середньої частини профільовання заготовки повинно бути менше 2,5, що можливо при куванні злитків із співвідношенням висоти до діаметра тіла злитка 2,0 і менше.

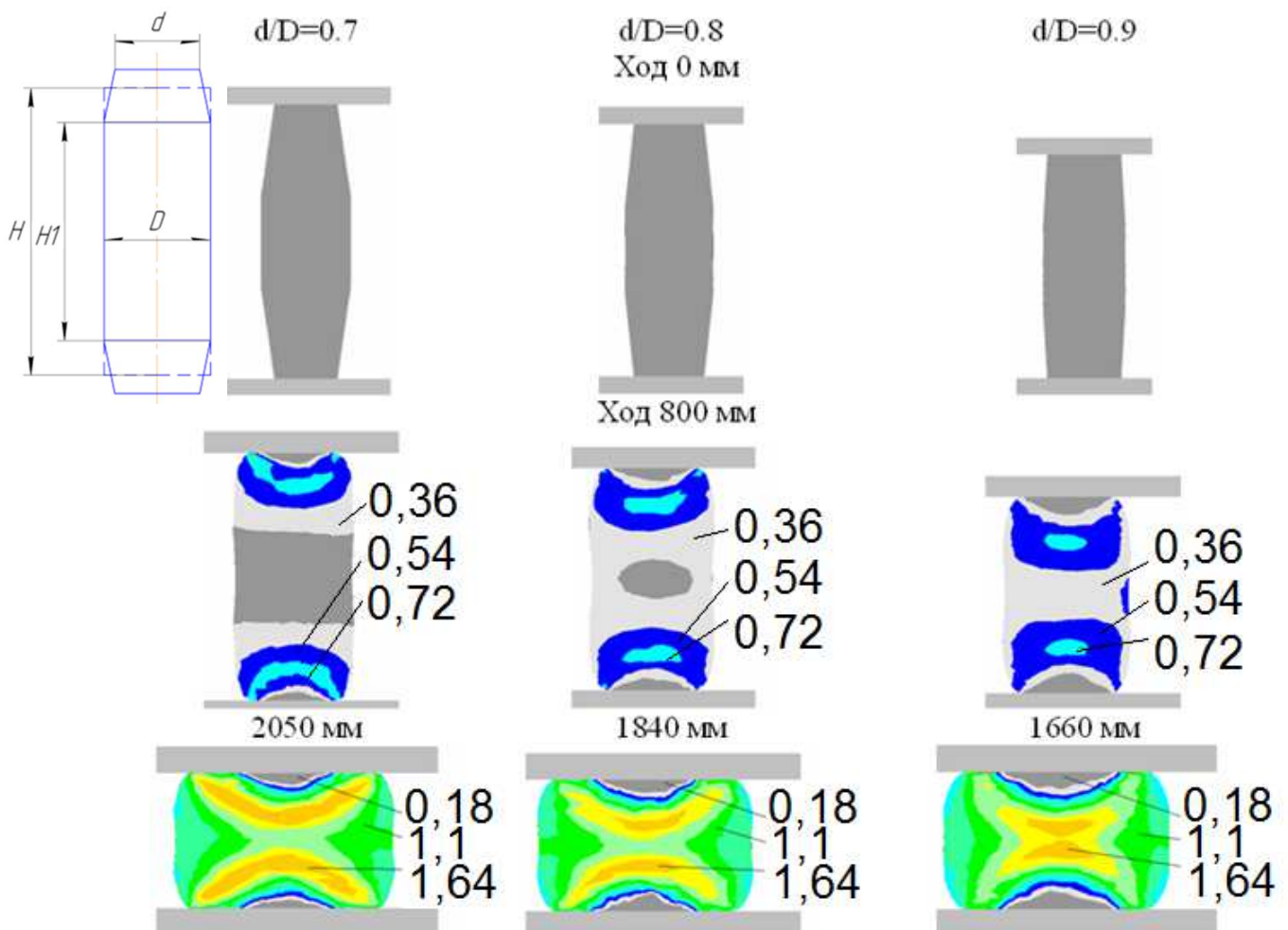


Рис. 11. Поля розподілу інтенсивності логарифмічних деформацій в процесі осадження заготовки з конічними уступами плоскими плитами ( $H1 / D = 1,0$ )

Для процесу осадження крупних заготовок у випадку малої потужності пресового обладнання застосовують осадження розгонкою вузьким бойком, недоліком якої є відхилення форми поперечного перерізу заготовки від нормальної, утворюється овальність. виправити таку овальність можна правленням бічної поверхні диска плоскими бойками, але в разі малих габаритів преса це не є можливим, і виправлення такого браку можливо тільки застосуванням спеціального режиму осадження. У розділі розроблена методика розрахунку параметрів формозміни заготовки, на підставі якої пропонується розраховувати раціональні режими кування, що дозволяють отримувати поковки з правильною формою поперечного перерізу. За результатами математичного моделювання отримана регресійна модель, що дозволяє розраховувати відхилення форми поперечного перерізу заготовки в залежності від геометричних параметрів заготовки, інструменту та режиму кування. Проведені експериментальні дослідження підтверджують адекватність отриманих теоретичних рішень. Розроблений режим дозволяє отримувати поковки з максимально наближеною формою поперечного перерізу до круглої.

Для випадків, коли необхідно отримати поковки з мінімальною величиною бочкоподібності і відсутністю зон ускладненої деформації, запропонований спосіб осадження заготовки з попереднім її профілюванням розгонкою вузьким бойком на увігнуту бочку (рис. 12). Проведено дослідження даного способу і встановлено, що розгонка осадженням для найбільшої ефективності повинна проводитися вузьким бойком з шириною  $0,1 \dots 0,3$ , від діаметра вихідної заготовки, і вихідна циліндрична заготовка повинна бути з відносною висотою  $H/D \geq 1,0$ .

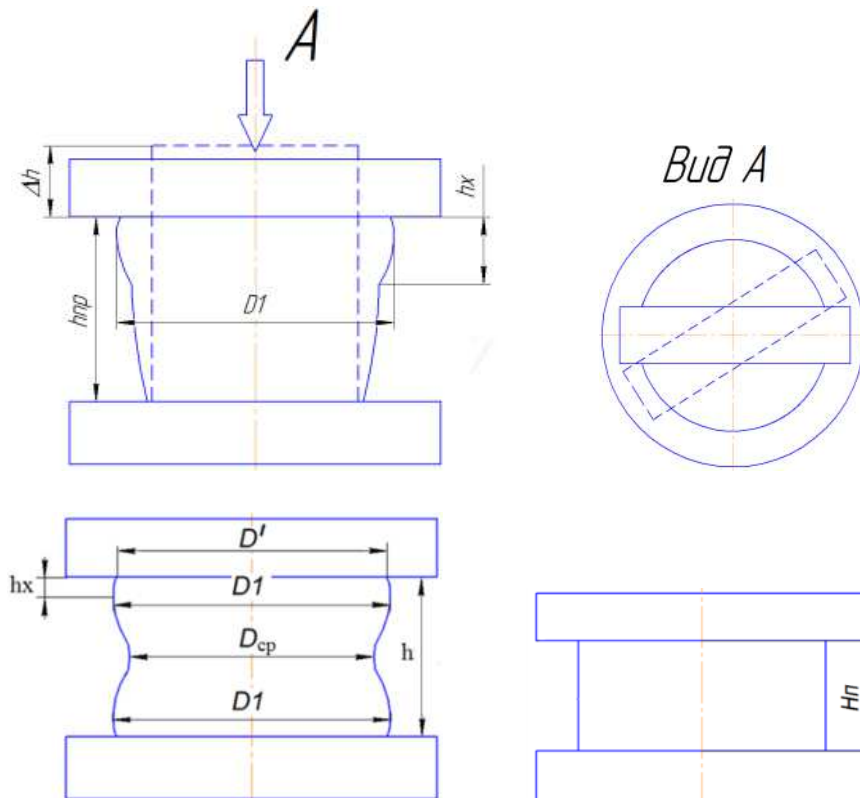


Рис. 12. Схема осадження циліндричної заготовки з попереднім профілюванням розгонкою вузьким бойком

Використовуючи отримані математичні моделі і розроблену методику, можна точно визначити параметри процесу осадження розгонкою вузьким бойком для отримання поковок типу дисків з мінімальною нерівномірністю розподілу деформацій в поковці і мінімальною величиною бочкоподібності.

