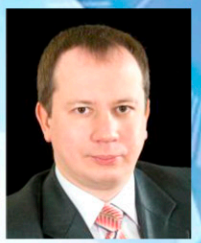
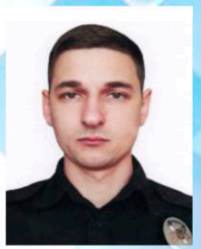


Кухар Володимир Валентинович
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри обробки металів тиском,
ДВНЗ «ПДТУ» (м. Маріуполь)



Ніколенко Роман Сергійович
кандидат технічних наук,
командир роти №1 батальйону
Управління патрульної поліції
в Донецькій області Департаменту
патрульної поліції (м. Маріуполь)

Присяжний Андрій Григорович
кандидат технічних наук,
доцент кафедри обробки металів тиском,
ДВНЗ «ПДТУ» (м. Маріуполь)

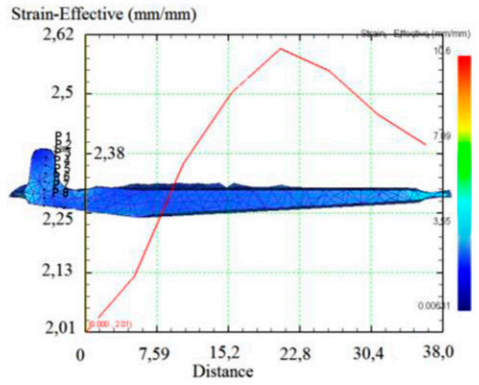
Аніщенко Олександр Сергійович
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
доцент кафедри обробки металів тиском,
ДВНЗ «ПДТУ» (м. Маріуполь)

Монографію присвячено питанням багатоперехідного об'ємного штампування поковок плит та пластин складної конфігурації на кривошипних гарячештампувальних пресах. Удосконалені технології штампування складнопрофільних поковок «Плита рухома» та «Супорт» за рахунок виконання профілювання заготовки асиметричним осаджуванням радіусними бойками. Експериментальні та теоретичні дослідження виконані за допомогою методів скінчено-елементного та фізичного моделювання.

ШТАМПУВАННЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ПЛИТ ІЗ АСИМЕТРИЧНИМ ОСАДЖУВАННЯМ РАДІУСНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

В. В. Кухар
Р. С. Ніколенко
А. Г. Присяжний
О. С. Аніщенко

ШТАМПУВАННЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ПЛИТ ІЗ АСИМЕТРИЧНИМ ОСАДЖУВАННЯМ РАДІУСНИМ ІНСТРУМЕНТОМ



МОНОГРАФІЯ

Маріуполь 2021

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»

В. В. Кухар, Р. С. Ніколенко,
А. Г. Присяжний, О. С. Аніщенко

ШТАМПУВАННЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ПЛИТ ІЗ АСИМЕТРИЧНИМ ОСАДЖУВАННЯМ РАДІУСНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Монографія

Рекомендовано вченою радою
ДВНЗ «Приазовський державний
технічний університет»

Маріуполь
2021

УДК 621.73.043 : 621.73.011-016
Ш 87

Рекомендовано вченою радою
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
(протокол № 13 від 27 травня 2021 р.)

Рецензенти:

Марков О. Є. – завідувач кафедри «Комп'ютеризовані дизайн і моделювання процесів і машин» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ), доктор технічних наук, професор;

Грушко О. В. – завідувач кафедри «Опір матеріалів та прикладна механіка» Вінницького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор;

Самотугін С. С. – завідувач кафедри «Наноінженерія у галузевому машинобудуванні» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», доктор технічних наук, професор.

Штампування складнопрофільних плит із асиметричним
Ш 87 осаджуванням радіусним інструментом : монографія / В. В. Кухар, Р. С. Ніколенко, А. Г. Присяжний, О. С. Аніщенко. – Маріуполь : ПДТУ, 2021. – 251 с.

ISBN 978-966-604-273-9

Монографію присвячено питанням багатоперехідного об'ємного штампування поковок плит та пластин складної конфігурації на кривошипних гарячештампувальних пресах. Удосконалені технології штампування складнопрофільних поковок «Плита рухома» та «Супорт» за рахунок виконання профілювання заготовки асиметричним осаджуванням радіусними бойками. Експериментальні та теоретичні дослідження виконані за допомогою методів скінчено-елементного та фізичного моделювання.

УДК 621.73.043 : 621.73.011-016

© В. В. Кухар, Р. С. Ніколенко,
А. Г. Присяжний, О. С. Аніщенко, 2021
© ДВНЗ «ПДТУ», 2021

ISBN 978-966-604-273-9

ЗМІСТ

ВСТУП 6

Розділ 1. ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЙ БАГАТОПЕРЕХІДНОГО ШТАМПУВАННЯ ПОКОВОК ПЛИТ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ З ПІДГОТОВЧИМ ОСАДЖУВАННЯМ ЗАГОТОВОК ПРОФІЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ 12

1.1 Обґрунтування необхідності профілювання заготовок перед гарячим об'ємним штампуванням складних поковок 14

1.2 Особливості проектування переходів і реалізації технологій виробництва поковок плит 22

1.3 Профілювання заготовок осаджуванням випуклими рівчаковими вставками. 28

1.4 Фактори, що впливають на формозміну заготовок при профілюванні осаджуванням випуклим інструментом 37

1.5 Методи вивчення формозміни заготовок 42

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1 45

Розділ 2. ВИБІР НАПРЯМІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 47

2.1 Основні техніко-економічні показники у процесах гарячого об'ємного штампування і напрями їх підвищення 47

2.2 Постановочні досліди, розробка розрахункової схеми і способів профілювання заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками 49

2.3 Вибір методів теоретичних досліджень. Теоретичні основи скінчено-елементного аналізу в пакеті Deform 51

2.4 Загальна методика експериментальних досліджень процесу асиметричного осаджування циліндричних заготовок радіусними штамповими вставками Основи планування експерименту 60
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 2 65

Розділ 3. СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК АСИМЕТРИЧНИМ ОСАДЖУВАННЯМ РАДІУСНИМИ ШТАМПОВИМИ ВСТАВКАМИ 66
3.1 Напружено-деформований стан 66
3.2 Закономірності формозміни 87
3.3 Силові режими осаджування радіусними штамповими вставками 106
3.4 Встановлення залежностей показників формозміни від впливаючих факторів 112
3.5 Виявлення умов появи поздовжнього згину при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками 138
3.6 Виявлення впливу різних факторів на вислизання заготовки з області деформуючого інструменту 147
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 3 154

Розділ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВЧОГО ПРОФІЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК АСИМЕТРИЧНИМ ОСАДЖУВАННЯМ РАДІУСНИМИ ШТАМПОВИМИ ВСТАВКАМИ 158
4.1 Зміна показників формозміни заготовок 158
4.2 Статистична обробка експериментальної інформації 164
4.3 Аналіз схеми завантаження заготовки 169
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 4 190

Розділ 5. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ГАРЯЧОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ПОКОВОК ПЛИТ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ 192
5.1 Розробка класифікації поковок, для яких застосовується спосіб профілювання заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками 192
5.2 Силові режими і вплив збільшення асиметрії проникнення штампових вставок в торці заготовки на перекоси повзуна пресу 194
5.3 Порівняльний аналіз варіантів технології штампування поковки «Плита рухома» 200
5.4 Порівняльний аналіз технології штампування поковки «Супорт» 210
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 5 223
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 225
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 229

ВСТУП

Актуальність теми. Деталі плит різної конфігурації є досить поширеними елементами конструкцій у машинобудуванні. Це можуть бути як корпусні, так і важко навантажені деталі, до яких пред'являють спеціальні вимоги, що робить пріоритетним такий спосіб їх виготовлення, як гаряче об'ємне штампування (ГОШ). Виробництво поковок складнопрофільних плит ГОШ пов'язане з низкою труднощів: підвищений відхід металу в облой, високий тиск на контакті штампу і заготовки, інтенсивне зношування штампових гравюр, значні енергосилові витрати на штампування тощо.

Для зниження зазначених негативних явищ передбачені способи попереднього наближення початкової форми заготовки до конфігурації поковки (профілювання). Реалізація профілювання при використанні в якості основного штампувального устаткування кривошипних гарячештампувальних пресів (КГШП) ускладнена через постійність величини робочого ходу преса, а використання додаткового спеціалізованого устаткування (пароповітряних штампувальних молотів, кувальних вальців, станів поперечно-гвинтової або клинової прокатки та ін.) найчастіше економічно й організаційно не доцільне.

Найбільш успішним способом профілювання заготовок під поковки плит зарекомендувало себе осаджування випуклими (радіусними) штамповими вставками. Після такої операції напівфабрикат має симетричну форму, що обмежує номенклатуру поковок плит, які штампують на одному кривошипно-гарячештампувальному пресі. Для досягнення несиметричної форми профільованої заготовки, підвищення виходу придатного і розширення номенклатури продукції з можливістю штампування поковок складнопрофільних плит запропонований спосіб асимет-

ричного осаджування циліндричної заготовки радіусними штамповими вставками (бойками).

Однак, розробка практичних рекомендацій щодо використання асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками (АОРШВ) вимагає проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень для виявлення закономірностей впливу величини асиметрії (e), ступеня деформації при осаджуванні (ε_h), розмірів циліндричної заготовки (відношення висоти H_0 до діаметру D_0 заготовки), відношення радіуса (R) вставок до діаметру (D_0) заготовки на формозміну, напружено-деформований стан металу і енергосилові параметри штампування, що до теперішнього часу не вивчено. Крім того, перспективним напрямком є зниження напружень у штампових гравюрах при штампуванні з профільованої несиметричної заготовки, а також поліпшення умов заповнення їх віддалених порожнин зі зниженням відходів металу в облой.

З цієї точки зору, монографія, яка спрямована на вдосконалення технологій об'ємного штампування поковок сладнопрофільних плит на КГШП шляхом використання нового способу профілювання заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками, є актуальною.

Мета і завдання дослідження. Підвищення техніко-економічних показників, зниження енергосилових параметрів процесів багатоперехідного гарячого об'ємного штампування сладнопрофільних плит на кривошипних пресах з розширенням номенклатури штампованих виробів за рахунок розвитку способів попереднього профілювання заготовок асиметричним осаджуванням випуклими радіусними штамповими вставками.

У зв'язку з цим у роботі поставлені і вирішені такі основні завдання:

– встановити закономірності формозміни заготовок, які будуть покладені в основу математичних моделей процесу АОРШВ;

– провести теоретичний аналіз схеми навантаження та плину металу заготовки при АОРШВ і впливу асиметрії навантаження на перекіс повзуна пресу;

– виконати експериментальну перевірку адекватності розроблених математичних моделей з розрахунку макропоказників нерівномірності деформації при АОРШВ;

– провести аналіз напружено-деформованого стану (НДС) і закономірностей зміни силового режиму при АОРШВ циліндричних заготовок і на подальших операціях штампування поковок складнопрофільних плит;

– визначити напрямки подальшого формоутворення заготовок після АОРШВ, встановити межі застосовності даної профілюючою операції при штампуванні поковок складнопрофільних плит;

– удосконалити технології ГОШ типових поковок складнопрофільних плит на КГШП.

Об'єкт дослідження: технології гарячого об'ємного штампування складнопрофільних плит профілюванням заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками.

Предмет дослідження: основні закономірності формозміни, технологічні та енергосилові параметри деформування циліндричних заготовок АОРШВ у процесах багатоперехідного штампування складнопрофільних плит на КГШП.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтуються на фундаментальних положеннях теорії обробки металів тиском, теорії ковальсько-штампувального виробництва; аналіз НДС і силових режимів виконаний з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) і залучен-

ням теорії планування повного факторного експерименту (ПФЕ).

Експериментальні дослідження були виконані у лабораторних умовах на стандартному устаткуванні та включали методи фізичного й аналогового моделювання з використанням для обробки результатів вимірювань методів математичної статистики і регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше встановлені закономірності формозміни і зміни напружено-деформованого стану металу при профілюванні циліндричних заготовок асиметричним осаджуванням випуклим радіусним інструментом, що дозволило розробити математичні моделі для прогнозування нерівномірності деформації та оцінки напружено-деформованого стану у висотному, поздовжньому і поперечному напрямках з оцінкою ступеня наближення форми напівфабрикату до конфігурації поковки на даній профілюючій операції.

2. Уточнено величини ступенів обтискань при асиметричному осаджуванні випуклим радіусним інструментом при яких виникає поздовжній вигин циліндричної заготовки в залежності від таких параметрів, як геометричні розміри циліндричної заготовки, радіус випуклості інструменту і асиметрія при осаджуванні, що дозволило розмежувати напрямки технологічних розробок з проектування процесів штампування складнопрофільних плит і поковок із зігнутою віссю та встановити, що явище поздовжнього вигину характерно для заготовок із співвідношенням висоти до діаметру понад 1,5 при відносній асиметрії $e/D_0 \geq 0{,}25$.

3. Вперше встановлені величини критичних ступенів обтискань, при яких виникає вислизання заготовки з випуклого радіусного інструменту при асиметричному осаджуванні у напрямку, протилежному асиметрії навантаження,

що дозволило комплексно враховувати вплив факторів тертя, геометричних розмірів циліндричної заготовки, радіусу випуклості інструменту і величини асиметрії для забезпечення стабільності формозміни при профілюванні і запропонувати конструкторсько-технологічні рішення для виключення вислизання заготовки.

4. Уточнено закономірності зміни напружено-деформованого стану та плину металу в процесі багатоперехідного штампування поковок складнопрофільних плит з урахуванням умов штампування із заготовок, профільованих асиметричним осаджуванням радіусним інструментом, що дозволило знизити контактні напруження в гравюрі штампових рівчаків і мінімізувати силові режими штампування залежно від конфігурації профільованого напівфабрикату.

Практичну цінність монографії представляють її наступні основні результати:

1. Методики моделювання процесів багатоперехідного ГОШ складнопрофільних плит, які враховують накопичення показників інтенсивності напружень та інтенсивності деформації металу на різних ділянках поковки по переходах штампування.

2. Виявлені умови виникнення поздовжнього вигину заготовки та визначення областей розмежування методологічних розробок технологій штампування плит і поковок із зігнутою віссю.

3. Конструкція радуісних штампових вставок, що забезпечує фіксацію заготовки при асиметричному осаджуванні і запобігання її вислизанню зі штампу (патент №100486; UA).

4. Спосіб штампування поковок, що забезпечує економію металу і зниження енергосилових параметрів за рахунок отримання раціональної конфігурації напівфабрикату при профілюванні заготовок асиметричним осаджуван-

ням радіусними штамповими вставками (патент №85071; UA).

5. Практичні рекомендації по розташуванню заготовки у штамповому просторі на переході асиметричного осаджування для зменшення тиску на направляючі повзуна пресу при його перекосі.

Розділ 1
ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЙ БАГАТОПЕРЕХІДНОГО ШТАМПУВАННЯ ПОКОВОК ПЛИТ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ З ПІДГОТОВЧИМ ОСАДЖУВАННЯМ ЗАГОТОВОК ПРОФІЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

В теперішній час у прогресивному промисловому виробництві велика увага приділяється модернізації старих і розробці нових технологічних процесів з впровадженням енергоекономічних і металозберігаючих технологій. Не виключенням є і галузь ковальсько-штампувального виробництва, яка має великий потенціал для реалізації принципів підвищення якості і конкурентоспроможності продукції, що виробляється. Досить перспективним напрямом є високоефективна модернізація використовуваного устаткування й інструменту.

Великі фінансові проблеми через скорочення ринку збуту і відсутність стабільних замовлень на машинобудівну продукцію в нинішніх обставинах загальнонародного господарства України підвищують необхідність впровадження таких технологічних рішень, які дозволять зберегти рентабельність виробництва [1], що підтверджує необхідність виведення метало і ресурсозберігаючих операцій на передову вітчизняній промисловості.

Найвищою характеристикою технічної культури виробництва в цехах, як і основних техніко-економічних показників метало оброблювальних технологій, є кількість металу, що видаляється у відходи з облоєм і обріззю [2].

Поковки, які відносять до круглих або витягнутих у плані є найбільш поширеними виробами, що штампують. Поковки із зігнутою віссю, з відростками, пласкі поковки з наявністю перепадів (нерівномірностей) поперечного перерізу та ін., згідно з низкою класифікацій [3–6], штампу-

ють на кривошипних гарячештампувальних пресах. Але найчастіше поковки з наявністю перепадів поперечного перерізу і поковки типу плит, плит з відростками не визначені по класифікації з тієї причини, що вважаються мало технологічними для умов штампування на кривошипних гарячештампувальних пресах (КГШП). Так, наприклад, в класифікації Є. І. Семенова [7], яка використовується для призначення переходів при штампуванні на КГШП, поковки типу плит і плит з відростками не згадані, проте виробництво поковок цього типу на кривошипних пресах досить поширене. У класифікації [8], яку складеною із вербальним описом виду поковок, переважного типу формоутворення і рівчаків, що застосовуються при штампуванні на КГШП, відзначено, що поковки прямокутної або близької до неї форми раціонально виготовляти з застосуванням операції осаджування. У випадку, коли поковки плит з відростками штампують перпендикулярно осі поковки, раціонально проектувати штампи з елементами видавлювання.