Проведено дослідження впливу температурного поля на напружено-деформований стан заготовок в процесі осадження плоскими плитами. Запропоновано спосіб осадження заготовок з нерівномірним температурним полем, який полягає у форсованому нагріванні «гарячої» заготовки і подальшій осадці плоскими плитами (рис. 13).

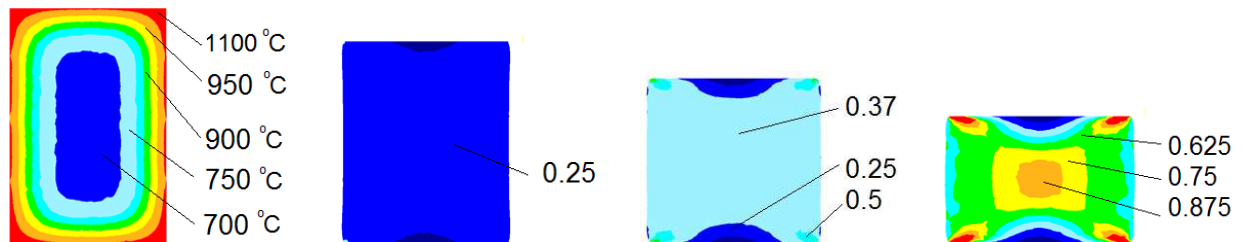


Рис. 13. Поля розподілу температури і інтенсивності деформацій в поздовжньому перерізі заготовки в процесі осадження плоскими плитами

Даний спосіб дозволяє знизити нерівномірність розподілу деформацій в поперечному перерізі заготовки і знизити величину бочкоподібності. Найбільше зниження спостерігається при нагріванні заготовки з відносною висотою  $H/D = 2$ , вихідною температурою  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температури поверхні  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  і осадженні більш ніж на 30%. Нагрівання необхідно здійснювати таким чином, щоб обов'язково утворювалося нерівномірне температурне поле з максимальним можливим перепадом температур по перетину заготовки.

Крім того, в розділі проведені експериментальні дослідження, які підтверджують припущення про вплив деформації на структуру металу на прикладі сталі 40X.

**Сьомий розділ** присвячений розробці раціональних схем кування порожнистих поковок типу складнопрофільованих кілець і труб. Проведено дослідження розкочування конічних кілець плоским бойком на циліндричному дорні порожнистої циліндричної заготовки з буртом (рис. 14). Встановлено особливості формозміни заготовки і вплив на якість виробу вихідних параметрів процесу. Встановлена раціональна форма заготовки, яка дозволяє уникнути появи поверхневих дефектів поковки в вигляді затисків. На підставі фізичного моделювання отримана модель, яка описує вплив параметрів заготовки на кінцеву формозміну. Встановлено, що на величину конусності кільця впливають такі геометричні параметри порожнистої ступінчастою заготовки, як довжина бурта і його зовнішній діаметр. Так при малій довжині бурта, а також рівній практично всій довжині заготовки, конусність одержуваної заготовки незначна. Встановлено, що розкочуванням заготовок із ступінчастою зовнішньою поверхнею можливо отримувати поковки типу кілець і циліндрів з розтрубами. Для визначення розмірів вихідної заготовки з метою отримання строго визначених розмірів поковки запропонована методика її розрахунку, заснована на принципі сталості об'єму металу і залежності, що описує збільшення довжини стінки кільця в процесі розкочування.

Для виготовлення порожнистих великогабаритних виробів рекомендується застосування безприбуткових злитків, основним недоліком яких є усадочні дефекти і наявність неякісного металу під усадочною раковиною, який має велику нерівномірність хімічного складу і пористість. Для безприбуткових злитків номенклатури ПАТ «НКМЗ» на основі математичних розрахунків встановлені розміри усадочних раковин. Проведено моделювання процесів осадження безприбуткових злитків плоским кільцем (рис. 15 а). За результатами моделювання отримані поля розподілу логарифмічних деформацій і середніх напружень. Встановлено, що по ходу осадження найменш проробленою зоною злитка є частина металу під усадочною раковиною, там зосереджені найменші деформації.

Крім того, метал під усадочною раковиною найменш якісний, що обумовлює необхідність його видалення. Частина неякісного металу з усадочної раковини в процесі осадження виявляється на торці осадженої заготовки, що має бути враховано при розробці креслення поковки, і на торець поковки, який буде відповідати торцю осадженої заготовки з прибуткового боку, повинен бути призначений підвищений припуск.

Встановлено вплив діаметра отвору плити і відношення висоти тіла злитка до його середнього діаметра на величину відносного ступеня деформації осадження, при якому вершина усадочної раковини буде витіснена в отвір. Дані співвідношення отримані в графічному вигляді.

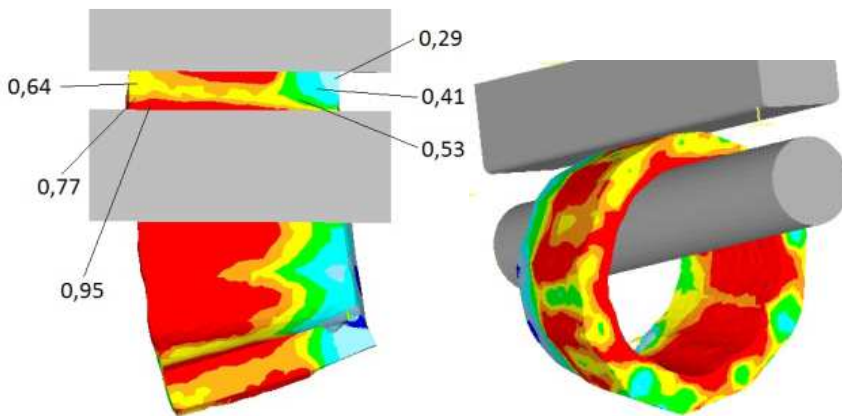


Рис. 14. Поля розподілу інтенсивності логарифмічних деформацій при розкочуванні ступінчастої заготовки на гладкому дорні

Для осадження конусною увігнутою плитою (рис. 15 б) з отвором найменш проробленою зоною злитка є частина металу під усадочною раковиною, там зосереджені найменші деформації. В середньому, за об'ємом осадженої заготовки, деформації зосереджені досить рівномірно. Визначено, що конусність увігнутих плит не сприяє заті-

канню дефектного металу зливку, що знаходиться в районі усадочної раковини, в отвір. Відносний ступінь деформації при осадженні, при якому вершина усадочної раковини переміщається в отвір плити, тут більший, ніж при осадженні злитка плоскою плитою з отвором (рис. 16).

Порівняння полів розподілу деформацій по перетину злитка при осадженні за різними схемами показує, що величина деформацій в заготовці, отриманій деформуванням опуклою плитою, менша за деформації в заготовці, отриманій деформуванням плоскою плитою з отвором, і набагато менша, ніж у випадку деформування увігнутою плитою. При осадженні плоскою плитою з отвором злитка масою 10 тон логарифмічні деформації в тілі заготовки досягають 1,5-1,6, при



осадженні такого ж зливка увігнутою плитою вони досягають 1,8-2, а при осадженні опуклою плитою вони досягають в середньому 1,5 одиниць.

Порівняння полів розподілу середніх напружень при осадженні увігнутою, плоскою і опуклою плитами показує, що середні напруження в заготовці, в основній її масі, при осадженні плоскою плитою і опуклою плитою рівні і досягають - 30 МПа, що в 2,5 - 3 рази менше ніж при осадженні увігнутою плитою.

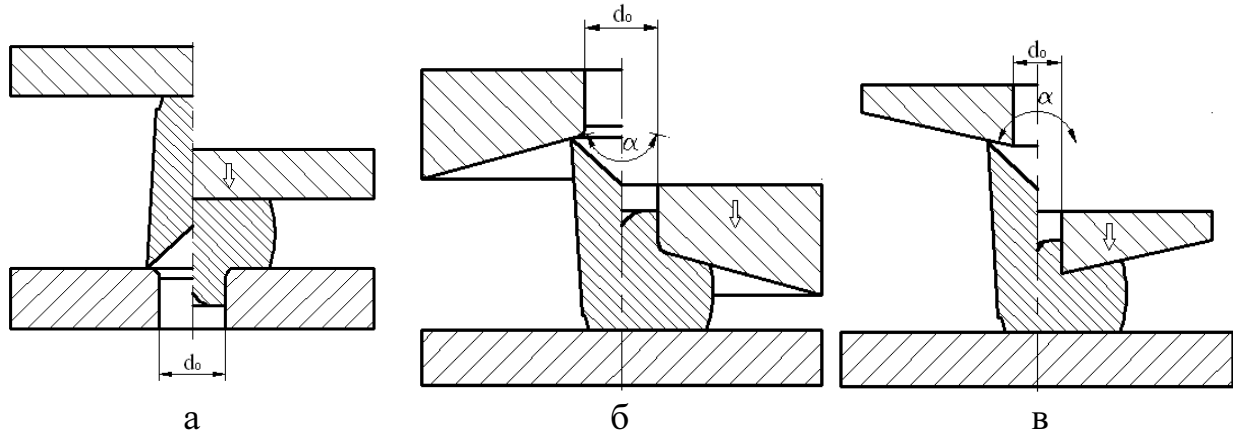


Рис. 15. Способи осадження безприбуткового зливка на плоскій плиті з отвором (а), увігнутою конусною плитою (б) і опуклою конусною плитою з отвором (в)

При осадженні безприбуткового зливка опуклою конусною плитою (рис. 15 в), конусність інструменту істотно впливає на переміщення дефектного металу зливка, що знаходиться в районі усадочної раковини, в отвір плити. Цю схему можна рекомендувати для кування суцільних поковок з безприбуткових злитків через те, що відносний ступінь деформації при осадженні безприбуткового зливка, при якому вершина усадочної раковини переміщається в отвір плити, тут найменший з трьох розглянутих схем. При куті конусності  $140^{\circ}$ , відносному діаметрі отвору 0,6 і осадженні зливка із співвідношенням висоти до діаметра 2 ступінь висотної деформації становить 0,57, що на 20% менше, ніж при осадженні плоскою плитою.

На основі проведеного аналізу встановлено основні фактори, що впливають на НДС заготовки в процесі кування труб (форма інструменту, кінематика його руху, форма заготовки та її температурний стан) та визначено основні напрямки його подальшого вдосконалення. Запропоновано новий спосіб кування труб з малоприбуткових злитків, який дозволяє збільшити коефіцієнт використання металу при виготовленні поковок типу труб за рахунок використання головної частини зливка. При цьому необхідно в процесі кування неякісний метал головної частини зливка не видаляти перед осадженням і в процесі прошивання блоку розташовувати його прибутковою частиною вгору і при протягуванні на оправці донна частина зливка повинна бути розташована на товстому кінці у її бурта.

Проведено дослідження процесу кування труб з глухим дном прошиванням зливка в контейнері. Розроблено режим кування який дозволяє деформувати заготовку таким чином, щоб постійно зберігався зазор між прошивнем і стінкою поковки для вільного видалення останнього з поковки.

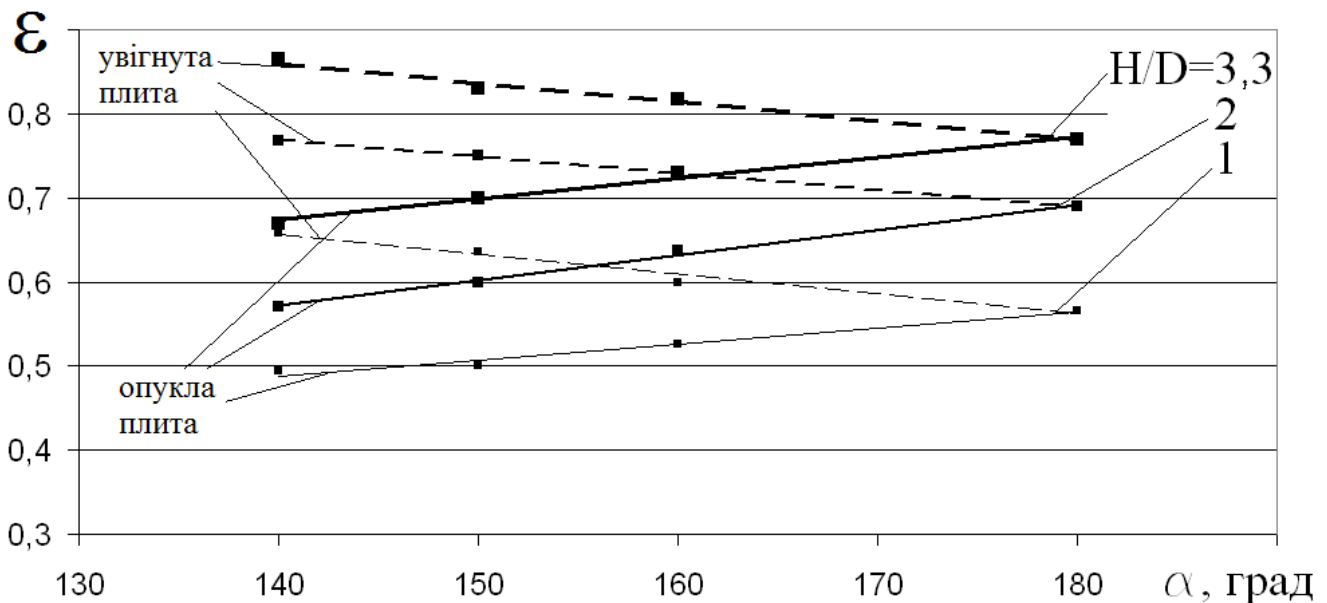


Рис. 16. Графіки залежності відносного ступеня осадження злитка, при якому вершина усадочної раковини переміщується в отвір кільця, від геометричних параметрів інструменту ( $d_0/d_{cp} = 0,6$ )

Запропоновано прошивання заготовки здійснювати по частинах в спеціальному контейнері таким чином, щоб збільшити радіальну складову течії металу заготовки. Встановлено параметри формозміни заготовки в процесі прошивання за новим режимом. Визначено, що зі збільшенням діаметра отвору, що прошивається, зазор між прошивнем і заготовкою також збільшується, крім того збільшується і її зовнішній діаметр.

Проведено моделювання процесу розкочування поковок типу кілець з заготовок з нерівномірним температурним полем (рис. 17). Встановлено можливості отримання профільованих заготовок з використанням стандартного інструменту. Отримано графічні залежності, що описують параметри формозміни заготовки в процесі розкочування нерівномірно нагрітої заготовки. Визначено основні параметри, які мають найбільший вплив на формозміну заготовки в процесі розкочування.

У **восьмому розділі** виконано узагальнення результатів досліджень для практичного використання. Запропоновано новий підхід до проектування технологічних процесів кування крупних поковок типу валів, плит, кілець, труб і дисків, заснований на застосуванні нових методів оцінки параметрів процесів гарячого пластичного деформування. Надано методичні рекомендації до проектування процесів кування різних видів поковок на підставі проведених досліджень з урахуванням технологічних особливостей кожної з поковок.

На підставі нового підходу в проектуванні технологічних процесів кування крупних поковок розроблені нові процеси кування деталей «ротор», «корпус реактора» і «диск». Для поковки «ротор» запропонований спосіб кування з проміжним профілюванням ступінчастими бойками. Розроблено конструкцію спеціальних універсальних бойків. Розроблена технологія передбачає істотну проробку осьової, дефектної частини поковки. Розроблену технологію передано для промислового освоєння на ПАТ «Енергомашспецсталь».