Реалізація на практиці перспективних ресурсо- і енергозберігаючих технологій виробництва, які дозволяють досягти максимального наближення форми заготовки до конфігурації готового виробу, пов'язана з розв’язанням інженерних завдань, які базуються на розширення номенклатури штампованих поковок, до яких застосовані ці технології, розробці і вдосконаленні конструкцій деформуючого інструменту, вивченні енергосилових режимів деформації та закономірностей формозміни при профілюванні заготовки.

Серед проблем, які вимагають вдосконалення, – зниження відходів металу, заміна дорогого устаткування недорогим, альтернативним. Найбільш актуальними питаннями залишаються підвищення якості поковок, що отримуються гарячим штампуванням [9, 10].

1.1 Обґрунтування необхідності профілювання заготовок перед гарячим об'ємним штампуванням складних поковок

Початковим матеріалом під об'ємне штампування слугує прокат нормальної і підвищеної точності різного сортаменту. Штампування поковок з прокату підвищеної точності доцільне лише у разі багатосерійного виробництва в закритих штампах, за наявності дорогого і високоточного устаткування для різки заготовок [2, 11, 12].

У штампуванні застосування злитків у якості вихідної заготовки зустрічається досить зрідка, їх використовують при процесах кування на гідравлічних пресах. Для штампування вихідним матеріалом можуть служити блюмси, які у сучасному виробництві заміщують переважно сортовим прокатом квадратного поперечного перерізу. Але цей вид сортового прокату при виробництві поковок складної конфігурації вимагає введення підготовчих операцій.

При штампуванні поковок простої конфігурації використовують заготовки у вигляді прокату пруткового, круглого або квадратного поперечного перерізу, для штампування інших поковок такі заготовки не використовуються. Для штампування поковок складної конфігурації: плит, плит з відростками, поковок із зігнутою віссю, поковок з наявністю перепадів поперечного перерізу, слід максимально наблизити форму заготовки до конфігурації готового виробу. Це дозволить виключити появу дефектів, скоротити відходи металу, підвищити стійкість штампів. Це виконують введенням попередніх профілюючих операцій (для штампування на пресах) або за допомогою заготівельних переходів (для штампування на молотах), після яких поковку доводять до кінцевої форми у чистових рівчаках.

Профільовані заготовки найчастіше отримують широко поширеними методами [2, 13, 14]: застосуванням

прокату необхідного профілю; вальцюванням на кувальних вальцях; литтям фасонної заготовки; попереднім штампуванням на пароповітряних штампувальних молотах (ПШМ), горизонтально-кувальних машинах (ГКМ), на спеціалізованому обладнанні; попередньою ковкою заготовки необхідної форми; у рівчаках штампів.

Поковки деталей машин, які зазнають мінімальних навантажень, виготовляють з литих заготовок. Перші дослідження з отримання фасонних литих заготовок проводили вітчизняні вчені М. І. Корнєєв, М. І. Ринін та ін. Найвдалішим прикладом штампування фасонно-литих заготовок можна назвати процес AutoForge [15], розроблений корпорацією Rockwell (США), який є автоматизованим і розрахований на виготовлення до 500 поковок на годину. Цей процес можливий для застосування на гідравлічному пресі і має низку істотних недоліків, таких як: застосовується тільки для штампування малогабаритних деталей і вимагає складного електромеханічного устаткування.

Процеси штампування рідких металів застосовуються досить часто як у нас, так і за кордоном (США, Японія, Німеччина та ін.) [16-20]. При чималому переліку переваг, цей процес має немало недоліків, таких як: низька продуктивність в порівнянні з гарячим об'ємним штампуванням, низька стійкість штампів через появи розжарювальних тріщин, заготовка нагріта нерівномірно при охолодженні металу і так далі.

Були знайдені і запропоновані технологічні рішення, які базувались на застосуванні спеціалізованих відлитих злитках для кування крупних поковок [21]. Вдосконалення форми злитків було потрібне для розробки процесів з максимальним уковом [21, 22].

У роботі [22] Є. І. Семенов описує приклад заміни процесу кування колінчастого валу процесом штампування на гідравлічному пресі в трьохсекційному штампі, де про-

цес кування використовували тільки для отримання напівфабрикату. Така заміна обладнання і використання штампу дозволила знизити масу початкового злитка з 9 т до 2,5 т.

Але навіть така перевага, як істотна економія металу, в цих технологіях не буде вагомим фактором для введення такого процесу у виробництво, оскільки для цього знадобиться використання штампів складної конфігурації, наявність і утримання додаткових інструментів, устаткування і обслуговуючого персоналу, що буде виправдано лише у разі штампування матеріалів, що дорого коштують.

Значна увага приділяється процесам виробництва поковок з прокатаного сортаменту [2, 14, 22–24]. Заготівельні операції в цьому випадку виключають, що дозволяє скоротити увесь ланцюжок виробництва. При штампуванні поковок складної конфігурації, плоских поковок з наявністю нерівномірності поперечного перерізу та ін., застосовують прокатаний пруток з періодично повторюваним профілем.

С. М. Добровлянський у своїй дисертаційній роботі [24] проаналізував різноманітні способи поперечної прокатки (рис. 1.1) і зробив висновки, що такі способи не пристосовані до різносерійного виробництва, вимагають більшого парку енергоємного обладнання, витрат на обслуговуючий персонал, великих виробничих площ.

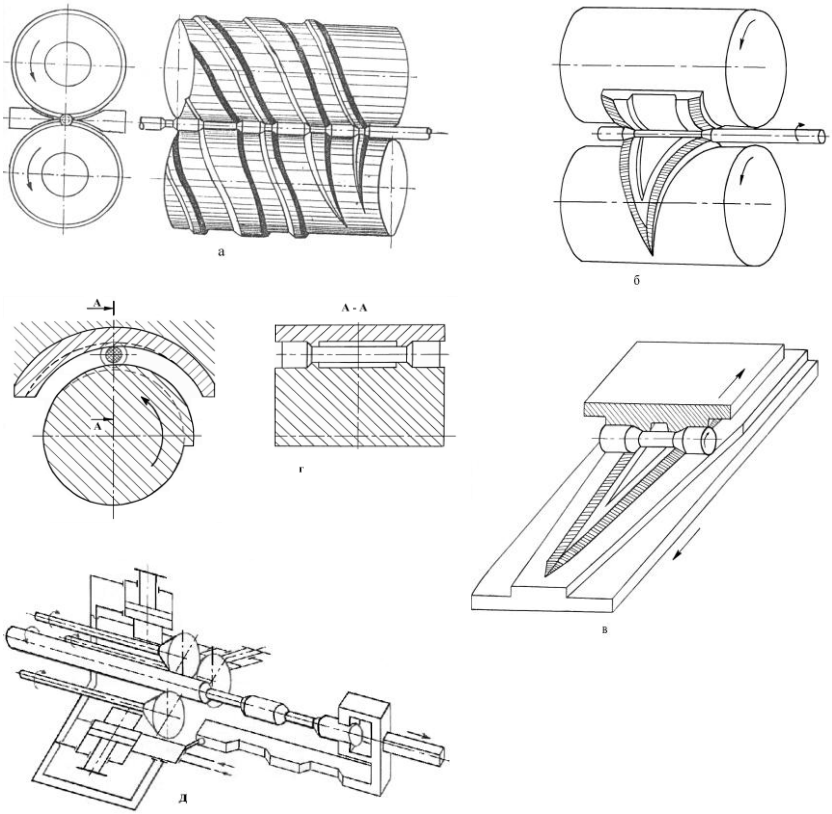
До традиційних способів профілювання відносять отримання фасонної заготовки за допомогою вальцювання у кувальних вальцях (рис. 1.2), які розміщують поряд з штамповим устаткуванням для зручності виконання усього процесу за один нагрів заготовки [2, 14, 23, 25-27]. До головних недоліків процесів вальцювання можна віднести обмеження заготовок за довжиною, ускладненість переналаштування, зношування штампів, орієнтованість лише на крупну серійність виробництва.

Величини "критичних програм", при яких експлуатація кувальних вальців є нерентабельною, у роботі [28] ви-

значені залежно від маси, габаритів і конфігурації поковки, виду завершального штампувального устаткування. Спосіб подовжньо-копіювальної прокатки (рис. 1.3), який був розроблений в Київському політехнічному інституті, призначений для виготовлення заготовок періодичного профілю. Результати досліджень і досягнення в цьому напрямі дали можливість написати і захистити дисертаційні роботи [24, 29–31] під керівництвом О. О. Низкова і Т. М. Голубєва. Основа способу полягає в отриманні продукції зі змінним по висоті профілем (рис. 1.3) за рахунок прямого вертикального зворотно-поступального руху валка у процесі подовжньої прокатки.

Поковки зі значною нерівномірністю поперечного перерізу у напрямі довжини, які штампують невеликими партіями, раціонально виготовляти штампуванням із використанням пароповітряних штампувальних молотів (ПШМ), штампи яких містять заготовчі рівчаки. Наявність заготовчих рівчаків (підкатних, протяжних, згинально-формувальних) потребує утримання висококваліфікованих робітників, готових працювати в умовах завищеного шуму і вібрацій. При цьому, профілювання заготовок у штампах не зменшує витрати металу через великі штампові ухили і припуски [2, 20, 22, 24, 32–34].

Для підготовчих операцій, у разі штампування на кривошипних гарячештампувальних пресах (КГШП), у штампах розміщують не більше трьох рівчаків, що дозволяє підвищити продуктивність і спростити конструкцію штампів. Для того, щоб виконати профілювання на КГШП подібно до профілювання на ПШМ, знадобиться декілька підкатних або протяжних рівчаків, які повинні розташовуватися послідовно через сталість ходу кривошипного механізму.



а – поперечно-гвинтова прокатка; б – поперечно-клинова прокатка у валках; в – поперечно-клинова прокатка у плитах; г – валково-сегментна прокатка; д – прокатка у тривалкових станах конструкції ВНДІМетМашу

Рисунок 1.1 – Способи отримання профільованих заготовок поперечною прокаткою (по С. М. Добровлянському [24])

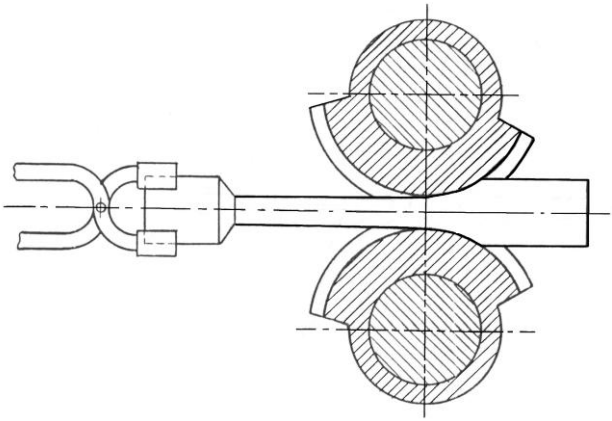


Рисунок 1.2 – Вальцювання заготовки [24]

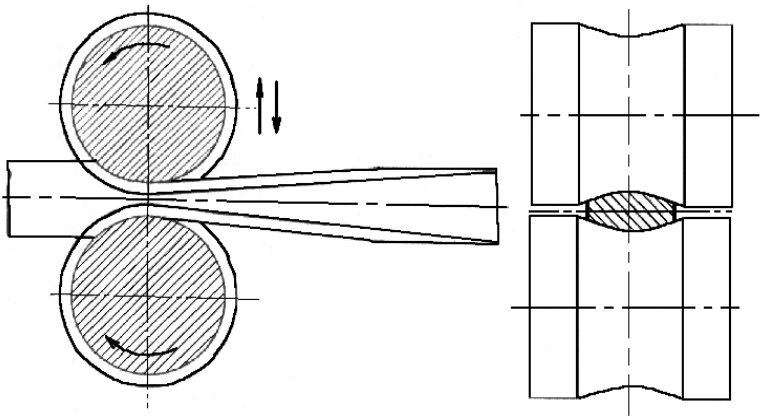


Рисунок 1.3 – Поздовжньо-копіювальна прокатка заготовок [24]

Саме з цієї причини для виготовлення профільованої заготовки використовують спеціальні методи отримання фасонних заготовок, а не виконують підкатування і протя-

гування на КГШП [2]. Застосування додаткового устаткування може спричинити невиправдані витрати, що робить його використання недоцільним і призводить до відмови від підготовчих (профілюючих) операцій. Це позначиться на зниженні стійкості штампів, збільшенні витрати металу, що йде у відхід, і приводить до підвищення вартості готових поковок.

Проте, за результатами робіт багатьох дослідників [32, 35, 36] можна стверджувати, що через можливості штампування точніших поковок і занижених вимог до кваліфікації робочого персоналу, прийнятніше буде використання саме КГШП, а не ПШМ.

Заготовки різної конфігурації і різними механічними властивостями можна отримувати попереднім формуванням з порошкових матеріалів з подальшим закритим штампуванням. Приклад цього способу наведений у роботах [37–39].

Профілювання заготовок попереду штампування полягає у наближенні їх форми до конфігурації штампованих виробів і може бути здійснено різними способами, які залежать від серійності виробництва, матеріалу і складності деталі, технологічних можливостей устаткування [2], як сказано вище. Проте, жоден з представлених вище способів не сприяє підвищенню продуктивності і ефективності самого штампування.

При різних способах отримання поковок плит куванням [20] кінцевою операцією є поперечне осаджування (протягування) в плоских бойках. Такі способи виробництва поковок плит куванням застосовуються для крупних поковок із одиничним характером виробництва, а з серійним характером виробництва їх доцільно штампувати на КГШП.

Застосування випуклого інструменту на етапі профілювання перед подальшим об'ємним штампуванням на

КГШП розроблене і досліджене автором в роботі [40]. На рис. 1.4 представлена схема осаджування циліндричної заготовки випуклими плитами (через симетричність представлена верхня половина).

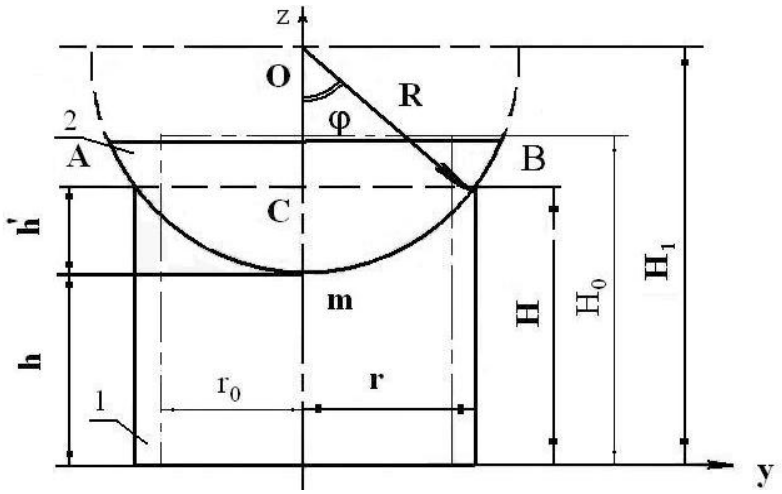


Рисунок 1.4 – Схема осаджування циліндричної заготовки (1) випуклими плитами (2) [40]

В даному випадку застосування випуклих поздовжніх плит на думку автора, збільшує вихід придатного за рахунок зниження величини "язиків" на 2–3 %, дозволить зменшити навантаження на гравюри штампувальних рівчаків, підвищити довговічність деталей і вузлів штампувального устаткування, досягти істотного енергоресурсозберігаючого ефекту. Останній забезпечується за рахунок зниження енергосилових витрат на штампування, зменшення витрат енергоносія при нагріві меншого об'єму металу, скорочення відходів металу з облоєм, підвищення стійкості і зменшення кількості переточувань дорогого штампового інструменту.

Проведений вище літературний аналіз показує відсутність профілюючих операцій, які можна було б раціонально застосовувати в технологіях об'ємного штампування на КГШП при виготовленні поковок плит складного профілю.

Через те, що більшість ковальських цехів укомплектована КГШП, потрібна розробка і вдосконалення таких процесів штампування, які дозволять підвищити ресурсо- і енергозбереження з використанням наявного устаткування. Закупівля і встановлення додаткового устаткування (станів для поперечно-клинової і подовжньо-копіювальної прокатки, кувальних вальців і тому подібне) буде вельми затратними і часто неможливими з технічної точки зору. Через цю причину вітчизняна промисловість потребує розробки нових способів профілювання заготовок перед подальшим штампуванням на КГШП, розробки методик прогнозування формозміни, а також застосування економічного штампового інструменту для отримання фасонних заготовок під штампування.