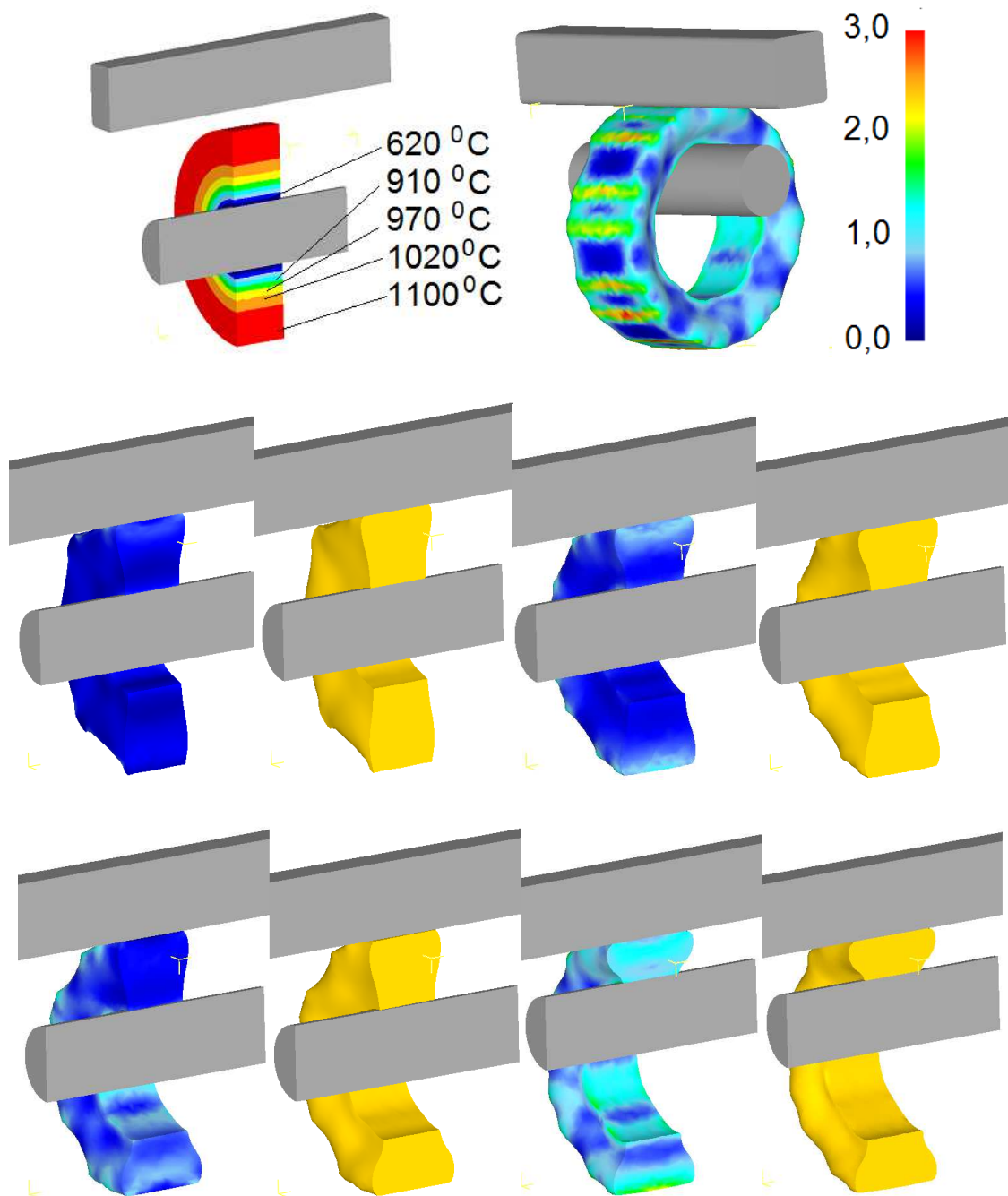


Рис. 17. Формозміна заготовки з нерівномірним температурним полем в процесі розкочування на дорні (розподіл інтенсивності логарифмічних деформацій)

Для виробу «корпус реактора» запропонована технологія, яка дозволяє знизити металосмість в 3 рази за рахунок ускладнення форми поковки, що виготовляється куванням. Технологія реалізується із застосуванням традиційного інструменту. Розробка передана для реалізації на ПАТ «НКМЗ». Для виробу «диск» запропоновано новий спосіб осадження, що дозволяє усунути в поковці наявність зон ускладненої деформації. Технологія передана для впровадження у виробництво.

На основі проведених досліджень запропоновані нові способи та методики проектування процесів кування поковок типу ексцентриків, дисків, валів, труб і кілець. Способи засновані на керуванні НДС заготовки за рахунок керування основними факторами: фактором форми, кінематичним і температурним фактором.

Так запропоновано способи кування поковок типу ексцентриків, засновані на використанні спеціального несиметричного інструменту. Ці способи дозволяють розширити номенклатуру отримуваних виробів.

Запропоновано способи осадження безприбуткових злитків із застосуванням спеціального інструменту у вигляді профільованих плит, які дозволяють підвищити якість одержуваних виробів. Запропоновано способи осадження профільованих заготовок на основі застосування спеціальної форми заготовки і спеціального кінематичного режиму деформування, що дозволяє отримувати поковки типу дисків з підвищеними механічними властивостями (відсутньою зоною ускладнених деформацій) і підвищеної точності (значно зменшеною величиною бочкоподібності та відсутньою овальністю поперечного перетину). Розроблено способи осадження заготовок з нерівномірним температурним полем.

Запропоновано нові способи кування поковок типу валів на основі застосування спеціального інструменту, який дозволяє забезпечити підвищений рівень деформацій зсуву в заготовці. Крім того, запропоновано спосіб отримання заданого поля деформацій в заготовці в процесі протягування на основі управління механічним режимом кування традиційним інструментом. Розроблено спосіб кування заготовок з нерівномірним несиметричним температурним полем протягуванням плоскими бойками. На основі проведених досліджень запропоновано ряд способів кування порожнистих поковок типу труб, кілець і розтрубів на основі застосування заготовок та інструменту спеціальної форми.

Проведено промислове впровадження результатів дослідження у вигляді рекомендацій кування ротора з фланцем, які засновані на дослідженні деформованого стану ексцентриків в процесі висадження. Розроблені рекомендації дозволили визначити особливості формозміни заготовки поковки «ротор» в процесі висадки стовщення і визначити параметри вихідної заготовки і інструмента. Крім того, у виробництво передані рекомендації з кування поковок зі сталі Х12МФ, що дозволяють підвищити технологічну пластичність заготовки і зменшити кількість браку. Переданий метод розрахунку граничної формозміни в процесах гарячого пластичного деформування. Сумарний економічний ефект від впровадження розробок на ПАТ «НКМЗ» склав 1150 тис. грн. за рівнем цін 2013 р. Очікуваний економічний ефект становить 1200 тис. грн.

На ПАТ «Енергомашспецсталь» передані для промислового освоєння рекомендації з кування поковок типу валів відповідального призначення, засновані на куванні вала через «пластину» з проміжним профілюванням заготовки. Крім того, передані і випробувані процеси кування поковок типу дисків осадженням, засновані на попередньому профілювання заготовки, і метод оцінки технологічної деформівності металу в багатостадійних процесах гарячого деформування. Передані і випробувані рекомендації з кування поковок з малопластичних матеріалів. Сумарний економічний ефект від впровадження розробок на ПАТ «Енергомашспецсталь» склав 720 тис. грн. за рівнем цін на 2013 р. Очікуваний економічний ефект становить 1400 тис. грн.

На ПАТ «Дніпроспецсталь» проведено комплекс досліджень з кування поковок з малопластичних матеріалів і визначено термомеханічний режим кування поковок зі сталі Х12МФ, який дозволив істотно знизити кількість браку на вироб-

ництві. Передано рекомендації з кування поковок з розвиненими деформаціями макрозсуву. Сумарний економічний ефект від впровадження розробок склав 250 тис. грн., за рівнем цін 2012 р. Очікуваний економічний ефект становить 357 тис. грн.

На ПАТ «Мотор Січ» передані для впровадження рекомендації та методики побудови кривих течії металу в широкому діапазоні швидкостей деформацій за обмеженою кількістю стандартних характеристик матеріалу. Передана методика моделювання зміни мікроструктури металу в процесах гарячого пластичного деформування. Передані розробки дозволили скоротити час підготовки виробництва виробів, які отримуються куванням, на 30%, знизити кількість браку на 10%. Реальний економічний ефект від впровадження склав 600 тис. грн. за рівнем цін на 2015 р. Очікуваний економічний ефект від впровадження становить 700 тис. грн.