1.2 Особливості проектування переходів і реалізації технологій виробництва поковок плит

Різними авторами [3–9, 41–45] розроблені класифікації, в яких усі відштамповані поковки діляться на групи за різними ознаками: положенню лінії роз'єму штампів, переважаючому виду деформації у фінішному рівчаку, початковому матеріалу, використовуваному устаткуванню, ознакам форми, способам і кількості переходів штампування і тому подібне. У більшості випадків відштамповані поковки розподілені на групи і підгрупи, в яких значне місце виділене для поковок тіл обертання, як з буртами і фланцями, так і без них, поковок подовжених у плані, поковок типу плит, які мають витягнуту конфігурацію, тонке

полотно та у яких наявні відростки. Подібна формалізація дає можливість об'єднати поковки у технологічні групи для виконання автоматизованого проектування технологічних процесів [46], визначати завантаження устаткування і проводити розрахунок техніко-економічних показників укрупнено [47].

Відкрите об'ємне штампування можна розділити на ті процеси, що проходять у декілька стадій [2, 24, 34, 48–50]. До цих стадій відносять відкриту деформацію, стадію, коли метал заповнює більшу частину рівчака, стадію, в якій відбувається завершальне заповнення металом усіх кутів, перегинів і отворів у рівчаку і відтиснення зайвого металу в облойну канавку. Залежно від конфігурації заготовки до стадії відкритої деформації можна віднести видавлювання, вільне осаджування, відкриту прошивку. Кожна з представлених стадій може складатися з декількох фаз. Формозміна визначатиметься виходячи з форм і розмірів після деформацій у певних стадіях і фазах в процесі штампування.

У разі відкритого штампування, у мить, коли стінки штампу торкаються металу, він виштовхується у рівчак і облойну канавку. В кінці процесу штампування розчин облойної канавки буде мінімальний і дорівнюватиме товщині задирки $h_з$. Діапазон значень відношення висоти осередку деформації $h_{оч}$ до товщини задирки $h_з$, за різними авторами, вказується майже як рівний та визначається в таких інтервалах: $h_{оч}/h_з$ = 2–5 – за М. В. Сторожевим [48]; $h_{оч}/h_з \approx$ 2,0 – за Є. І. Семеновим [22]; $h_{оч}/h_з$ = 2,5-3,0 – за А. В. Ребельским [50]. А. В. Ребельский рекомендує приймати у розрахунках середнього значення $h_{оч}/h_з \approx e = 2{,}72$, це надає незначного впливу на силу штампування і формозміни.

Методики визначення напружено-деформованого стану (НДС), тиску в канавці задирки і розрахунку сили відкритого об'ємного штампування поковок поздовжніх у

плані з прямокутним перерізом наведені у джерелі [48]. У ньому вказується, що при оцінці поведінки металу в області містка канавки задирки, переважним видом деформації буде осаджування, при якому значення дотичної напруги на контактній поверхні буде максимальним.

Метал, який знаходитиметься у магазині під час процесу штампування поковок типу плит, не заважатиме плину металу в зоні містка, у такому разі для деформації задирки сила $p_з$ розраховується за формулою [48]:

$$p_з = \sigma_s^* \left(1 + \frac{1}{2} \frac{b}{h_з} \right), \qquad (1.1)$$

де $\sigma_s^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s$, тут σ_s – опір деформації матеріалу за даних умов;

b – ширина канавки задирки (облою).

При штампуванні поковок подовженої форми, деформацію можна вважати плоскою, якщо у площині роз'єму поковка буде мати форму прямокутника. Тоді питоме зусилля штампування можна записати [48]:

$$p = \sigma_s^* \left[1 + \frac{b}{h_з} + \left(0{,}25 - 0{,}078 \ln \frac{h_{оч}}{h_з} \right) \frac{a}{h_з} \right] \approx \sigma_s^* \left(1 + \frac{b}{h_з} + 0{,}15 \frac{a}{h_з} \right), \quad (1.2)$$

де a – ширина поковки.

Розрахункові формули і монограми для визначення сили штампування поковок квадратних в плані наведені у джерелі [50]. Використання заготовок з необхідними габаритними розмірами [51] дозволять підвищити доцільність процесу штампування на основі видавлювання.

Представлений вище аналіз стосується лише процесів одноручкового штампування. Велика кількість факторів, які впливають на технологічний процес гарячого об'ємного штампування (ГОШ), не можуть дозволити формалізувати повною мірою процес проектування багатоперехідних процесів. Для цього, на сьогодні, на основі всіх проведених аналізів технологічних процесів, ведуться спроби створення єдиної системи понять, концепцій визначень, дефініцій і тверджень, ґрунтованих на суті багатоперехідних процесів [52, 53]. Використання прикладних алгоритмів з критеріями оптимізації або шуканими цільовими функціями робить можливим рішення завдань з оптимізації енергоресурсів, що витрачаються, матеріалів, устаткування та т. і. [54]. Але скорочення витрат металу буде обумовлено збільшенням кількості переходів у процесі штампування, що спричинить збільшення витрат на інструмент і штампове устаткування.

Набирають велику популярність і все більше застосовуються на практиці методики проектування технологічних процесів гарячого об'ємного штампування з використанням комп'ютерної техніки і програмних пакетів, які основані на методах скінчено-елементного аналізу і моделювання [55–60]. Однак, попередні рівчаки проектують по застарілих методах, які були актуальні у минулому столітті, а гравюри штампів доводять до кінцевих конструктивних розмірів тільки після ретельних апробацій складених математичних моделей з прогнозуванням характеру плину металу, запобіганням появи дефектів і, обов'язково, після дослідного штампування. Для попередніх рівчаків розміри призначаються таким чином: радіуси закруглення, розраховані для чистового рівчака, збільшуються в 2–3 рази; на 5–6 см збільшується висота поковки для забезпечення переважно деформації осаджування на фінішному переході [2, 49]. Можна досягти поліпшення показників якості

(у більшості геометричних), якщо поєднати рішення завдань оптимізації з моделюванням технологічних процесів у програмах для скінчено-елементного моделювання [61, 62]. Це дозволить відкоригувати форму попередніх і фінішних рівчаків.

Поковки подовжені у плані (прямокутні та ін.), залежно від конфігурації, можна штампувати плазом або в торець. До таких поковок можна віднести супорти, турбінні лопатки, різні плити (плити з відростками), клини і тому подібне.

Подовжені поковки складної конфігурації виготовляють видавлюванням заготовки через матрицю, прикладаючи деформуюче зусилля до торця заготовки, цей процес можливий і для важкодеформованих сталей [63–65]. Проте, такий процес досить енергоємний, і для виключення витікання металу в проміжок між напівматрицями потрібно застосування кінематично складного штампувального устаткування. Так як у процесі видавлювання деформуючий інструмент працює у несприятливих умовах, знадобиться використання дорогих зносостійких інструментальних марок сталей.

На Волзькому автомобільному заводі 13 % від загальної кількості штампованих поковок займають поковки з тонким полотном, які виготовляються одноштучним штампуванням плазом, і цей відсоток збільшується до 31 % при врахуванні до уваги варіантів багатоштучного штампування (без урахування вальцьованих заготовок) [66, 67]. Значна частина технологічних процесів виконується за декілька переходів, причому попередні рівчаки займають обсяг на 15 % більше, ніж чистові рівчаки. Треба виділити важливість виконання витягування напівфабрикату для повного заповнення гравюр у технологіях багатоштучного штампування.

Використання методу отримання профільованої штанги, яку ріжуть на мірні заготовки, дозволяє підвищити в 3–7 разів коефіцієнт використання металу при масовому виробництві поковок турбінних лопаток [68]. Для виробництва профільованої штанги використовують технологію гарячого гідропресування, це дозволяє зменшити відходи металу при подальшій обробці за рахунок скорочення переходів при штампуванні і зменшення припусків на механічну обробку, отримати однорідну дрібнозернисту структуру металу.

Значну популярність при штампуванні поковок сільськогосподарського машинобудування, компресорних і турбінних лопаток отримав процес штампування з попереднім профілюванням заготовки у кувальних вальцях [25–29, 68–73]. Застосування цієї операції профілювання дозволяє отримати необхідну нерівномірність металу за перерізом з подовженням заготовки, тобто необхідний перерозподіл металу в заготовці. Але застосування кувальних вальців потребує залучати додаткові виробничі площі, штампувальні комплекси і обумовлює необхідність їх обслуговування, що буде виправдано лише при масовому виробництві, де коефіцієнт витягування буде у межах 1,3–1,5.

Попереднє профілювання заготовок здійснюють при штампуванні кольорових металів де, в якості профілюючих операцій застосовують кування фасонної заготовки, профілювання у попередньому рівчаку і вальцювання [70, 73]. Дуже часто при складанні креслень поковок, які штампують з кольорових металів, використовують ГОСТ 7505 "Поковки стальные штампованные", що має небезпеку нетехнологічних рішень. Більш відповідним є використання рекомендацій для призначення припусків і допусків, описаних у довідковій літературі [72], особливо при конструюванні штампованих виробів із алюмінієвих сплавів реко-

мендується використовувати ОСТ 1.41187-78, ОСТ 1.41188-78 і ОСТ 1.92082-80. При штампуванні поковок з кольорових металів велике значення мають їх технологічні і фізичні властивості, відношення геометричних розмірів (ширини, товщини і площі полотна).

Проведений аналіз показує, що у процесі виробництва подовжених поковок з прямокутним перерізом, поковок типу "Плита" і тому подібне, доцільним є використання підготовчих операцій для отримання фасонних заготовок у рівчаках пресового устаткування, використання якого є більш переважним, ніж кувальних вальців, що вимагає більше поглибленого аналізу в даному напрямі.

1.3 Профілювання заготовок осаджуванням випуклими рівчаковими вставками

Одними із найпоширеніших і найраціональніших способів формозміни металу у заданому напрямі в процесах обробки металів тиском (ОМТ) є обтиснення інструментом різної конфігурації. Навіть у технологіях кування з одиничною серійністю виробництва вельми поширеними є операції осаджування випуклими плитами. Дослідники [74] вказують на нерівномірний розподіл деформацій і формозміну за об'ємом поковок при осаджуванні опуклими сферичними плитами, представленими на рис. 1.5.

Процес осаджування випуклими сферичними плитами (рис. 1.6) дозволяє проробити осьову зону заготовки, що підвищує якість закриття дефектів в осьовій зоні. При осаджуванні на випуклих плитах горизонтальні проекції нормального тиску і сили тертя віднімаються (рис. 1.7). Таким чином, при осаджуванні на випуклих плитах гальмівна дія контактних сил зменшується, порівняно з осаджуванням на плоских плитах [74].

Осаджування сферичними випуклими плитами призводить виключно до висотної нерівномірності деформації, тобто при торцевому осаджуванні початкова циліндрична заготовка перетворюється на тіло обертання з профільованою боковою поверхнею. Подовжні і поперечні розміри деформованої заготовки стають ідентичними, тобто витягування заготовки відсутнє, і застосування вищезгаданих операцій для профілювання заготовок під поковки з витягнутою віссю є виключеним.

Треба відзначити, що операція протягування заготовок, що зустрічається у ковальському виробництві, є сукупністю послідовно виконаних операцій осаджування, що чергуються з подачею у подовжньому напрямі. Застосування радіусних, комбінованих і вирізних бойків при протягуванні широко використовується [74]. Проте, невірно підібрані режими обтискувань і кантівок при протягуванні приводять до утворення невиправного дефекту типу "Кувальний хрест" [74, 75]. Операції протягування в практиці штампування реалізуються у протягувальних рівчаках штампувальних молотів [2, 22–24].

Пресові протягувальні (протяжні) рівчаки поширення не отримали [76], зважаючи на жорсткість ходу кривошипного механізму і необхідність послідовного встановлення декількох протяжних або підкатних рівчаків, що займають значну частину ширини штампового простору.

Операції протягування плоскими плитами (бойками) супроводжуються утворенням "язиків" (рис. 1.8), що видаляються з технологічною обріззю, величина якої може досягати 5–20 % від маси заготовки [21, 74, 77–79].

"Язики" утворюються в результаті нерівномірності деформації периферійних і середніх шарів заготовки. Отже, однією з основних цілей раціоналізації технології кування і штампування з наявністю протяжних операцій є

скорочення відходів металу, що може бути досягнуто низкою різноманітних способів.

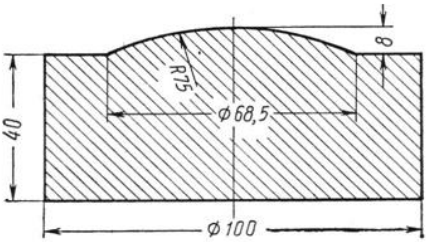
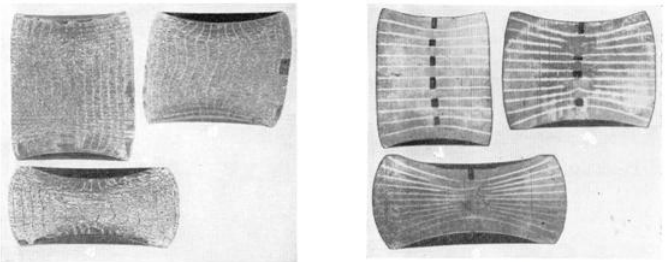


Рисунок 1.5 – Ескіз випуклих сферичних плит (бойків)



а б

а – деформована координатна сітка;
б – заковування штучних внутрішніх дефектів

Рисунок 1.6 – Зразки, осаджені випуклими сферичними плитами [74]

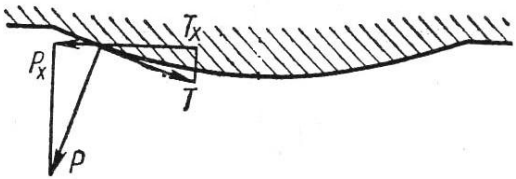


Рисунок 1.7 – Схеми сил при осаджуванні на увігнутих (а) і випуклих (б) плитах [74]

Один з таких способів включає формування поглиблення на торці протягуваної заготовки, що радіально обтискається, і завершальне протягування у поздовжньому напрямі [80]. Вказаній технології передували інші подібні способи отримання поковок плит, спрямовані на зменшення кінцевих відходів [81–83]. Ці технологічні рішення достатньо трудомісткі і вимагають наявності набору змінного інструменту для отримання поглиблення, а також, стосовно до кування, вимагають проведення додаткових нагрівів перед формозміною.

Виключити появу торцевої сферичності можливо шляхом формування напівфабрикату з надлишком металу по периферійних ділянках [84]. Подальше протягування заготовки плоскими бойками вирівнює горизонтальні площини, проте отримання широких плит таким чином є важким. Також відомий спосіб формування торцевої вігнутості напівфабрикату шляхом відтяжки кутів плоскої заготовки [85], що вирівнює плин металу при подальшому протягуванні.

Понизити відходи металу можна не формуючи на передуючих операціях вігнутість у місці інтенсивнішого плину металу, а використовуючи бойки спеціальної форми [86], що гальмують плин металу в середній частині заготовки при протягуванні. При куванні за цим способом випинання торця запобігається через більшу площу контакту інструменту із заготовкою в осьовій зоні, чим в периферійній частині, де, у результаті, метал тече більш інтенсивно.

Відомий спосіб осаджування заготовок верхнім бойком у вигляді еліптичного параболоїда (рис. 1.9), що, на думку авторів [87], дозволяє збільшити продуктивність і понизити зусилля деформації.

Використання такого бойка виключає утворення жорсткої зони під ним і підвищує рівномірність розподілу

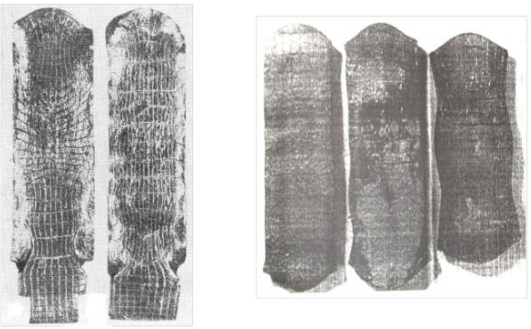
деформацій при подальшій правці плоским бойком. Для тієї ж мети можуть бути використані сферичні або конічні плити, осаджування якими широко використовується для теоретичних досліджень деформаційних і трибологічних процесів в ОМТ [88, 89]. При цьому слід зазначити цілу низку ускладнень, пов'язаних із прогнозуванням формозміни заготовок, що осаджуються вищезгаданими способами.