На ВАТ «Русполімет» передані і впроваджені такі розробки, як методика розрахунку формозміни заготовки в процесі осадження розгонкою вузьким бойком, механічні режими і параметри інструменту для кування поковок типу валів зі спеціальних матеріалів і сталей, схеми осадження заготовок, які забезпечують мінімальну нерівномірність розподілу деформацій в об'ємі заготовки, термічний режим кування малопластичних матеріалів. Сумарний економічний ефект від впровадження на ВАТ «Русполімет» склав 150 тис. доларів за рівнем цін 2013 р.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова проблема підвищення техніко-економічних параметрів технологічних процесів кування крупних поковок за рахунок розвитку наукових основ процесів гарячого пластичного деформування і вдосконалення технологічних способів і режимів кування.

1. На основі проведеного літературного аналізу визначені проблеми традиційного підходу в проектуванні технологічних процесів кування крупних поковок зі злитків. Встановлено основні напрями вдосконалення даної галузі знань, які полягають в застосуванні і створенні нових підходів проектування технологічних процесів кування крупних поковок, що засновані на нових методах моделювання фізичних процесів, пов'язаних з гарячим пластичним деформуванням, і вдосконалення технологічних процесів кування. На основі методу морфологічних карт розширена і формалізована область пошуку раціональних схем деформування куванням.

2. Розвинуто метод оцінки технологічної деформівності металу при гарячому дробному деформуванні, що дозволяє прогнозувати граничне формозмінення заготовки в складних температурно-швидкісних умовах деформування і враховує ефект відновлення пластичності металу в технологічних паузах. На основі запропонованого методу розроблено рекомендації щодо реалізації процесів осадження і протягування, що дозволили підвищити технологічну пластичність заготовки на 20%.

3. Розроблено метод побудови кривих течії металу за довідковими характеристиками матеріалу, такими, як межа міцності і межа текучості, що дозволяє на основі використання коефіцієнта пропорційності матеріалу до температурно-швидкісних умов деформування отримувати криві течії металу в широкому діапа-

зоні швидкостей за мінімальним набором даних. Виявлено залежності коефіцієнта пропорційності матеріалу від температурно-швидкісних умов деформації, від температури, групи матеріалу і рівня швидкостей деформації. Запропонований метод дозволяє описувати залежність напруження течії металу від величини, швидкості і температури деформації з точністю до 20%.

4. Запропоновано методику оцінки еволюції мікроструктури металу в процесах гарячого деформування, що заснована на використанні моделей, які враховують динамічну, статичну рекристалізацію і зростання зерен при витримці при високій температурі. На основі запропонованої методики проведено дослідження нових схем кування валів, плит та дисків і встановлені поля розподілу розмірів зерна в об'ємі заготовок, що підтверджують припущення про вплив гарячої деформації на структуру металу і дозволяють встановити раціональні режими кування, які забезпечили підвищення рівномірності розподілу механічних властивостей у виробі.

5. На основі аналізу схем кування валів несиметричними плоскими, комбінованими та вирізними бойками встановлено, що найкращу схему напружено-деформованого стану в заготовці забезпечують комбіновані несиметричні бойки з кутом скосу верхнього бойка від  $10^{\circ}$  до  $20^{\circ}$ , кутом вирізу нижнього бойка від  $135^{\circ}$  до  $145^{\circ}$ . Для особливо відповідальних довгомірних виробів запропонований спосіб кування ступінчастими бойками з раціональним кутом скосу ступені  $\alpha=15^{\circ}\dots45^{\circ}$ , відносною подачею заготовки  $f/H=0,5\dots1,0$ , відносним зазором між бойками  $z/H=-0,15\dots 0,3$  і відносною висотою ступені бойка  $h/H= 0,1\dots0,2$ .

6. Встановлено закономірності параметрів напружено-деформованого стану, які описують розподіл величини інтенсивності напружень та деформацій в об'ємі заготовки при куванні протягуванням довгомірних виробів плоскими, комбінованими і вирізними бойками від форми і градієнта температурного поля, а також його розташування по відношенню до деформуючого інструменту. Отримані графічні залежності параметрів НДС заготовки, які дозволили розробити раціональні режими протягування поковок валів з вуглецевих сталей при різному градієнті і формі (симетричній, несиметричній) температурного поля. Встановлено відносні подачу і обтискання заготовки бойками при квазі-рівномірному розподілі температур по її перетину і при зниженні температури поверхні на 100, 200 і  $300^{\circ}\text{C}$ , що дозволяють отримувати мінімальну нерівномірність розподілу деформацій по перерізу поковки.

7. Розроблено режим високотемпературної термічної обробки злитків сталі X12MФ, що підвищує технологічну пластичність, який включає в себе витримку заготовки при температурі  $1200^{\circ}\text{C}$ , при якій відбувається коагуляція карбідної сітки, зниження температури і витримку при температурі  $1160^{\circ}\text{C}$  перед куванням. Встановлено раціональний температурний інтервал кування злитків зі сталі X12MФ на пресах для плавок з вакуумуванням, який знаходиться в межах  $1160-950^{\circ}\text{C}$ .

8. На основі теоретичних і експериментальних досліджень, встановлені закономірності зміни деформованого стану поковок типу дисків при осадженні, які описують його зміну в залежності від форми, розмірів плит і бойків, кінематики деформування, а також градієнта температурного поля заготовки. Запропоновано

спосіб осадження профільованих циліндричних заготовок у вигляді циліндра з конусними уступами, і спосіб осадження з проміжною розгонкою, які дозволяють знизити нерівномірність розподілу деформацій в об'ємі заготовки і підвищити точність поковок типу дисків, що отримуються із застосуванням операції осадження. Встановлено раціональні параметри осадження розгонкою, такі як, відносна ширина бойка  $0,1..0,3$  і висота вихідної заготовки  $H/D \geq 1,0$ . Запропоновано спосіб кування ексцентриків висадженням в скошених кільцевих плитах і спосіб кування дисків осадженням циліндричної заготовки з температурою поверхні більшої температури серцевини. Встановлено раціональні режими кування безприбуткових злитків осадженням опуклими кільцевими плитами з кутом конусності  $140^0$  і відносним діаметром отвору, що дорівнює  $0,6$  діаметра зливка.

9. Встановлено закономірності формозміни заготовки в процесах кування порожнистих поковок типу труб і профільованих кілець, які описують її зміну в залежності від форми, розмірів інструменту, кінематики деформування, а також градієнта температурного поля заготовки. На основі отриманих закономірностей, запропонований механізм перерозподілу металу заготовки в заданих напрямках за рахунок узгодження режимів обтисків і подач інструменту, а також варіювання параметрами температурного поля. Підібрана раціональна форма заготовки для розкочування конічних кілець на циліндричному дорні плоским бойком і розроблена методика розрахунку технологічного процесу кування конічних кілець. Запропоновано спосіб кування труб з малоприбуткових злитків, що дозволяє збільшити коефіцієнт використання металу за рахунок використання головної частини зливка. Спосіб передбачає використання в процесі кування неякісного металу головної частини зливка, який буде перерозподілений в припуск під механічну обробку. Зниження металоємності виробу досягає  $10-15\%$ .

10. Розроблено методику проектування технологічних процесів кування поковок типу валів, плит, кілець, труб і дисків, яка заснована на застосуванні запропонованих методів дослідження процесів гарячого пластичного деформування. Надані методичні рекомендації з проектування процесів і оснащення для кування порожнистих і суцільних довгомірних поковок на основі проведених досліджень з урахуванням технологічних особливостей кожної з поковок. На основі запропонованої методики проектування технологічних процесів кування крупних поковок, розроблені нові процеси кування деталей «ротор», «корпус реактора» і «диск».