Отримання поковок широких плит можливе за технологією, що включає протягування в V-образних бойках з подальшим розпрямленням напівфабрикату плоскими плитами [90–93]. Верхній бойок має опуклу, а нижній увігнуту форму. Слід зазначити, що отримання у такий спосіб профільованих напівфабрикатів малої маси з тонким полотном супроводжуватиметься інтенсивним підстужуванням металу, що утруднить подальше штампування поковок у фінішних рівчаках.

Доцільність використання осаджування випуклими подовжніми бойками циліндричних заготовок в якості профілюючої операції у процесі виробництва поковок типу плит вказується в роботах [94, 96].

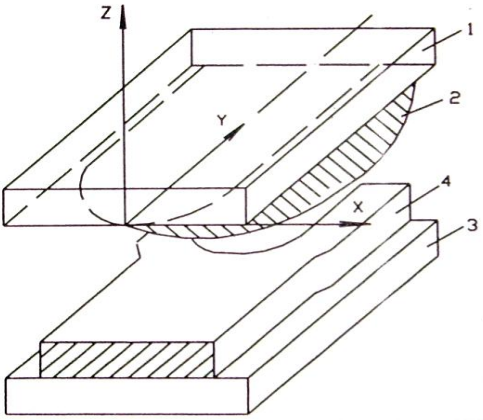
Найчастіше проводять осаджування ковальської заготовки верхнім випуклим бойком на нижній плиті з отвором (рис. 1.10). Комбіновані методи виготовлення таких поковок вимагають неодноразового видалення відходів у процесі кування (див. рис. 1.10). В даному випадку осаджування випуклими бойками слугує одним з методів зменшення відходів від подовжньої нерівномірності деформації волокон, оскільки застосування випуклих плит збільшує вихід придатного за рахунок зниження кінцевих обрубків не менше ніж на 3 % [94, 95], що особливо актуально при куванні крупних поковок. При осаджуванні випуклим бойком створюється увігнута конфігурація бічної поверхні блоку, яка вирівнюється при наступному протягуванні

внаслідок нерівномірності подовжньої деформації. Як відзначають автори [94], недоліком використання цього способу при куванні є необхідність виготовляти випуклі бойки, що раціонально лише при серійному характері виробництва.



а б

Рисунок 1.8 – «Язики» при протягуванні заготовок [74]



1, 3 – верхня і нижня плоскі плити; 2 – еліпсоїдний бойок; 4 – заготовка

Рисунок 1.9 – Кування штаби еліпсоїдним бойком [87]

Отже, застосування способу для профілювання заготовок при об'ємному штампуванні є більш раціональним.

Формозміна при одиничному пережимі заготовки випуклими довгастими або "круглими" (рис. 1.11) бойками з дослідженням витягування і нерівномірності розширення було детально розглянуто у роботі [94].

При цьому послідовне поперечне осаджування (протягування) заготовок випуклими подовжніми бойками істотно збільшує подовжнє витягування заготовок, чому сприяє розподіл сил (рис. 1.12) при куванні. Максимальне розширення відповідає розширенню, яке отримала б ця заготовка при прокатці валками такого ж радіусу. Проведені дослідження виявили закономірності зниження величини розширення при збільшенні ступеню деформації обтискування і збільшення розширення при зростанні відношення радіусу бойків до ширини заготовки.

Осаджування круглими бойками відрізняється відсутністю діжки по висоті заготовки і появою западини на гранях у заготовок з відношенням ширини до радіусу бойка більше 1,5. Для заготовок, у яких це відношення менше ніж 1,5, відбувається утворення діжки і розширення росте більш інтенсивно. Ці особливості можуть бути використані для отримання профільованих напівфабрикатів під об'ємне штампування поковок відповідної номенклатури.

Обтискування випуклими подовжніми бойками за схемою протягування по всій довжині і при протягуванні з кантовками (рис. 1.13) сприяє підвищенню уковки заготовки за меншу кількість переходів, покращує проробку приконтактних зон і робить більш жорсткою схему деформацій внутрішніх шарів за рахунок підпираючої дії увігнутих бічних поверхонь заготовки [20, 77, 78, 94–96].

Використання стандартних схем осаджування із застосуванням плоских і рельєфних бойків не дають можливості максимального контролю над розвитком зсувних де-

формацій і макропоказниками у осередку деформації. Це буде можливо тільки при використанні такої форми деформуючого інструменту, яка поєднуватиме в собі границі поверхні контакту із заготовкою: випуклі, увігнуті та ін. ділянки, тобто зміни граничних умов.

Застосування інструменту з різною формою поверхні в площині контакту із заготовкою розширюють діапазон можливостей контролю над макропоказниками пластичного плину металу і напрямом деформацій [97]. Осаджування заготовки інструментом з випуклою пружною поверхнею (рис. 1.14) дозволяє створити оптимальний технологічний процес кування із сприятливою картиною напружено-деформованого стану в заготовці.

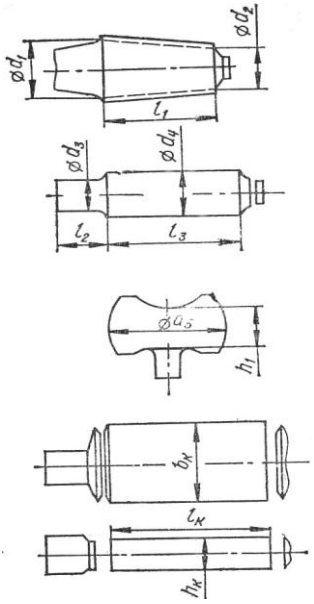


Рисунок 1.10 – Переходи при куванні плит з осаджуванням заготовки випуклим бойком [78]

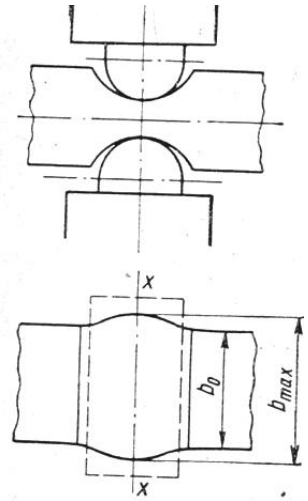


Рисунок 1.11 – Одиничне обтискування штаби випуклими подовжніми ("круглими") бойками [94]

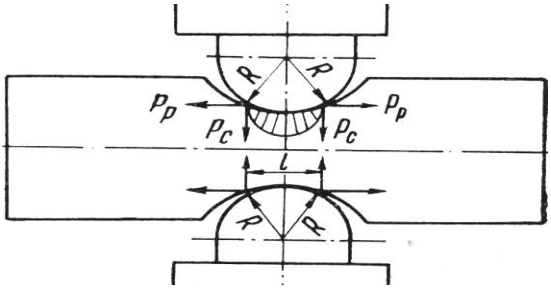


Рисунок 1.12 – Схема розподілу сил при обтискуванні штаби випуклими подовжніми бойками [94]

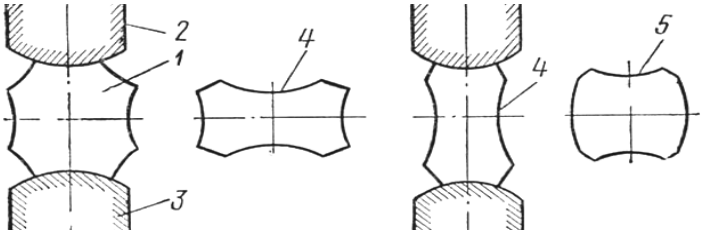


Рисунок 1.13 – Поперечні обтискування заготовки при протягуванні бойками з випуклою робочою поверхнею [20, 78]

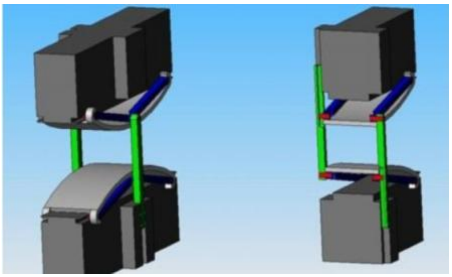


Рисунок 1.14 – Інструмент з пружними елементами випуклої робочої поверхні [95]

Таким чином, використання інструменту з випуклим профілем вставок для попереднього профілювання заготовки перед подальшим об'ємним штампуванням дозволяє створити сприятливу картину НДС і забезпечити максимальне заповнення гравюри рівчака на кінцевому етапі штампування при виробництві поковок прямокутних в плані.

Відсутність досліджень в області формозміни заготовок при торцевому осаджуванні випуклими подовжніми бойками викликає утруднення при необхідних технологічних переходів штампування і стримує розвиток способу. Не повними є також відомості про вплив величини радіусу випуклих бойків на формозміну заготовок. Відсутні дослідження зміни поведінки макропоказників формозміни і НДС у процесі осаджування інструментом з випуклим профілем вставок з асиметрією навантаження, тобто неспівпадання осі заготовки і вертикальної осі осаджуваних бойків.

1.4 Фактори, що впливають на формозміну заготовок при профілюванні осаджуванням випуклим інструментом

В процесі деформації заготовки в штампах відбувається зміна її форми у подовжньому і поперечному напрямі, а порівняння кінцевих розмірів заготовки з початковими показує величину кінцевих деформацій. Частина металу, яка не буде обмежена формою інструменту, тектиме нерівномірно і в різних напрямах. В даному випадку оцінка нерівномірності деформації за величиною кінцевої деформації також є зручною.

Не слід розглядати нерівномірність деформації або відхилення від циліндричної форми заготовки як негативне явище.

В процесі осаджування випуклими радіусними бойками [40] спостерігається витягування заготовки в напряму, перпендикулярному горизонтальній осі інструменту, і яскраво виражене діжкоутворення (бочкоутворення) різної форми. Її конфігурація залежатиме від відношення початкових геометричних розмірів заготовки (висоти (H_0) до діаметру (D_0)) і відношення радіусу випуклості R осаджувальних ,jqrsd до початкового діаметру заготовки (D_0). Залежно від відношення початкових розмірів заготовки (H_0/D_0) бічний профіль матиме вигляд або одинарної, або подвійної діжки (бочки). Окрім цього, осаджування радіусними бойками супроводжуватиметься нерівномірністю деформації по висоті (рис. 1.15).

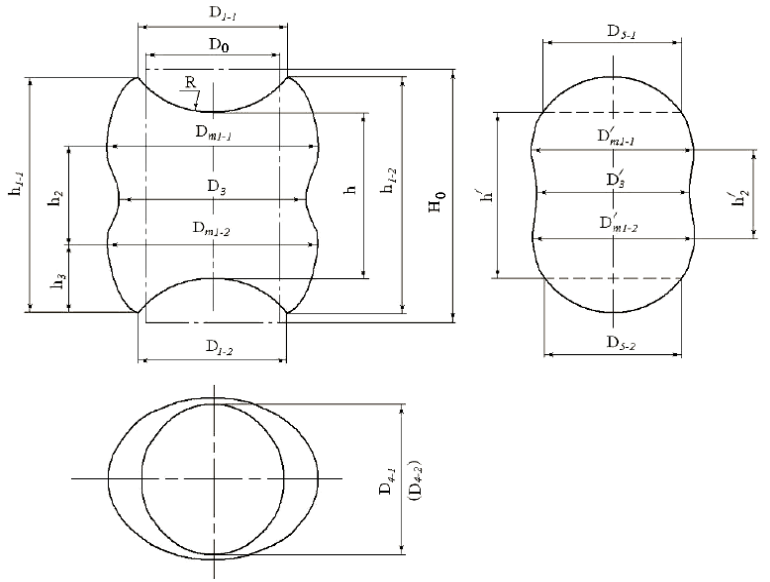


Рисунок 1.15 – Схема осаджування випуклими радіусними бойками [98]

В процесі осаджування і виникнення діжкоподібності у напівфабрикаті з'являються зони утрудненої деформації

[2, 78]. Виникнення таких зон призводить до кращої проробки осьової зони заготовки, заварювання внутрішніх дефектів і роздробленню зеренної структури металу. При використанні осаджування в якості попереднього профілювання перед подальшим штампуванням поковок плит або супортів наявність діжкоутворення сприятиме кращому заповненню гравюри кінцевого штампу.

Основну увагу при дослідженнях концентрують на прогнозуванні нерівномірності деформацій або формозміни, які відіграють велику роль при наближенні форми заготовки до конфігурації поковки на етапі процесів профілювання. Основні фактори за Л. Н. Соколовим [78], які впливають на нерівномірність деформації, це співвідношення початкових розмірів заготовки H_0/D_0, ступінь деформації, температура деформації, коефіцієнт тертя та ін. Проте, при осаджуванні випуклим інструментом одним із факторів, що впливає на формозміну, буде форма випуклого інструменту і відношення висоти випуклості інструменту до початкового діаметру заготовки. Так автори [98, 99] приводять графічні залежності формозміни від показника форми (кута) деформувального інструменту при осаджуванні випуклими радіусними бойками (рис.1.16). Нерівномірність деформації зростає із збільшенням обтискування, при цьому зменшення величини R/D призводить до значного зростання висотної нерівномірності деформації. У поперечному напрямі найбільш інтенсивно розвивається деформація за параметром D_3/D'_3, яка покладена в основу застосування операції як профілюючої при виробництві поковок типу плит.

Осаджування опуклими конічними бойками [99], при певних характеристиках їх профілю і умовах контактного тертя, призводить до зниження нерівномірності деформації заготовки, що використовується у відомих методах визна-

чення коефіцієнта контактного тертя при виборі ефективного технологічного мастила [100].

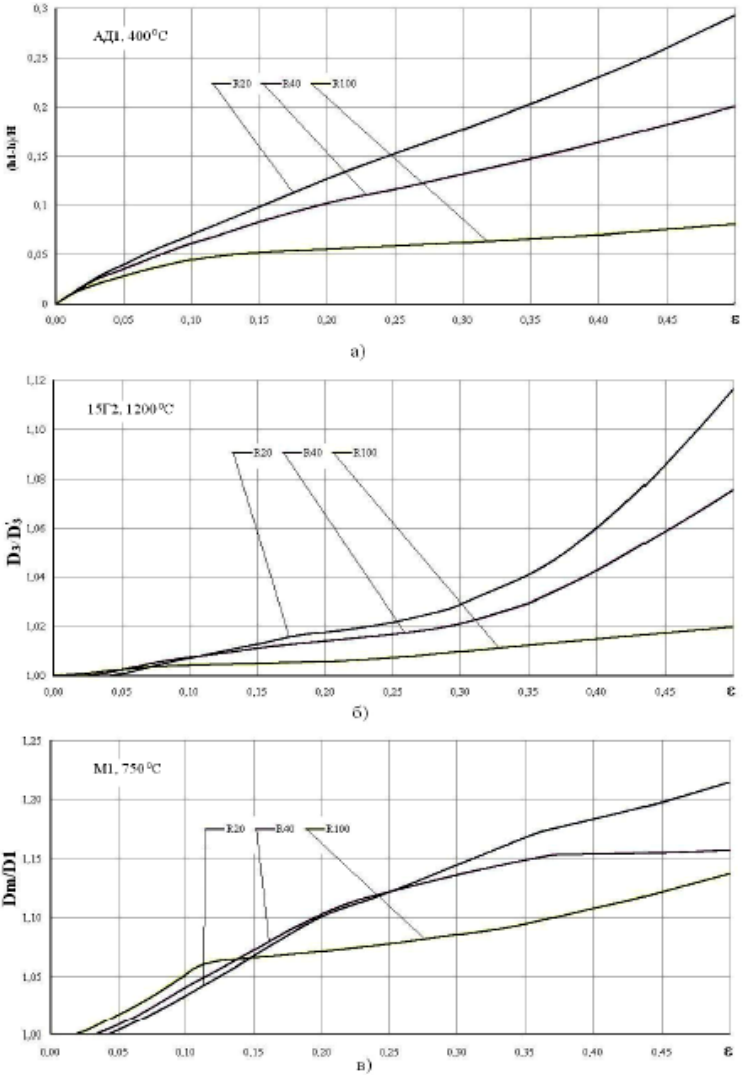


Рисунок 1.16 – Приклади деяких графічних залежностей відносних показників формозміни [98]

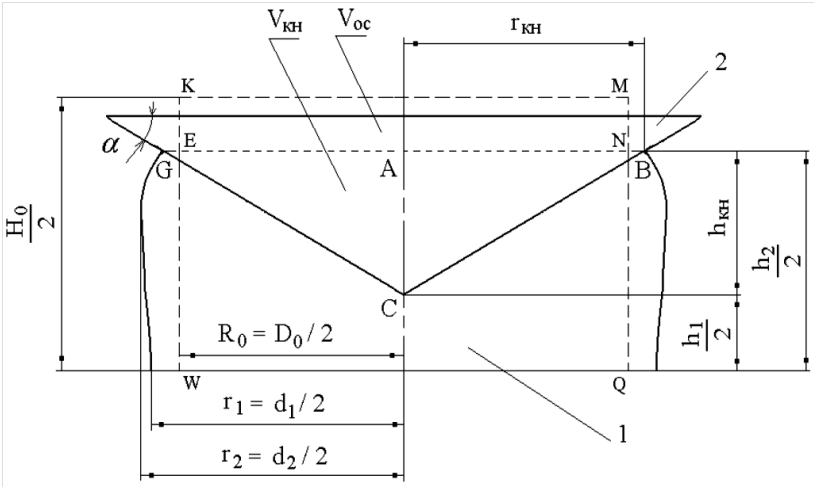


Рисунок 1.17 – Осаджування заготовок конічними бойками (верхня частина) [99]

Зазвичай, в процесах кування і на підготовчих переходах штампування технологічні мастила не використовують. Вплив тертя на контакті плит і заготовок з відношенням висоти до діаметру не менше 1,0 є незначним [101]. Тому зміна профілю (конусності або кута α при основі конусу) осаджувального бойка впливає на формозміну заготовки не лише в місці вдавлювання бойка в її торець, а і на формування профілю бічної поверхні осаджуваного напівфабрикату.

При аналізі формозміни заготовок, попереднє профілювання якої виконують із застосуванням комбінованих бойків або бойків з випуклим профілем, оцінку нерівномірності деформації необхідно проводити за геометричними показниками. А для цього необхідно розробити схему обміру заготовки після профілювання і зведення отриманих показників до відносних величин.

1.5 Методи вивчення формозміни заготовок

У розробку і розвиток різних методів вивчення формозміни металу при обробці тиском величезний вклад внесли такі вітчизняні і зарубіжні вчені, як Алієв І. С., Березкин В. Г., Громов М. П., Губкін С. І., Джонсон В., Зібель Е., Кудо Х., Огородніков В. А., Охріменко Я. М., Попов Є. А., Ренне І. П., Сивак І. О., Луценко В. О., Рябичева Л. О., Соколов Л. М., Сторожев М. В., Тарновский І. Я., Трубін В. М., Тюрін В. О., Унксов Є. П. та ін. [2, 7, 24, 43–45, 48, 74, 77, 78, 89, 94, 102–113].

При дослідженні осаджування інженерним методом (спільне рішення рівнянь рівноваги з умовами пластичності), розробленим Є. П. Унксовим [108], площину контакту симетрично відносно головної осі розбивають на три ділянки: ковзання, гальмування і прилипання. Такий підхід був запропонований ще А. Ф. Головіним [114]. На кожній ділянці справедливі свої закони розподілу нормального σ і дотичного τ напруження, які додатково залежать від величини коефіцієнтів контакту $D_к/H_к$ і тертя μ на контакті. Схожі дослідження теоретично проведені В. В. Соколовським [115] методом чисельного інтегрування рівнянь ліній ковзання, А. Д. Томленовим [116] методом характеристик і методом заміни епюр В. В. Соколовського прямолінійними ділянками [115-117].

Для оцінки формозміни при осаджуванні Я. М. Охрименко в роботах [2, 24] приводить графіки балансу площ поверхні циліндричної заготовки. Встановлено, що при великих ступенях деформації осаджування збільшення площі контактної поверхні відбувається за рахунок переходу бічної поверхні на контактну [2, 24, 113]. Є. П. Унксовим розроблений метод аналізу деформованого стану заготовки по осаджуванні на штампі з вертикальним щілинним отвором [108, 113].

Формозміно при осаджуванні промодельовано Л. О. Рябичевою [110] і В. О. Гринкевичем [118-120] на ЕОМ з використанням методу скінчених елементів (МСЕ). У останньому випадку застосований варіаційно-енергетичний підхід, коли в основу розробленого алгоритму, використовуваного для моделювання процесів ОМТ, покладений дискретний метод змінної в'язкості, що враховує реологічні властивості матеріалів і служить альтернативою методу гідродинамічних наближень О. А. Іл'юшина [121]. Проте, цей метод важко реалізувати на завданнях із складним осередком деформації, з великими температурними градієнтами і тривимірною деформацією. Нині з'явилися потужніші програмні засоби і рішення на основі МСЕ, здатні аналізувати завдання об'ємної формозміни з прийнятною точністю [56, 122–124].

Для вивчення напружено-деформованого стану і аналізу волокнистої макроструктури при холодному осаджуванні і висаджуванні заготовок з H_0/D_0 = 0,33–2,0 В. А. Огородніковим [125, 126] використаний експериментально-розрахунковий метод вимірювання твердості, запропонований Г. Д. Делем [127]. Ряд важливих досліджень проведений на основі феноменологічної теорії деформованості [111, 112, 128]. Виявлено, що найбільш швидке вичерпання запасу пластичності відбувається на бічному контурі холоднодеформованої заготовки при великих ступенях осаджування у більш високих зразків. Тому, ступінь деформації осаджування або висаджування не повинна перевищувати деякої критичної величини. Метод важко застосувати до вивчення гарячої деформації через наявність процесів рекристалізацій, які впливають на твердість матеріалу.

Асиметрію форми поверхні заготовки при осаджуванні О. М. Лібін [129] описує функцією у вигляді ряду Фур'є зі знаходженням коефіцієнтів розкладання з експе-

риментальних даних, отриманих методом прямих вимірів лінійних розмірів. Метод простий і найбільш поширений.

Оцінка нерівномірності деформації заготовок при профілюванні може бути зроблена по локальних змінах розмірів, для чого найбільш відповідними є геометричні методи [106, 130–133], наприклад, метод ділильних сіток, застосований у роботі [133] для дослідження кінематики підкатки заготовок у відкритих рівчаках на молотах.

Проте, дискретизація об'єму осаджувальної заготовки з порушенням її суцільності є основним недоліком методу координатних (ділильних) сіток, розвиненого у роботах П. О. Пашкова [130], І. П. Ренні [106, 131] та ін. учених. Точність методу цілком задовільна, але при отриманні якісної і кількісної характеристик деформації у будь-якій точці тіла складно оцінити цілісну картину формозміни заготовки з неоднорідним деформованим станом за об'ємом. Метод отримав широке поширення через простоту і наочність, проте підвищення точності вимірів вимагає зменшення розміру осередків координатної сітки, що істотно збільшує трудомісткість вимірів.

Отримання достовірних результатів поляризаційно-оптичним методом (розробленим для вимірювання напружень) є важким для поверхонь з криволінійними утворюючими; так само для моделювання пластичного плину не створені оптично чутливі матеріали, близькі за реологічними властивостями до металів (ідеально-жорстко-пластичним або жорстко-в'язко-пластичним тілам) [117, 132]. Різновидом поляризаційно-оптичного методу є метод оптично-чутливих покриттів, який дозволяє вивчати як моделі, так і натурні конструкції. Для дослідження процесів ковальсько-штампувального виробництва цей метод застосований у роботах [134, 135].

Недоліками оптичних методів є утруднення у підборі матеріалів, які непластичні і не мають залишкових ефектів,

а також необхідність використовувати дорогу спеціалізовану апаратуру (лазери, поляризатори, світлофільтри).

Для аналізу широкого класу різних завдань ОМТ використовують метод крихких покриттів [117]. Метод не дозволяє отримувати результати з високою точністю, також істотним обмеженням є низька пластичність крихких покриттів. У зв'язку з цим метод використовують лише для непрямих вимірювань пружних деформацій у станинах та інструменті, причому значний вплив на точність методу мають умови проведення експерименту (температура, вологість, товщина покриття і так далі).

У загальному випадку, вибір методу дослідження визначають вимогами, що пред'являються до рішення, тобто "витрати повинні виправдовуватись результатом" [117].

Висновки по розділу 1

1. При гарячому об'ємному штампуванні різних поковок перед формоутворенням у фінішному рівчаку необхідно вводити операції попереднього профілювання заготовок. У більшості способів отримання профільованих заготовок під поковки складнопрофільних плит потрібне застосування додаткового спеціалізованого устаткування, а це не завжди можливо з технічних причин, і не завжди вигідно з економічних. При цьому штампування на КГШП залишається найбільш прийнятним способом виробництва поковок, проте виникає необхідність розробки нових профілюючих операцій на основі вільної формозміни з позитивним використанням ефекту нерівномірності деформації і конструкції маловитратного штампового інструменту для отримання профільованих напівфабрикатів для подальшого штампування у робочому просторі кривошипних пресів.

2. Літературний огляд показав, що для досягнення максимальної економії металу при виробництві поковок

складнопрофільних плит та пластин потрібне застосування профілюючих операцій у інструменті, який дозволить отримати напівфабрикат за формою, що є близькою до форми готової поковки. Таким інструментом можуть бути випуклі радіусні штампові вставки з асиметрією вдавлювання у торці заготовки. Для прогнозування напружено-деформованого стану і формозміни при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками потрібне проведення комплексних експериментальних і теоретичних досліджень. Вплив радіусу випуклої частини штампових вставок, розмірів початкової заготовки, ступеню деформації, величини асиметрії вдавлювання в торці заготовки і коефіцієнта контактного тертя в процесі асиметричного осаджування на зміну показників нерівномірності деформації і НДС залишається невиясненим.

3. Операцію асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками можна розглядати, як нерівномірне осаджування (операцію профілювання), але симетричну відносно горизонтальній осі, з плином металу в подовжньому, висотному і поперечному напрямах. Нерівномірність деформації при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками раціонально оцінювати за безрозмірними геометричними показниками (макропоказникам формозміни), які слід розраховувати з урахуванням початкових габаритів заготовки і співвідношення лінійних розмірів у висотному, подовжньому і поперечному напрямах.

Розділ 2
ВИБІР НАПРЯМІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Основні техніко-економічні показники у процесах гарячого об'ємного штампування і напрями їх підвищення

При проектуванні та розробці будь-якого технологічного процесу завжди враховуються вимоги замовників при збереженні мінімальної технологічної вартості. Іноді питання, що стосуються продуктивності, йдуть на другий план, а первинним завданням є висока якість продукції, продуктивність матиме значення тільки у разі скорочених термінів замовлення.

Великий вибір продукції з пропонованої номенклатури штампованих виробів безпосередньо пов'язаний з кількістю замовників, тому будь-яке підприємство намагається забезпечити себе технічно універсальним устаткуванням, а таким є кривошипні гарячештампувальні преси. Проте, підготовка заготовок в штампах КГШП буває утрудненою, це і обмежує технологічні можливості пресового устаткування. Саме тому первинним завданням у підвищенні техніко-економічних показників технологічних процесів штампування на КГШП є розробка способів попереднього профілювання, які будуть застосовані на основному штампувальному устаткуванні.

Спираючись на висновки, отримані у розділі 1, для розвитку і вдосконалення способів попереднього профілювання були визначені напрями теоретичних і експериментальних досліджень при штампуванні поковок складнопрофільних плит – аналіз формозміни циліндричних заготовок у процесах асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками.

При виконанні необхідних технологічних режимів можливе максимальне наближення заготовки до форми штампованої поковки, для цього необхідно:

– визначити найбільш раціональні методи теоретичних і експериментальних досліджень для отримання максимально високого ступеню достовірності результатів;

– розробити методику вимірювання і відстежування зміни макропоказників формозміни при асиметричному осаджуванні циліндричної заготовки радіусними штамповими вставками;

– розробити математичні моделі процесу асиметричного осаджування заготовок радіусними штамповими вставками для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) і формозміни;

– провести оцінку силових і деформаційних режимів на етапі попереднього профілювання і подальшому штампуванні в попередньому і фінішному рівчаку;

– отримати математичний опис закономірностей зміни відносних геометричних параметрів (макропоказників) заготовок у процесі асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками і виконати їх експериментальну перевірку;

– провести розробку і вдосконалення технологічних процесів штампування поковок складнопрофільних плит із застосуванням отриманих результатів досліджень;

– розробити класифікацію поковок і запропонувати номенклатуру виробів, що базується на запропонованих і досліджених способах попереднього профілювання.

Використання результатів досліджень із формозміни при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками може бути основою для досліджень з використання профільованих заготовок у технологіях штампування поковок різного плану. Залежно від розмірів і конфігурації поковки можуть бути визначені підготовчі операції,

проведений аналіз поковки на технологічність і розроблені рекомендації для вибору штампувальних переходів.

2.2 Постановочні досліди, розробка розрахункової схеми і способів профілювання заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками

В основу дослідів у представленій монографії покладено методику попереднього профілювання асиметричним осаджуванням заготовок випуклими радіусними штамповими вставками, тобто із зміщенням осі робочого інструменту від осі заготовки, що деформується (рис. 2.1).

Для визначення цілеспрямованості і ефективності застосування цього способу профілювання до штампування типової поковки на КГШП були вибрані наступні досліди:

– дослідження НДС при осаджуванні для високих і низьких заготовок;

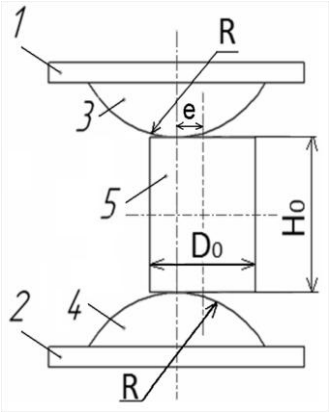
– вивчення закономірностей формозміни для високих і низьких заготовок, встановлення факторів, що впливають на їх формозміну;

– дослідження силових режимів асиметричного осаджування заготовки випуклими радіусними штамповими вставками і силових режимів штампування поковок типу "Плита рухома" і "Супорт";

– виявлення умов появи поздовжнього згину при асиметричному осаджуванні випуклими радіусними штамповими вставками;

– виявлення різних факторів на вислизання заготовки з області деформуючого інструменту;

– виявлення впливу додаткового перекосу повзуна пресу на стан направляючих КГШП при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками.



1 – верхній осаджувальний бойок;
2 – нижній осаджувальний бойок;
3 – верхній випуклий профіль;
4 – нижній випуклий профіль;
5 – заготовка;
R – радіус випуклих плит;
D_0 – початковий діаметр заготовки;
H_0 – початкова висота заготовки;
e – величина асиметрії

Рисунок 2.1 – Схема осаджування заготовки випуклими радіусними бойками

За результатами виконаної роботи було розроблено класифікацію поковок, до яких є застосованим спосіб асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками. Розроблено рекомендації з проектування технологій гарячого об'ємного штампування поковок на основі асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками.

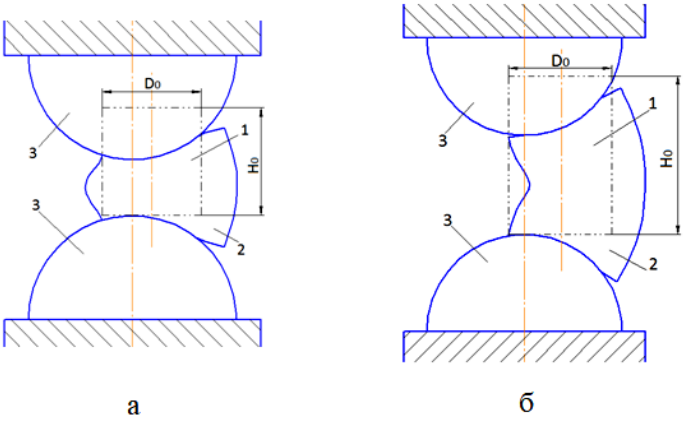
2.3 Вибір методів теоретичних досліджень. Теоретичні основи скінчено-елементного аналізу в пакеті Deform

2.3.1 Обґрунтування методів аналізу формозміни заготовок при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками

Виявлення закономірностей формозміни від впливаючих факторів (геометричних розмірів початкової висоти і діаметру заготовки, відносного ступеню деформації при асиметричному осаджуванні, радіусу випуклості плит (радіусності), величини асиметрії, умов на контактній поверхні) має бути основою для методів проведення теоретичного аналізу формозміни заготовок при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками. Необхідні технологічні характеристики доцільно отримати шляхом розробки схеми асиметричної деформації випуклими радіусними штамповими вставками, а отже і схеми обміру напівфабрикату. Базуючись на результатах оцінювальних експериментів і на дослідженнях з осаджування випуклими сферичними бойками [74], залежно від початкових параметрів H_0/D_0, слід розділити асиметричне осаджування випуклими радіусними штамповими вставками на осаджування з нерівномірним діжкоутворенням (рис. 2.2, а) і з поздовжнім згином (рис. 2.2, б).

Схему виміру формозміни необхідно розробити такою, щоб вона була універсальною і могла бути застосовна для обох випадків, незалежно від нерівномірностей деформації у подовжньому, поперечному і висотному напрямі. Беручи до уваги головні положення теорії подібності Кірпічева-Кіка [89, 136], усі необхідні характеристики формозміни і фактори, що впливають на нього, треба вира-

зити через співвідношення лінійних розмірів у безрозмірних (відносних) показниках.