11. Проведено промислове впровадження результатів досліджень, що описані в роботі, на ПАТ «НКМЗ», ПАТ «Енергомашспецсталь», ПАТ «Дніпроспецсталь», ПАТ «МоторСіч» та ПрАТ «Фінпрофіль». До таких розробок відносяться: рекомендації кування поковки ротора з ексцентриковим фланцем; рекомендації кування поковок валів відповідального призначення за схемою протягування через «пластину» з проміжним профілюванням; рекомендації з кування злитків зі сталі X12МФ; метод розрахунку граничного формозмінення в процесах гарячого пластичного деформування; процеси кування поковок типу дисків осадженням, які засновані на попередньому профілюванні заготовки, схеми осадження заготовок, що забезпечують мінімальну нерівномірність розподілу деформацій в об'ємі

заготовки; рекомендації та методики побудови кривих течії металу в широкому діапазоні швидкостей деформацій за обмеженою кількістю стандартних характеристик матеріалу; методика моделювання еволюції мікроструктури металу в процесах гарячого пластичного деформування; методика розрахунку формозмінення заготовки в процесі осадження розгонкою вузьким бойком. Впровадження розробок дозволило підвищити техніко-економічні показники процесів кування валів, дисків, труб і кілець. Сумарний економічний ефект від впровадження розробок склав 2720 тис. грн. очікуваний економічний ефект складає 1657 тис. грн.

Методи побудови кривих течії металу за довідковими характеристиками, оцінки технологічної деформівності та розрахунку еволюції мікроструктури металів в процесах гарячого пластичного деформування, і рекомендації щодо проектування процесів кування поковок типу валів, плит, дисків, кілець та труб запроваджені у навчальний процес Донбаської державної машинобудівної академії.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Влияние операции выворота поковки коническими плитами на распределение / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, С.А. Близнюк // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. - №3(24) – С. 64-68.

2. Алиева Л.И. Моделирование малоотходной штамповки полых деталей из сплошных заготовок / Л.И. Алиева, Е.Н. Бондарева, Я.Г. Жбанков // Научный вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2010. - №1 (6Е). – С. 15-21. – Режим доступа: [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/e-journals/VDDMA/2010\\_1/article/10ALIFSB.pdf](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/e-journals/VDDMA/2010_1/article/10ALIFSB.pdf).

3. Жбанков Я.Г. Численное моделирование пластического течения материала при равноканальном угловом прессовании через штамп с подвижным дном / Я.Г. Жбанков, А.В. Периг, О.А. Жукова // Вестник ХПИ : сб. науч. трудов. – Харьков, 2011 - №45. – С. 76-84.

4. Жбанков Я.Г. Технология изготовления стержневых деталей типа эксцентрик / Я.Г. Жбанков // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. - №2(27) – С. 66-72.

5. Алиев И.С. Ковка эксцентриковых валов смещением и последовательной осадкой в кольцах / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. - №3(28) – С. 72-77.

6. Жбанков Я.Г. Ковка конических обечаек / Я.Г. Жбанков, Таган Л.В., Шкира А.В. // Научный вестник ДГМА. – 2011. - №2(8Е) – С. 8-14.

7. Алиев И.С. Осадка бесприбыльных слитков на плите с отверстием / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. - №4(29) – С. 94-102.

8. Aliiev I. Strong shear deformations in billet during heavy forging by special anvils / I. Aliiev, I. Zhbankov, L. Tagan // XIII International Scientific Conference. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering, Czestochowa. - 2012 – pp. 348-355.



9. Алиев И.С. Протяжка заготовок с дополнительными сдвиговыми деформациями / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // КШП. ОМД. – Москва, 2012. - №7. - С. 18-24.
10. Жбанков Я.Г. Деформированное состояние заготовки при протяжке бойками со скосом / Я.Г. Жбанков // Известия ТулГУ. : сб. науч. трудов. – Тула, 2012. - № 8. – С. 211-218.
11. Алиев И.С. Осадка бесприбыльных слитков на плите с отверстием / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. - №1(30) – С. 90-100.
12. Aliieva L. Analysis of billet deformation during the combined radial-backward extrusion / L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhbakov // XIII International Scientific Conference. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering, Czestochowa, 2012 – pp. 389-396.
13. Aliiev I. The forging of billet by special instrument with asymmetric form / I. Aliiev, I. Zhbakov // 12th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" – RaDMI 2012, Vrnjačka Banja, Serbia, 13-17 September 2012. – 2012. – Vol. 2. – pp. 153-159.
14. Управление напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессахковки крупных поковок / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган, А.А. Швец // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. - №2(35). - С. 50-57.
15. Жбанков Я. Г. Исследование процесса профилирования заготовки на вогнутую бочку разгонкой узким бойком / Я. Г. Жбанков // Вестник ХПИ : сб. науч. трудов. – Харьков, 2013. - № 35. – С.12–22.
16. Алиев И.С. Факторы, влияющие на параметрыковки крупных поковок / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, А.В. Периг // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2013. -№1. – С. 27-45.
17. Алиев И. С. Факторы управления напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессахковки крупных поковок / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков // Международный промышленный журнал «Мир техники и технологий». – Чугуев, 2013. – № 10–11 (142–143). – С. 38–46.
18. Жбанков Я.Г. Восстановление пластичности при изотермическом горячем дробном деформировании / Я. Г. Жбанков, Л. И. Алиева, В. М. Михалевич // КШП. ОМД. – Москва, 2013. - № 7. - С.12-17.
19. Исследование процесса протяжки заготовок бойками со скосом / Я.Г. Жбанков, В.И. Шимко, Л.В. Таган, А.В. Шкира // КШП. ОМД. – Москва, 2013. - №1. – С. 13-18.
20. Алиев И.С. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных бойках несимметричной формы / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков, Л. В. Таган // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер. : Машинобудування. - 2013. - № 3. - С. 77-83.
21. 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. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36). – С. 3–9.

22. Алиева Л.И. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков, В.Ю. Станков // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2013. - №43 (1016). – С. 3-10

23. Жбанков Я.Г. Дифференцированная ковка протяжкой плоскими бойками / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец, М.И. Гунько // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 60-65.

24. Жбанков Я. Г. Исследование напряженного состояния заготовки при протяжке с неоднородным температурным полем комбинированными бойками / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец, М.А. Турчанин // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 2 (31). – С. 21-25

25. Заблоцкий В.К. Исследование деформированного состояния заготовки при протяжке с неоднородным температурным полем комбинированными бойками / В.К. Заблоцкий, Я.Г. Жбанков, А.А. Швец // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, - 2013. - № 4 (37). - С. 70-73

26. Жбанков Я.Г. Интенсификация сдвиговых деформаций при ковке заготовок с неоднородным температурным полем / Я.Г. Жбанков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск, 2013. - №2. – С. 42-47.

27. Повышение деформируемости слитков стали Х12МФ / И.Н. Логозинский, А.Н. Тумко, Е.С. Фомин, А.С. Сальников, Б.А. Левин, Я.Г. Жбанков // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. - №2(35) - С. 66 - 69.

28. Прогнозирование трещинообразования в процессе протяжки заготовок плоскими бойками / Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, А.А. Швец, Л.В. Таган // КШП. ОМД. – Москва, 2013. - № 10. - С. 7-13

29. Жбанков Я.Г. Влияние формы и размеров заготовки на напряженно-деформированное состояние в процессе осадки / Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, Р.И. Сивак // Республиканский журнал. Технология производства металлов и вторичных материалов. – Темиртау, 2013. - №1(23) – С. 109-118.

30. Жбанков Я.Г. Определение рациональных параметров профилированных заготовок, подвергаемых осадке плоскими плитами / Я. Г. Жбанков, О. Е. Марков, Р. И. Сивак // КШП. ОМД. – Москва, 2013. - № 8. - С. 8-15.

31. Марков О.Е. Влияние профилирования укороченных слитков на напряженно-деформированное состояние и закрытие осевых дефектов при ковке плит / О.Е. Марков, Я. Г. Жбанков, А. А. Швец // КШП. ОМД. – Москва, 2013. - № 9. - С. 32-37.

32. Zhibankov I. G. Intensive Shear Deformation in Billets During Forging with Specially Formed Anvils / I. G. Zhibankov, A. V. Perig // Materials and Manufacturing Processes (Thomson Reuters 2011 Impact Factor: 1.058). – 2013. – Vol. 28. – pp. 577-583.