1 – початкова заготовка; 2 – осаджена профільована заготовка; 3 – випуклі подовжені бойки

Рисунок 2.2 – Фронтальний вид процесу асиметричного осаджування циліндричних заготовок радіусними штамповими вставками з нерівномірним діжкоутворенням (а), яке реалізується при $H_0/D_0 \cong 1$, і поздовжнім згином (б), яке реалізується при $H_0/D_0 \cong 2$

З факторів, які враховуватимуть геометричний вплив початкових умов деформації, можна виразити у відносних величинах наступні:

– відносну висоту H_0/D_0 (відношення початкової висоти заготовки до її початкового діаметру);

– відносний радіус штампових вставок R/D_0 (відношення радіусу випуклості вставок до початкового діаметру заготовки);

– асиметричність e/D_0 (відношення значення асиметрії зміщення вертикальної осі заготовки від головної вертикальної осі інструменту до початкового діаметру заготовки).

Усі циліндричні заготовки за своїми геометричними параметрами діляться на відносно низькі з $H_0/D_0 \leq 1{,}0$ і відносно високі $H_0/D_0 > 1{,}0$ [2, 12, 24]. Через складності встановлення заготовок з $H_0/D_0 > 2{,}0$ і збереження їх положення у стані стійкості на випуклих радіусних штампових вставках, доцільним буде проведення досліджень на циліндричних заготовках з $H_0/D_0 = 1{,}0$ і $H_0/D_0 = 2{,}0$. Застосування циліндричних заготовок з $H_0/D_0 > 2{,}0$ у виробничій практиці зустрічається досить рідко і вимагає додаткового устаткування або оснащення для установки і підтримання стійкого положення заготовки у процесі формозміни.

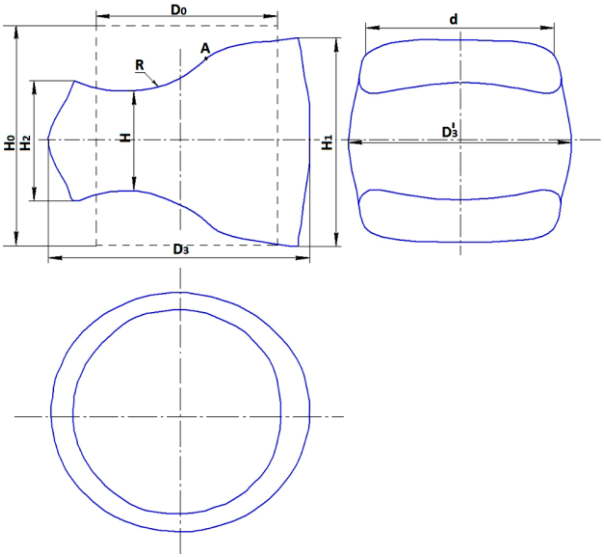
Схема процесу асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками, з позначенням геометричних характеристик, які необхідно контролювати в ході досліджень, наведена на рис. 2.3.

У основу теоретичного рішення покладені допущення асиметричного видавлювання випуклих радіусних штампових вставок у торці заготовки і симетричної деформації відносно горизонтальної осі заготовки та інструменту.

Напівфабрикат повністю симетричний відносно горизонтальній осі.

В якості безрозмірних величин (макропоказників формозміни), що характеризують нерівномірність деформації прийнято: співвідношення для подовжнього напряму – d/D_3, для поперечного напряму – D_3/D_0. Нерівномірність деформації по висоті виражено співвідношеннями H_1/H_0 і H_2/H_0. Витягування заготовки у напрямі, перпендикулярному осі випуклих радіусних вставок, тобто відмінність між подовжнім і поперечним розміром, описує співвідношення D_3/D'_3. Параметр H_1/H_2 описує нерівномірність

деформації по висоті та показує вплив асиметрії вдавлювання в торці заготовки на висотні параметри.



R – радіус випуклого радіусного бойка; H_0 і D_0 – початкова висота і діаметр циліндричної заготовки відповідно; D_3 і D'_3 – розміри по середині висоти заготовки в поперечному і подовжньому напрямах відповідно після асиметричного осаджування; H – найменша відстань між випуклими радіусними бойками після асиметричного осаджування; H_1 – максимальна висота заготовки на торцевому виступі праворуч від подовжньої осі плит після асиметричного осаджування; d – розмір торцевого виступу в подовжньому напрямі

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд заготовки, яка осаджена радіусними штамповими вставками з асиметрією вдавлювання у торці заготовки (схема обміру заготовки)

Існує досить багато методів для проведення теоретичного аналізу, такі як: метод ліній ковзання [115, 116, 132]; інженерний метод [101]; метод верхньої оцінки [104, 106, 132, 137–142]. Проте всі ці методи роблять утрудненим теоретичний аналіз формозміни заготовок, які були деформовані в незамкнутому просторі з проявом діжки на бічних поверхнях. Застосування феноменологічної теорії деформованості дозволить спростити це завдання [143].

Рішення поставлених завдань цими методами ґрунтуються на знанні формозміни заготовки, що заповнює порожнину інструменту відомої конфігурації, коли поля швидкостей або переміщень задаються в явному виді. У разі, коли поля швидкостей або переміщень задаються в неявному виді, тобто інтуїтивним методом або на основі попередніх експериментальних даних, розгляд завдань асиметричної формозміни варіаційним методом значно ускладнюється [101, 105], оскільки необхідно буде погоджувати граничні умови і умови нерозривності деформацій при завданні різнорідних функцій, які описують формозміну в подовжньому і поперечному напрямі при осаджуванні випуклими радіусними бойками з асиметрією вдавлювання в торець заготовки.

Популярність і поширення останнім часом отримали програми для аналізу процесів формозміни математичним моделюванням, ґрунтовані на методі скінчених елементів (МСЕ). У роботах [122–125] наводяться приклади використання спеціалізованих програмних пакетів різних розробників: ABAQUS, LS Dyna, SuperForge, Qform, Deform та ін., усі вони мають досить потужну розрахункову базу для проведення аналізу і теоретичних досліджень. Деякі програми дозволяють працювати як у двохмірному, так і у тривимірному режимі з досить високим ступенем точності. Можливо проводити дослідження з дефектоутворення, досліджувати енергосилові характеристики процесів, про-

водити дослідження термічного впливу; усе це виконуватиметься з урахуванням всіх фізико-механічних властивостей матеріалів заготовки та інструменту.

Проте, при всіх можливостях цих програм з візуалізації процесу деформування, виведенню отриманих результатів у вигляді графічних залежностей формозміни, зображенню схем розподілу напружено-деформованого стану, ці пакети не здатні представити нерівномірності формозміни у вигляді формульних функціональних залежностей.

Для аналізу енергосилових режимів, дослідження напружено-деформованого стану, вислизання заготовки, появи поздовжнього згину і формозміни в процесі асиметричного осаджування випуклими радіусними штамповими вставками і в процесі штампування поковок типу "Плита рухома" і "Супорт" розроблена модель на основі МСЕ в програмному пакеті Deform 3d (№ ліцензії 8145).

2.3.2 Основні положення методу скінчених елементів

Метод скінчених елементів (МСЕ) – це чисельний метод рішення диференціальних рівнянь з частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при рішенні завдань прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення завдань механіки твердого тіла, що деформується, теплообміну, гідродинаміки і електродинаміки.

Уперше цей метод був застосований Кінгом І. та Маркалом П. [144] і використовувався при розгляді пружньопластичних середовищ, після чого отримав широке поширення при машинобудівних розрахунках [145] і у будівельній механіці [146], для вирішення завдань механіки суцільного середовища.

У роботах [107, 147, 149, 150], в яких досліджувалося застосування варіаційних методів до завдань теорії обробки металів тиском (ОМТ), показані перші кроки у використанні теоретичних основ МСЕ для вирішення завдань ОМТ.

Перші повноцінні застосування МСЕ при моделюванні процесів ОМТ з'явилися в 70-х роках у роботах авторів C. H. Lee і S. Kobayashi [151], G. C. Cornfield, R. H. Johnson [152], але правда вони були у плоскій постановці. Тривимірні рішення завдань ОМТ методом МСЕ з'явилися пізніше в роботах [153, 154]. У теперішній час використовують програмне забезпечення для моделювання і дослідження процесів обробки металів тиском у дослідницьких відділах великих металургійних підприємств і навчальному процесі. У монографії [155] узагальнені праці вітчизняних учених в області комп'ютерного моделювання процесів ОМТ.

Процес розрахунку методом МСЕ проходить у декілька етапів: область, що розглядається, розбивається на дрібніші частини – скінчені елементи, які з'єднуються між собою вузлами; проводять апроксимацію залежних змінних кусково-поліноміальними функціями; виконують підстановку апроксимуючих функцій у визначальні рівняння і їх рішення, що визначає значення параметрів, які повністю описують шукані функції усередині елементу через їх значення у вузлових точках. Тобто для кожного елементу вирішується повна система матричних рівнянь механіки суцільних середовищ, опосередкована нелінійним функціоналом, для якого одним з методів оптимізації (лінійне програмування, метод штрафних функцій) відшукуються рішення, що приводять нев'язку до нуля. Помилки апроксимації в межах елементів усуваються при дотриманні критеріїв збіжності [156].

Геометрична сторона завдань розрахунку конструкцій надзвичайно різноманітна. Інженерна конструкція може бути:

– стержневою системою (ферма, балка або рама);

– двовимірним об'єктом (плита, плита або оболонка);

– об'ємним або тривимірним об'єктом;

– комбінацією стержнів, плит, оболонок і так далі.

Для геометричного моделювання перерахованих видів інженерних конструкцій розроблена велика кількість різноманітних скінчених елементів. Їх кількість така велика, що вони насилу піддаються класифікації. Грубу класифікацію можна здійснити за допомогою чотирьох ознак:

– розмірність простору;

– кількість вузлових точок;

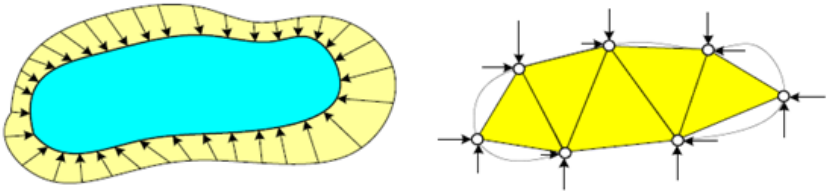
– кількість ступенів свободи (можливих переміщень) у вузлі;

– форма скінченого елементу.

При побудові математичної моделі геометрія конструкції представляється набором скінчених елементів дуже простої форми. Зміна переміщень і напружень усередині одного елементу моделюється також дуже простими функціями, лінійними або квадратичними. При розгляді з’єднань скінчених елементів напруження, що діє між ними, представляється еквівалентними зосередженими силами (іноді моментами), прикладеними у точках з'єднання – вузлових точках. Відповідно, зміщення цих точок – ступені свободи, що використовуються для опису переміщень елементу. До вузлових сил зводяться також зовнішні розподілені навантаження, що діють на поверхні тіла. Закріплення меж тіла також зводиться до закріплення вузлових точок. Таким чином, розрахункова модель стає дискретною.

Реальна поведінка конструкції тіла, що деформується, схематично показана на рис. 2.4 (а), а її скінченоелементна модель – на рис. 2.4 (б). Ідеалізація конструкції

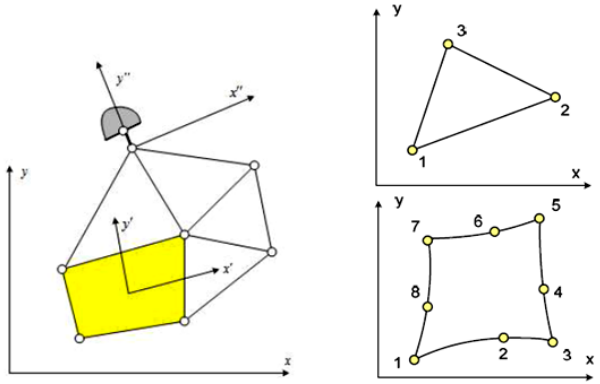
повинна виконуватися у такий спосіб, щоб при зменшенні розмірів елементів (рис. 2.5) поведінка моделі прагнула до поведінки реальної конструкції.



а б

а – реальна модель; б – скінчено-елементна модель

Рисунок 2.4 – Схема розбиття на елементи



а б

Рисунок 2.5 – Елемент з вузлами в системі координат (а) і порядок нумерації вузлів (б)

У методі скінчених елементів слід розрізняти глобальні і локальні системи координат. Глобальні осі задаються для усієї конструкції. Локальні системи координат можуть відноситися до окремого елементу або навіть до окремого вузла. Локальні координати використовують зазвичай при формулюванні рівнянь, що відносяться до одного елементу.

Отримавши ці рівняння, можна легко перетворити сили і переміщення до глобальної системи координат. Глобальна система координат потрібна для отримання рівнянь, що описують поведінку усього тіла.

2.4 Загальна методика експериментальних досліджень процесу асиметричного осаджування циліндричних заготовок радіусними штамповими вставками. Основи планування експерименту

Метою експериментальних досліджень є аналіз отриманих макропоказників формозміни і отримання закономірностей формозміни заготовок, осаджуваних випуклими радіусними штамповими вставками з асиметрією вдавлювання в торець заготовки, і порівняння отриманих результатів з теоретичними рішеннями для оцінки їх адекватності і похибки. Сучасні підходи до обробки та аналізу отриманих експериментальних даних дозволяють отримувати величини середньоквадратичних відхилень і регресійні моделі досліджуваних процесів, довірчиї ймовірностей, комплекси статистичних оцінок. У таких підходах використовується застосування різних експериментальних, експериментально-розрахункових і експериментально-розрахунково-аналітичних методів [117]. Експериментальні дослідження процесів асиметричного осаджування випуклим радіусним інструментом проводили в лабораторії кафедри обробки металів тиском Державного вищого на-

вчального закладу "Приазовський державний технічний університет» на універсальному устаткуванні.

Для експериментальних досліджень асиметричного осаджування заготовок випуклими радіусними штамповими вставками використовували універсальну випробувальну машину Р-20 (рис. 2.6) і випуклі радіусні штампові вставки (рис. 2.7).

Експериментальні зразки діаметром D_0 = 50 мм виготовляли пресуванням з модельного матеріалу, в якості якого використовували свинцево-сурм'янистий сплав ССУ ГОСТ 1292, що має при кімнатній температурі пластичні властивості, близькі до властивостей конструкційних сталей в інтервалах кувальних температур.

Коефіцієнт витяжки при пресуванні свинцю зі злитків склав 3,24, що забезпечувало руйнування литої структури заготовок, які піддавали торцюванню на токарному верстаті після відрізки. Початкова висота експериментальних зразків складала H_0 = 50 мм і H_0 = 100 мм, тобто зразки мали співвідношення H_0/D_0 = 1,0 і H_0/D_0 = 2,0.

Для осаджування використовували набір випуклих подовжніх бойків (рис. 2.7, а) зі сталі 5ХНМ ГОСТ 5960, термооброблених до твердості HRC 40…44 з шорсткістю робочої поверхні R_a = 6,3 мкм. Радіус випуклості бойків складав R = 30; 50; 75; 112.5 мм, що відповідає значенням радіусності R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5; 2,25 відповідно.

Ступінь деформації осаджування варіювали з кроком $\Delta\varepsilon$ = 10 % до значення ε = 50 %, тобто проводили осаджування до величин ε = 10, 20, 30, 40 і 50 %. На кожну експериментальну точку (при умовах з певними значенням факторів H_0/D_0, R/D_0, e/D_0 і ε) осаджували по п'ять зразків для можливості проведення статистичної обробки.

Рисунок 2.6 – Випробувальна машина Р-20

а

б

в

Рисунок 2.7 – Набір експериментальних випуклих подовжених бойків (а) і осаджування заготовок різної висоти бойками різної радіусності (б) і (в)

Вимірювання параметрів формозміни деформованих зразків здійснювали за схемою (рис. 2.3) штангенциркулем, що пройшов метрологічну перевірку у встановлені терміни, а також із залученням комп'ютерної техніки.

Статистичну обробку результатів вимірювань проводили в пакеті MS Excel за стандартною методикою згідно ГОСТ 8.207.

Результати у вигляді аналітичних залежностей параметрів формозміни (Y) від впливаючих факторів (x_j) доцільно отримати шляхом поєднання обчислювальних експериментів з методикою планування математичного експерименту за планом 2^k [157–159], де 2 – кількість рівнів експерименту і k – кількість впливаючих факторів, коли рішення записується у вигляді рівняння регресії виду:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_j X_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^{k} b_{uj} X_u X_j + \dots , \qquad (2.1)$$

де $\hat{y}$ – розрахункове значення досліджуваного параметру;

b_0, b_j, b_{uj} – коефіцієнти рівняння регресії;

X – кодоване значення фактора експерименту;

j і uj – порядкові номери членів рівняння регресії (і факторів експерименту) без добутку і з добутком досліджуваних факторів відповідно.

Першим етапом планування експерименту, зазвичай, є вибір центру плану x_j^0 (або натуральне значення основного рівня) і визначення інтервалів варіювання Δx_j по кожному фактору. Центром плану є деяка середня в досліджуваному діапазоні величина впливаючого фактору, що знаходиться на умовному нульовому (основному) рівні «0». При додаванні до центру плану або відніманні від нього інтервалу варіювання для конкретного фактору,

утворюється верхній і нижній рівні експерименту, що позначають «+1» («+») і «–1» («–») відповідно. Кодовані значення факторів *Xj* пов'язані з натуральними значеннями x_j співвідношенням [157–159]:

$$X_j = \frac{x_j - x_j^0}{\Delta x_j}. \qquad (2.2)$$

Значення основного рівня для фактору відносної висоти заготовки складає $(H_0/D_0)^0 = 1{,}5$, інтервал варіювання – $\Delta(H_0/D_0) = 0{,}5$.

Основний рівень для радіусності плит $(R/D_0)^0 = 1{,}425$, інтервал варіювання $\Delta(R/D_0) = 0{,}825$.

Основний рівень для ступеню деформації осаджування $(\varepsilon)^0 = 0{,}35$ (або 35 %), інтервал варіювання – $\Delta(\varepsilon) = 0{,}15$ (або 15 %).

Основний рівень для ексцентриситету навантаження $(e/D_0)^0 = 0{,}125$, інтервал варіювання – $\Delta(e/D_0) = 0{,}125$.

Основний рівень відношення висоти випуклості профілю інструменту до початкового діаметру заготовки $(h_p/D_0)^0 = 52{,}5$, інтервал варіювання $\Delta(h_p/D_0) = 60$.

Моделювання формозміни заготовок проводили для матеріалів: свинець сурм'янистий марки ССУ ГОСТ 1292 і Сталь 38ХС ГОСТ 4543. У дослідженнях, що проводяться, свинець використовується для фізичного моделювання гарячої пластичної деформації сталі і для оцінки адекватності математичних моделей, що розроблялися.

Отже, потрібна побудова плану повного факторного експерименту виду 2^5.

Висновки по розділу 2

1. Прогнозування і контроль формозміни на етапі розробки підготовчих операцій є основними напрямами дослідницьких робіт в області об'ємного штампування. В процесі дослідження формозміни необхідно враховувати фактори, що безпосередньо впливають на сам процес: радіус випуклості штампових вставок; висота і діаметр початкової заготовки; ступень деформації; асиметрія вдавлювання у торець заготовки; висота випуклої частини радіусних бойків.

2. Спеціально розроблена схема обміру напівфабрикатів при дослідженні параметрів формозміни при асиметричному осаджуванні випуклими радіусними штамповими вставками підходить для експериментальних і теоретичних досліджень. Достовірність отриманих результатів може бути перевірена порівнянням отриманих макропоказників формозміни для експериментальних і теоретичних даних у висотному, подовжньому і поперечному напрямі.

3. Для вирішення досить складних завдань із дослідження впливу різних факторів на формозміну і напружено-деформований стан при отриманні напівфабрикату асиметричним осаджуванням циліндричної заготовки, а також у процесі об'ємного штампування доцільне використання програмних пакетів для скінчено-елементного моделювання і методик планування експерименту.

4. Для проведення теоретичних і експериментальних досліджень процесу асиметричного осаджування випуклими радіусними штамповими вставками виконаний вибір і адаптація суміщених методів. Для проведення дослідів визначені устаткування, оснащення і зразки. Вивчення нерівномірності деформації доцільно проводити геометричними методами. Для дослідження формозміни обрано метод прямих вимірювань з проведенням статистичної обробки результатів експерименту.

Розділ 3
СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК АСИМЕТРИЧНИМ ОСАДЖУВАННЯМ РАДІУСНИМИ ШТАМПОВИМИ ВСТАВКАМИ

3.1 Напружено-деформований стан

3.1.1 Високий профіль радіусних штампових вставок

Відношення висоти до діаметру H_0/D_0 = 1,0. Дослідження проводили з використанням пакету для скінченоелементного аналізу Deform 3d. Об'єктом моделювання був процес асиметричного осаджування циліндричної заготовки з діаметром D_0 = 50 мм і висотою H_0 = 50 мм (відношення H_0 / D_0 = 1,0). Температурні умови приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С. Задана кількість скінчених елементів складала 10000 шт., проте, після генерації сітки, кількість елементів була прийнята 7847 шт. Матеріал заготовки – Сталь 40, при цьому, модель зміцнення, також як і граничні умови, були взяті відповідно до умов, запропонованих програмою. Коефіцієнт контактного тертя при деформації, згідно з рекомендаціями джерела [160], приймали f = 0,3. У зв'язку з тим, що результати моделювання в широкому діапазоні співвідношення радіусу осаджувальних бойків R до діаметру заготовки D_0 передбачається перевірити експериментально шляхом осаджування на випробувальній машині, швидкість деформації прийнята υ = 1 мм/с.

Осаджування виконували до відносного ступеню обтискання $\varepsilon_h = (\Delta h / H_0) \times 100$ % = 70 %, де Δh – величина ходу інструменту (абсолютне обтискання), мм. Значення

асиметрії при осаджуванні, тобто неспівпадання осі заготовки і вертикальної осі радіусних штампових вставок, приймали e = 12,5 мм. Для визначення впливу величини радіусу випуклості штампових вставок на характеристики НДС заготовки, проводили моделювання осаджування при R = 30 мм; 50 мм; 75 мм і 112,5 мм, тобто відносний радіус бойків складав R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25.

Результати моделювання у вигляді осаджених заготовок з розподілом інтенсивностей напружень σ_i і інтенсивностей деформацій ε_i на бічній поверхні наведені у таблиці 3.1 [161]. У зв'язку з наявністю асиметрії при осаджуванні параметри НДС на поверхні заготовки розподіляються нерівномірно. Найбільші значення параметрів НДС характерні для середини висоти заготовки в областях, які знаходяться на осі руху осаджувальних бойків.

Для зручності відстежування змін ε_i і σ_i на різних ділянках заготовки із зростанням величини ε_h від 20 % до 70 % виділяли у твердотільній моделі характерні точки-маркери (рис. 3.1), в яких проводили ідентифікацію НДС:

точка № 1 – на середині висоти бічної поверхні лівої частини заготовки;

точка № 2 – на середині висоти бічної поверхні правої частини заготовки;

точка № 3 – на контактній поверхні по осі симетрії плит (у площині максимального локального обтискання);

точка № 4 – на бічній поверхні по осі симетрії плит;

точка № 5 – в центральній частині заготовки на перетині осі симетрії плит з горизонтальною віссю симетрії заготовки.

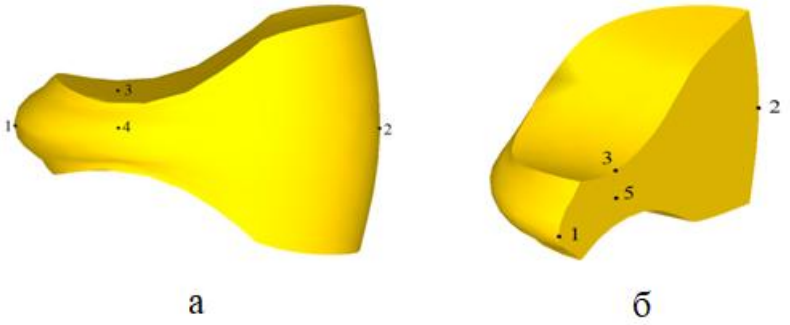
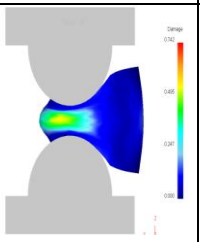
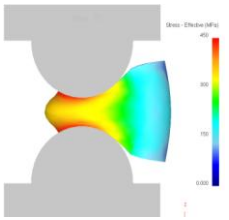
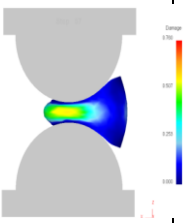
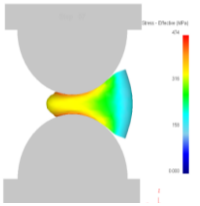
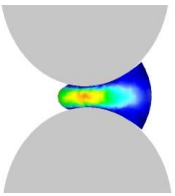
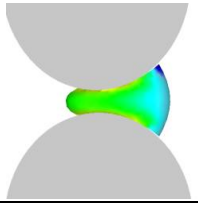
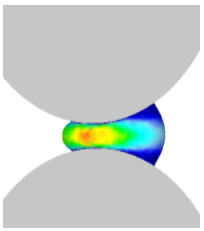
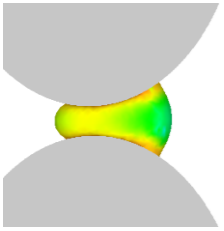


Рисунок 3.1 – Твердотільна модель осадженої заготовки (а) і її половина в подовжньому перерізі (б) з позначеними точками-маркерами для дослідження змін НДС (e = 12,5 мм) [161]

Зміну інтенсивностей напружень і інтенсивностей деформацій у вказаних точках зі збільшенням обтискання ε_h при різному відношенні R/D_0 показано на рис. 3.2.

Аналізуючи графік $\sigma_i = f(\varepsilon_h; R/D_0)$ (див. рис. 3.2) відзначимо загальну тенденцію до збільшення значень інтенсивностей напружень із зростанням обтискання ε_h. Причому, найменші значення σ_i відповідають точці № 2, а максимальні – точці № 3, де сильний вплив тиску на контакті. Відзначимо, що при малих величинах R/D_0 у точці № 2 спостерігаються менші значення σ_i, чим при більшому співвідношенні R/D_0. Зі збільшенням відношення R/D_0 при осаджуванні спостерігається зменшення значень σ_i у точці № 3, що пов'язано з перерозподілом тиску на контакті по більшій опорній площині.

Таблиця 3.1 – Результати моделювання асиметричного осаджування заготовки (H_0 = 50 мм, D_0 = 50 мм) радіусними штамповими вставками до ε_h = 70 % (e = 12,5 мм)

Радіус (відносний радіус) випуклості осаджувальних бойків	Інтенсивність деформацій, ε_i	Інтенсивність напружень, σ_i, МПа
R = 30 мм (R/D_0 = 0,6)		
R = 50 мм (R/D_0 = 1,0)		
R = 75 мм (R/D_0 = 1,5)		
R = 112,5 мм (R/D_0 = 2,25)		

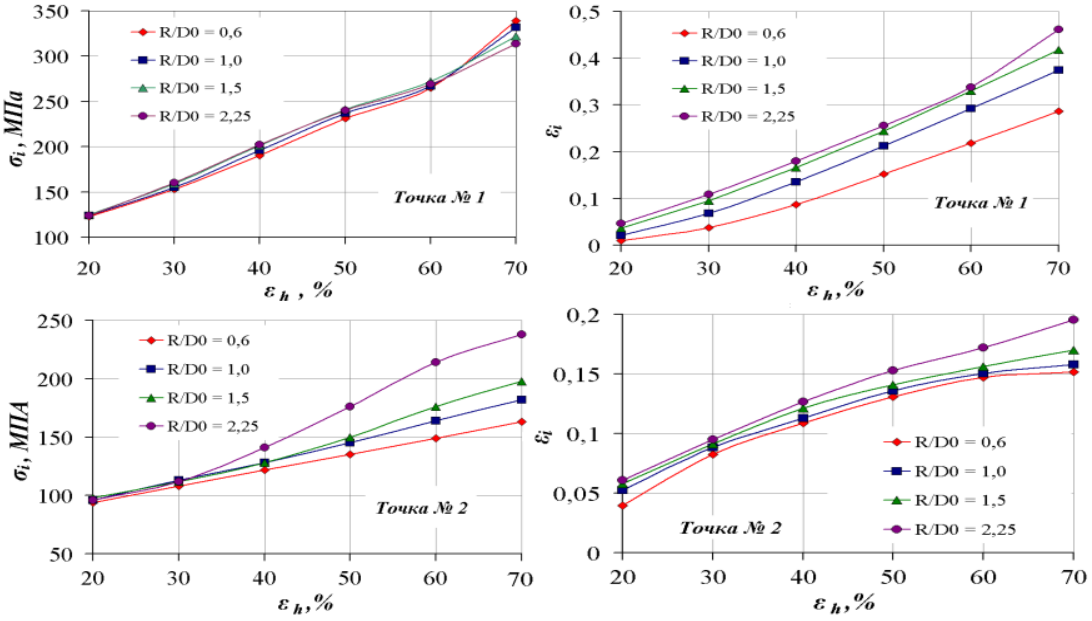
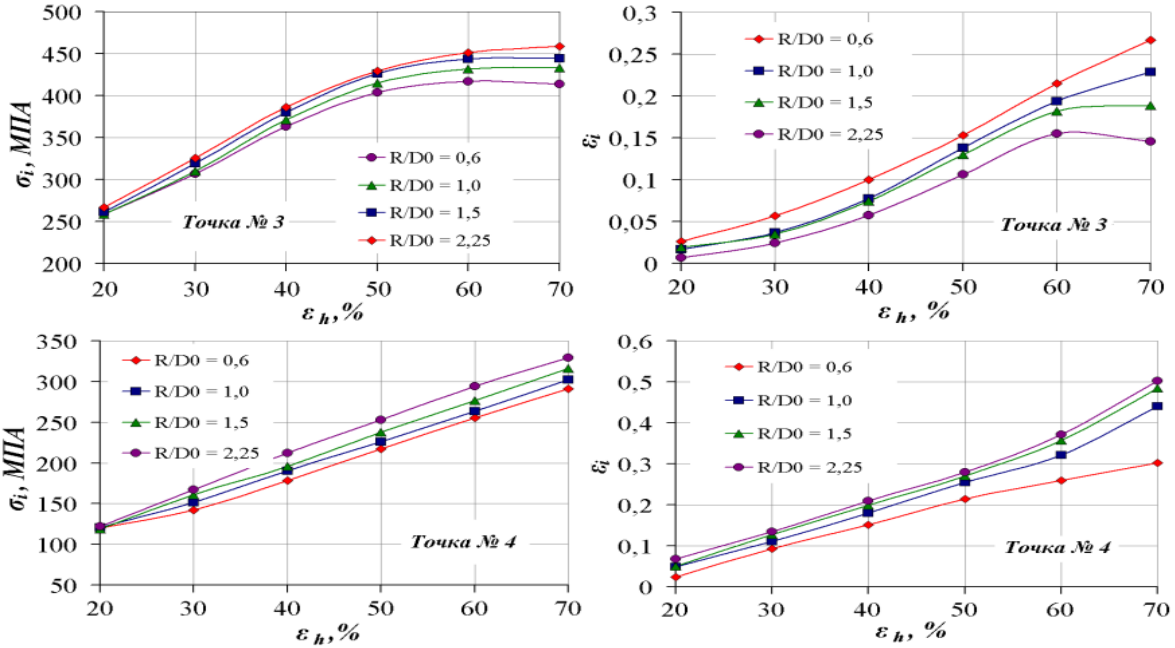
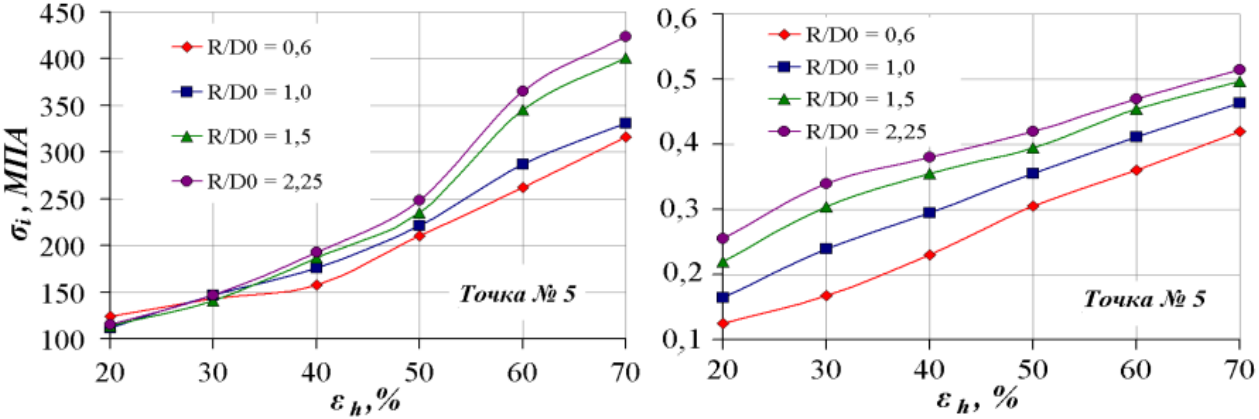


Рисунок 3.2 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі осаджування від співвідношення R/D_0 для різних точок-маркерів (e = 12,5 мм; e/D_0 = 0,25)



Продовження рисунку 3.2 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі осаджування від співвідношення R/D_0 для різних точок-маркерів (e = 12,5 мм; e/D_0 = 0,25)



Продовження рисунку 3.2 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі осаджування від співвідношення R/D_0 для різних точок-маркерів (e = 12,5 мм; e/D_0 = 0,25)

Аналогічним чином представлені графіки зміни розподілу ε_i в різних точках зі збільшенням деформаційних обтискань (див. рис. 3.2).