33. Zhibankov I. G. Forging of Ingots Without Hot Tops / I. G. Zhibankov, A. V. Perig // Materials and Manufacturing Processes (Thomson Reuters 2011 Impact Factor: 1.058). – 2013. – Vol. 28. – Iss. 3. – pp. 229-235.

34. Жбанков Я.Г. Моделирование изменений микроструктуры металла в процессе горячего пластического деформирования / Я.Г. Жбанков // Вестник ХПИ : сб. науч. трудов. – Харьков, 2014. - №о 44 (1087). - С. 34-39

35. Алиев И.С. Исследование процессаковки плит бойками со скосом / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, И.А. Грачев // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 69-74
36. Жбанков Я.Г. Исследование процесса осадки узким бойком / Я.Г. Жбанков // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – Днепропетровск, 2014. - №5(290). – С. 29-35.
37. Элементыштамповки в процессахковки крупныхпоковок / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков, В.Н. Злыгорев, Л.В. Таган // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 20-27
38. Zhbankov I. G. Rational Parameters of Profiled Workpieces for Upsetting Process / I. G. Zhbankov, O.E. Markov, A. V. Perig // *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. – Vol. 72. – № 5–8. – P. 865 – 872.
39. Жбанков Я.Г. Исследование процессаковки крупных дисков осадкой узким бойком на прессах малой мощности / Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, С.В. Мартынов // *КШП. ОМД.* – Москва, 2015. - № 3. - С. 10-15.
40. Жбанков Я.Г. Направления совершенствования процессовковки дисков / Я.Г. Жбанков // *КШП. ОМД.* – Москва, 2015. - № 6. - С. 17-27.
41. 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. – pp. 287-301.
- 42 – 60. Патенти України на корисну модель: 59105, 73653, 69008, 86620, 20770, 69058, 25828, 28703, 59106, 82189, 93867, 74406, 81227, 81347, 84077, 69059, 70801, 74327, 68991.
61. Факторы управления напряженно-деформированным состоянием заготовки при ковке крупныхпоковок / И.С. Алиев, О.Е. Марков, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган, А.А. Швец // *Тезисы докладов V научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013», 22-24 травня 2013.* – г.Краматорск. 2013. - С. 39-41.
62. Жбанков Я. Г. Восстановление пластичности паузами при горячем деформировании / Я. Г. Жбанков // *V Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов».* – г. Москва, 26–29 ноября 2013. – С. 237–238.
63. Жбанков Я.Г. Ковка слитков протяжкой с интенсивными сдвигами / Я.Г. Жбанков // *IX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов».* – г. Москва, 23-26 октября 2012 г. - С.554-556
64. Ковкапоковок типа валов через пластину с применением операции продольного сдвига / Я.Г. Жбанков, Л.И. Алиева, Р.А. Загородних, Л.В. Таган // *Труды VII Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии».* – г. Темиртау, 2013. - С. 68-80
65. Алиев И.С. Ковка слитков бойками ступенчатой формы / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // *Машини і пластична деформація металів. Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції.* - Запоріжжя, 19-22 листопада 2012. – С. 69-70.

66. Алиев И.С. Исследование процессаковки плит плоскими бойками со скосом / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков, И. А. Грачев // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением : материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» – СПб, 14–17 октября 2014 года. – С. 23–28.

67. Жбанков Я. Г. Численное моделирование истощения ресурса пластичности при равноканальном многоугловом прессовании / Я. Г. Жбанков, А. В. Периг, С. В. Мартынов // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Материалы V-й Международной научно-практической конференции. - г. Ростов-на-Дону, 29 февраля – 1 марта 2012 г. – С. 203–207.

68. Жбанков Я.Г. Влияние относительной подачи и величины обжатия на напряженно-деформированное состояние поковки при протяжке / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Тези доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції. - Київ, 14-17 травня 2013 р. – С. 96-97.

69. Жбанков Я.Г. Способы управления качеством крупных поковок / Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган, А.А. Швец // Тезисы докладов V научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013». – г. Краматорск, 22-24 травня 2013. – С. 26-28.

70. Жбанков Я.Г. Повышение качества крупных поковок за счет снижения отклонений формы в виде утяжин / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец, П.П. Кальченко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали одинадцятої Міжнародної науково-технічної конференції. – г. Краматорськ, 4-6 июня 2013. – С. 48.

71. Протяжка коротких заготовок без образования дефекта зажим / И.С. Алиев, П.П. Кальченко, А.А. Швец, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные технологии обработки металлов давлением: моделирование, проектирование, производство». – г. Москва, 2013. - С. 93-96

72. Жбанков Я.Г. Ковка деталей типа эксцентрик / Я.Г. Жбанков // Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском та авто технічних експертиз. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції. - Вінниця, 2011. – С. 150-151.

73. Жбанков Я.Г. Ковка эксцентрика / Я.Г. Жбанков // Тезисы докладов III научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2011». – г. Краматорск, 2011 – С. 36-38.

74. Жбанков Я.Г. Ковка бесприбыльных слитков плитами различной конфигурации / Я.Г. Жбанков, А.В. Шкира, Л.В. Таган // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. – м. Краматорськ, 2012 – С. 34.

75. Алиев И.С. Осадка выпукло-вогнутыми плитами / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, О.А. Жукова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. – м. Краматорск, 2010 – С. 8.

76. Жбанков Я. Г. Влияние горячей деформации и термической обработки на структуру стали 40Х / Я. Г. Жбанков, В. И. Шимко, С. А. Амелин // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: материалы IV Международной научно-технической конференции. – г. Краматорск, 2013. – С. 104–106.

77. Алиев И.С. Ковка крупных поковок из бесприбыльных слитков осадкой плоской плитой с отверстием / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. – м. Краматорськ, 2012 – С. 8.

78. Жбанков Я.Г. Уменьшение неравномерности распределения деформаций при осадке профилированных заготовок / Я.Г. Жбанков, В.В. Панов, О.Е. Марков // Тезисы докладов V научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013». - Краматорск, 22-24 травня 2013. – С. 28-30.

79. Гаряче об'ємне штампування : навчальний посібник / І. С. Алієв, Я. Г. Жбанков. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 240 с.

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

81. Уменьшение металлоемкости сложнопрофилированных полых изделий получаемых ковкой / И.А. Грачев, В.Н. Злыгорев, Я.М. Чикота, Я.Г. Жбанков // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 75-80

82. Жбанков Я.Г. Ковка крупных труб на гидравлических прессах / Я.Г. Жбанков // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XVI International scientific conference. A collective monograph. – Czestohowa, 2015. – pp. 268-274

### **Особистий внесок автора в работах, які опубліковані у співавторстві:**

[1, 75] – проведення теоретичного аналізу процесів осадження заготовки кінчними плитами; [2, 80] – проведення моделювання і аналізу процесу прошивання суцільних заготовок; [3, 67] – проведення моделювання і аналізу процесів інтенсивної пластичної деформації; [5, 72] – оцінка можливостей, проведення теоретичного і експериментального дослідження процесів кування ексцентрикових деталей; [6] – проведення аналізу процесів кування порожнистих кінчних виробів; [7, 11, 33, 74, 67] – проведення аналізу теоретичних і експериментальних досліджень процесів кування безприбуткових злитків осадженням плитою з отвором; [8-10, 12, 13, 19-22, 32, 64-65] – вибір напрямків подальшого удосконалення процесів кування довгомірних виробів на основі забезпечення інтенсивних деформацій макросузу, проведення теоретичних і експериментальних досліджень; [14] – розробка математичних моделей процесів комбінованого деформування; [15] – оцінка можливостей нового підходу процесу кування поковок типу дисків, проведення теоретичних і експериментальних досліджень; [12, 16, 17, 61, 69] – вибір напрям-

ків подальшого удосконалення процесів кування поковок зі злитків; [18, 62] – розробка концепції методу розрахунку відновлення пластичності металу при дрібному гарячому деформуванні; [23-26, 28, 68, 70, 71] – проведення теоретичних досліджень і аналізу режимів деформування в процесах кування валів протягуванням; [27, 31] – проведення аналізу експериментальних даних; [29, 30, 38, 39, 41, 78] – розробка нового способу осадження, проведення теоретичних і експериментальних досліджень; [35, 66] – проведення теоретичних і експериментальних досліджень процесів протягування плит плоскими бойками; [37, 81] – проведення аналізу та вибір напрямків подальшого удосконалення процесів кування крупних поковок з елементами штампування; [40-42, 44-58] – основні ідеї корисних моделей, теоретичні і експериментальні дослідження способів кування; [76] – проведення експериментальних досліджень; [79] – розробка алгоритмів і методики проектування технологічних процесів гарячого пластичного деформування штампуванням; [82] – проведення теоретичних досліджень процесу кування крупногабаритних труб прошиванням.

## АНОТАЦІЯ

**Жбанков Я. Г. Розвиток наукових основ процесів гарячого пластичного деформування і удосконалення технологій кування крупних поковок. – 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, Краматорськ, 2016.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми розвитку наукових основ і вдосконалення технологічних процесів кування крупних поковок зі злитків для виготовлення високоякісних заготовок і забезпечення економії матеріальних ресурсів в енергетичному та важкому машинобудуванні на базі розвитку та практичної реалізації методів розрахунку, а також розробки практичних рекомендацій кування.

У результаті проведеного аналізу і комплексних теоретичних і експериментальних досліджень встановлено вплив гарячої пластичної деформації на мікроструктуру і механічні властивості кінцевого виробу який одержується куванням. Для розрахунку процесів кування великих поковок адаптований метод моделювання еволюції мікроструктури металу при гарячій пластичній деформації.

Запропоновано методи розрахунку механічних властивостей металу в процесах гарячого пластичного деформування. Розвинуто метод розрахунку відновлення пластичності металу при гарячому деформуванні з паузами. Метод застосований для розробки процесів кування поковок типу дисків і валів.

Розвинуто метод побудови кривих течії металу за стандартними довідковими характеристикам у вигляді межі міцності і межі текучості металу. Метод дозволяє суттєво зменшити кількість необхідних експериментальних даних для проведення експрес аналізу технологій в умовах виробництва. Метод застосований при проведенні ряду досліджень процесів кування поковок типу валів, плит, дисків і кілець.

Встановлені суперечності між рекомендаціями, по поширеним технологічними схемами кування, що зустрічаються в літературі. Для основних груп поковок проведені дослідження для визначення раціональних схем кування і параметрів термомеханічних режимів деформування.

Розроблено рекомендації для проектування нових ресурсозберігаючих технологічних процесів кування злитків і ковальська оснащення для кування. Впроваджено нові технологічні процеси кування великих валів і дисків, які дозволили підвищити якість поковок і знизити їх собівартість.

**Ключові слова:** кування, гаряча пластична деформація, осадження, протягування, розкачування, відновлення пластичності, метод скінчених елементів, крива течії металу.

## АННОТАЦІЯ

**Жбанков Я. Г. Развитие научных основ процессов горячего пластического деформирования и совершенствование технологийковки крупных поковок. – 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, Краматорск, 2016.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической проблемы развития научных основ и совершенствование технологических процессовковки крупных поковок из слитков для изготовления высококачественных заготовок и обеспечения экономии материальных ресурсов в энергетическом и тяжелом машиностроении на базе развития и практической реализации методов расчета, а также разработки практических рекомендацийковки.

В результате проведенного анализа и комплексных теоретических и экспериментальных исследований установлено влияние горячей пластической деформации на микроструктуру и механические свойства конечного изделия получаемогоковкой. Для расчета процессовковки крупных поковок применен метод моделирования эволюции микроструктуры металла при горячей пластической деформации. На основании этого метода проведен ряд расчетов позволивший подобрать рациональные параметры процессовковки поковок типа дисков и плит, обеспечивающие минимальную неравномерность распределение размера зерна по объему поковки.

Развит метод учета восстановления пластичности металла при горячем дробном деформирования, позволяющий рассчитать рациональные режимыковки, обеспечивающие высокую технологическую пластичность металла. Метод применен для разработки процессовковки поковок типа дисков и валов.

Развит метод построения кривых течения металла по стандартным справочным характеристикам в виде предела прочности и предела текучести металла. Метод позволяет строить кривые течения сталей при высоких температурах в широком диапазоне скоростей деформаций, опираясь только лишь на известные предел прочности и текучести. Данный метод позволяет существенно уменьшить количе-

ство необходимых экспериментальных данных для проведения экспресс анализа технологий в условиях производства. Метод применен при проведении ряда исследований процессов ковки поковок типа валов, плит, дисков и колец.

На основе метода морфологических карт и проведенного анализа разработаны классификации процессов ковки протяжкой, осадкой и прошивкой основных типов поковок, позволившие предложить ряд новых способов ковки. Установлены противоречия между рекомендациями, по распространенным технологическим схемам ковки, встречающимися в литературе. Для основных групп поковок проведены исследования для определения рациональных схем ковки и параметров термомеханических режимов деформирования.

Для ковки поковок длинномерных изделий типа валов и плит провели анализ влияния формы инструмента, его кинематического воздействия и термического состояния заготовки на параметры ее НДС в процессе ковки. Рассмотрены схемы ковки асимметричным инструментом позволяющим создать интенсивные макросдвиговые деформации в заготовке. Проведен анализ влияния механического режима и температурного состояния заготовки в процессах ковки традиционным кузнечным инструментом на параметры качества изделия.

Для ковки поковок типа дисков, колец и труб провели аналогичные исследования. Подобрали схемы деформирования, обеспечивающие минимальную неравномерность распределения деформаций в объеме заготовки и повышенную точность поковки.

Проведены исследования ковки заготовок из стали X12MФ, получены рекомендации, позволяющие существенно повысить технологическую пластичность слитков из данной стали за счет применения специального термического режима деформирования.

Разработаны рекомендации для проектирования новых ресурсосберегающих технологических процессов ковки слитков и кузнечная оснастка для ковки. Внедрены новые технологические процессы ковки крупных валов и дисков, которые позволили повысить качество поковок и снизить их себестоимость.

**Ключевые слова:** ковка, горячая пластическая деформация, осадка, протяжка, раскатка, восстановление пластичности, метод конечных элементов, кривая течения металла.

## ABSTRACT

**Zhbankov I.G. Development of Scientific Basics of Hot Forging Processes and Improvement of the Technological Process of Heavy Forgings Manufacturing. – Manuscript.**

Dissertation for a Scientific Degree of a Doctor of Technical Sciences on the Speciality 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. –Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2016.

The thesis is devoted to the solution of important scientific and applied problem of development of scientific basics and improvement of the technological processes of open die forging of heavy ingots.



On the basis of the results obtained by theoretical and experimental research there was determined the influence of hot plastic deformation on microstructure and mechanical properties of product produced by open die forging. For computation of open die forging processes there were used the models which allow prognostication of microstructure evolution during hot plastic deformation. On the basis of these models there was conducted a set of calculations which allowed to determine rational technological parameters of open die forging discs and plates and to obtain products with minimal irregularity of strain distribution.

Methods of calculation of mechanical characteristics of metals under hot deformation conditions were proposed. The method of plasticity recovery calculation during hot multistage forging was improved, which allows determining rational technological regimes of heavy forgings production. This method is used for design processes of forging discs and shafts. The method of calculation of metal flow curves was improved with the usage of standard mechanical data of material such as yield and peak stress. This method allows to significantly reduce the number of necessary experimental data for analysis of technologies in production conditions. The method was used during the research activities in the frame of current work.

On the basis of the method of morphological cards and on the conducted literature analysis there was developed a set of classifications of forging processes. For the basic groups of products such as discs, shafts, rings, etc. there were conducted researches which are directed on determination of rational parameters of thermomechanical forging regimes.

**Keywords:** heavy forging, hot plastic deformation, upsetting, drawing, ring rolling, plasticity recovery, finite element method, metal flow curve.



Підп. до друку 25.08.2016. Формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 1,9.  
Наклад 130 пр. Зам. № 65.

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