Аналізуючи графік $\varepsilon_i = f(\varepsilon_h; R/D_0)$ необхідно відзначити, що із зростанням обтискання ε_h також спостерігається загальне збільшення значень інтенсивностей деформацій. Причому мінімальне значення ε_i відповідає точці № 2, а максимальне – точці № 4. Слід зауважити, що в точці № 3, незважаючи на істотні значення полів інтенсивностей напружень, величини інтенсивностей деформацій порівняно невеликі, що пов'язано з незначним викривленням сітки через вплив сил тертя на контакті інструменту та заготовки, що пластично деформується. При малих величинах R/D_0 значення ε_i у точці № 2 реєструються менші, ніж при більшому відношенні R/D_0. Зі збільшенням відношення R/D_0 при осаджуванні відбувається зростання значень ε_i у точці № 4. Для контактної точки № 3 характерне збільшення значень ε_i із зростанням відношення R/D_0.

Також значна зміна у бік збільшення характеристик НДС спостерігається у точці № 5, причому із зростанням R/D_0 величини σ_i і ε_i зростають.

Відношення висоти до діаметру H_0/D_0 = 2,0. Дослідження проводили аналогічно, як і для заготовки з H_0/D_0 = 1,0. Для зручності відстежування змін ε_i і σ_i на різних ділянках заготовки із зростанням величини ε_h від 20 % до 70 %, виділяли в твердотільній моделі характерні точки-маркери (рис. 3.3), в яких проводили ідентифікацію НДС: *точка № 1* – на середині висоти бічної поверхні лівої частини заготовки; *точка № 2* – на середині висоти бічної поверхні правої частини заготовки; *точка № 3* – на конта-

ктній поверхні по осі симетрії бойків (у площині максимального локального обтискання); *точка № 4* – на бічній поверхні по осі симетрії бойків;*точка № 5* – в центральній частині заготовки на перетині осі симетрії бойків з горизонтальною віссю симетрії заготовки.

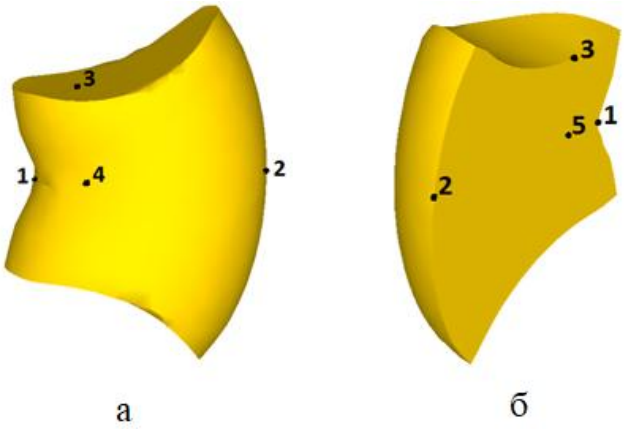
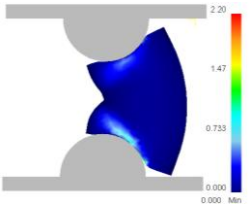
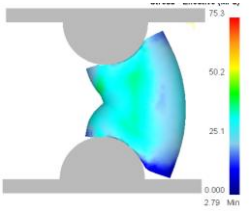
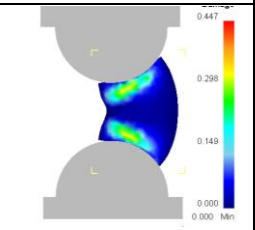
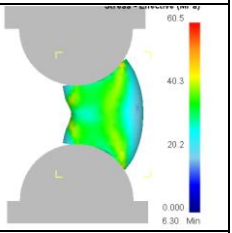
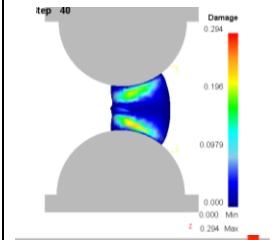
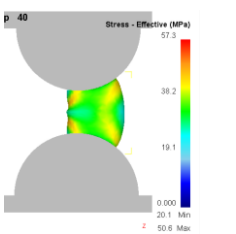
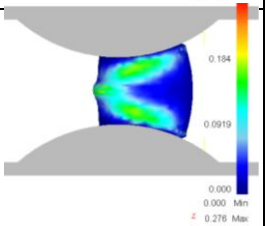
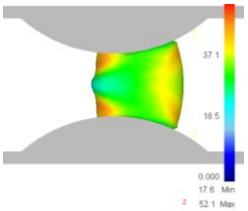


Рисунок 3.3 – Твердотільна модель осадженої заготовки (а) та її половина в подовжньому перерізі (б) з позначеними точками-маркерами для дослідження змін НДС (e = 12,5 мм; e/D_0 = 0,25) [161]

Результати моделювання у вигляді осаджених заготовок з розподілом інтенсивностей напружень σ_i і інтенсивностей деформацій ε_i на бічній поверхні наведені у табл. 3.2.

Зміну інтенсивностей напружень та інтенсивностей деформацій у вказаних точках зі збільшенням обтискання ε_h при різному відношенні R / D_0 показано на рис. 3.4.

Таблиця 3.2 – Результати моделювання асиметричного осаджування заготовки (H_0 = 50 мм, D_0 = 50 мм) радіусними штамповими вставками до ε_h = 70 % (e = 12,5 мм)

Радіус (відносний радіус) випуклості осаджувальних плит	Інтенсивність деформацій, ε_i	Інтенсивність напружень, σ_i, МПа
R = 30 мм (R/D_0 = 0,6)		
R = 50 мм (R/D_0 = 1,0)		
R = 75 мм (R/D_0 = 1,5)		
R = 112,5 мм (R/D_0 = 2,25)		

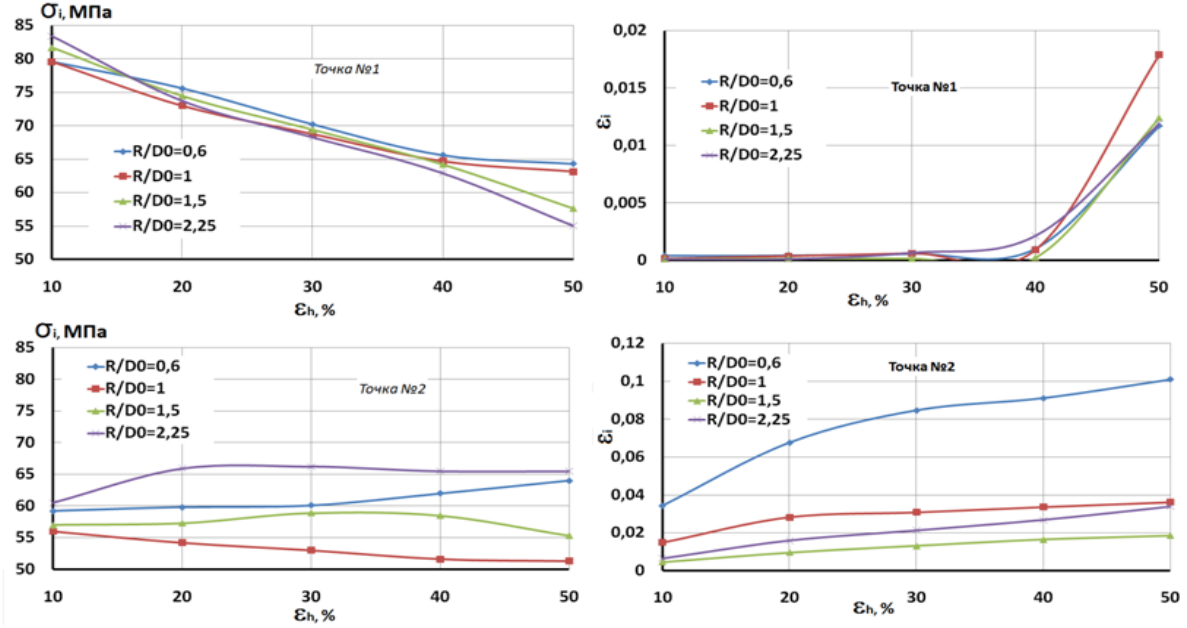
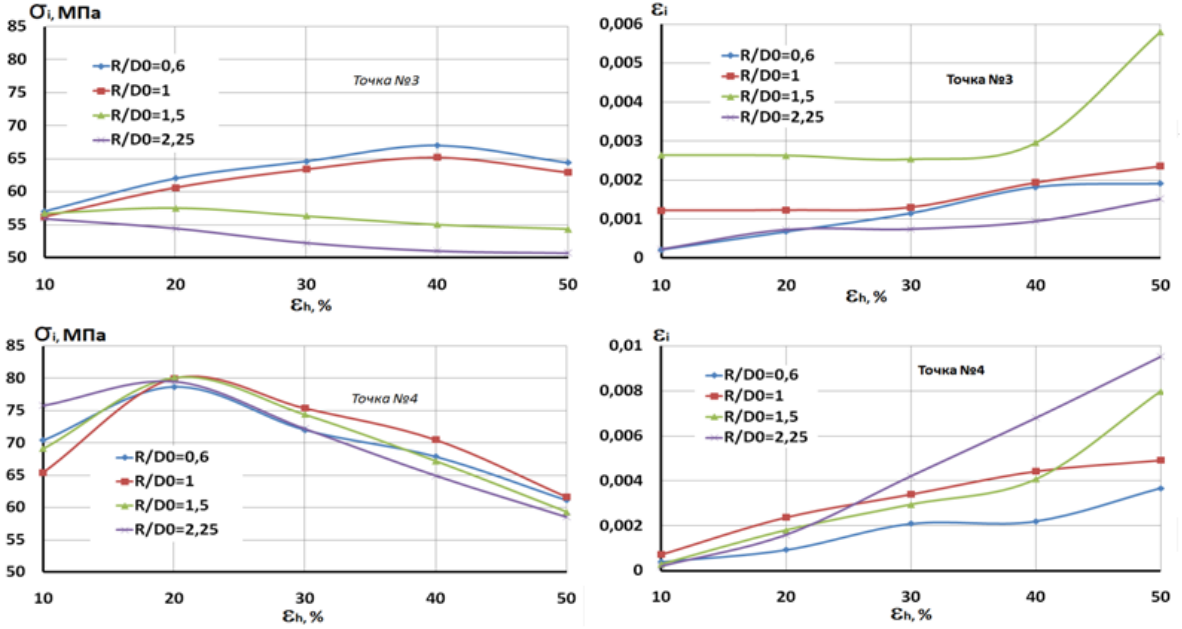
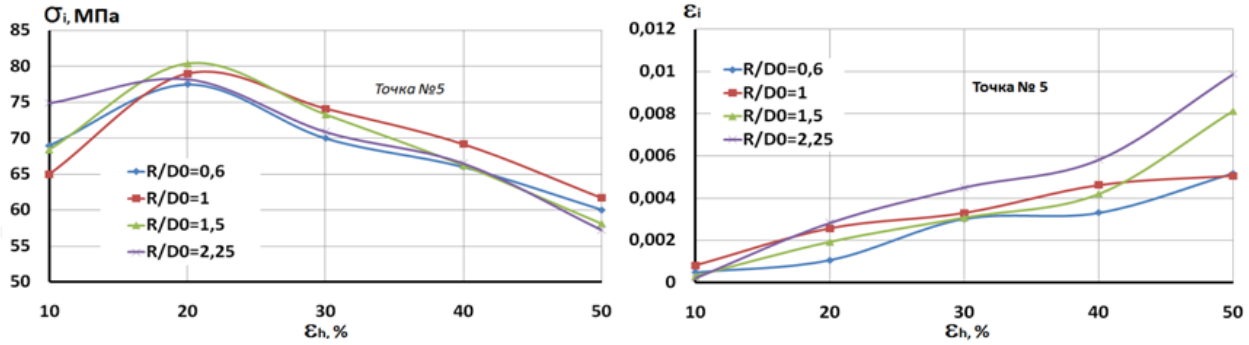


Рисунок 3.4 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі осаджування від співвідношення R/D_0 для різних точок-маркерів (e = 12,5 мм; e/D_0 = 0,25)



Продовження рисунку 3.4 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі осаджування від співвідношення R/D_0 для різних точок-маркерів (e = 12,5 мм; e/D_0 = 0,25)



Продовження рисунку 3.4 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі осаджування від співвідношення R/D_0 для різних точок-маркерів (e = 12,5 мм; e/D_0 = 0,25)

Аналізуючи графік $\sigma_i = f(\varepsilon_h; R/D_0)$ (див. рис. 3.4) відзначимо загальну тенденцію до збільшення значень інтенсивностей деформації і зниження інтенсивностей напружень із зростанням обтискання ε_h. Причому, найменше значення σ_i при максимальному обтисканні відповідає точці № 3 для, а максимальне – точці № 5 при ступені обтискання $\varepsilon_h = 20\ \%$ і $R/D_0 = 1{,}5$, де сильний вплив тиску на контакті. Зі збільшенням відношення R/D_0 при осаджуванні спостерігається зменшення значень σ_i у точці № 3, що пов'язано з перерозподілом тиску на контакті по більшій опорній площині.

Аналізуючи графік $\varepsilon_i = f(\varepsilon_h; R/D_0)$ необхідно відзначити, що із зростанням обтискання ε_h також спостерігається загальне збільшення значень інтенсивностей деформацій. Причому, мінімальне значення ε_i відповідає точці № 3, а максимальне – точці № 2. Слід зауважити, що в точці № 3, незважаючи на істотні значення полів інтенсивностей напружень, величини інтенсивностей деформацій порівняно невеликі, що пов'язано з незначним спотворенням сітки через вплив сил тертя на контакті інструменту і заготовки, що пластично деформується. При малих величинах R/D_0 значення ε_i у точці № 2 реєструються більше, ніж при більшому співвідношенні R/D_0. Зі збільшенням відношення R/D_0 при осаджуванні відбувається зростання значень ε_i у точці № 4.

3.1.2 При низькому профілі радіусних штампових вставок

Відношення висоти до діаметру заготовки H_0/D_0 = 1,0. При моделюванні використовували твердотільні моделі циліндричних заготовок з розмірами $H_0 \times D_0$ = 100×50 мм. Моделювали процес осаджування зі ступенями обтискання 20, 30, 40, 50, 60 і 70 %. Отримані дані заносили у табл. 3.3 і табл. 3.4.

На підставі отриманих даних будували графічні залежності зміни інтенсивностей напружень та інтенсивностей деформацій від ступеню деформації і радіусу випуклих бойків (штампових вставок).

У табл. 3.5 занесені графічні результати чисельного експерименту, які показують залежність розподілу інтенсивностей напружень та інтенсивностей деформацій по периферії осадженого напівфабрикату від радіусності при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками.

Аналізуючи графік $\varepsilon_i = f(\varepsilon_h; R/D_0)$ (див. рис. 3.5–3.9), необхідно відзначити, що із зростанням обтискання ε_h також спостерігається загальне збільшення значень інтенсивностей деформацій в усіх точках-маркерах, окрім точки №3, в якій через перерозподіл площі контакту робочого інструменту з заготовкою відзначається зниження інтенсивностей деформацій при високих значеннях ступеню деформації.

Причому найменше значення ε_i при максимальному обтисканні відповідає точці № 3, а максимальне – точці №1. Зі зменшенням величини R/D_0 значення ε_i у точках реєструються менші.

Таблиця 3.3 – Розподіл напружень у точках асиметрично осаджених зразків при відношенні R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25 та e = 12,5 мм

№ точки	ε=20%	ε=30%	ε=40%	ε=50%	ε=60%	ε=70%
	R=30 мм					
	σ_i, МПа					
1	53	48,1	42,1	42,7	41	24,6
2	22,6	20,8	22	35,9	47,3	47,3
3	50,1	51,4	44,7	40,6	39,3	52,9
4	48	46,9	41,6	38,5	40,2	38,2
5	47,2	45	40,2	37	39	40,5
	R=50 мм					
	σ_i, МПа					
1	53	49,3	43,5	42,7	40,8	28,8
2	23,1	23,1	23,1	45,1	51,1	46,9
3	45,5	51,6	53,1	38,4	37,8	51
4	47,3	49,4	44,3	39,2	40,3	37,5
5	46,5	48,2	44,8	37,9	39,2	36
	R=75 мм					
	σ_i, МПа					
1	52,8	48,3	41,9	41,7	42,4	30,3
2	20,8	18,8	21,2	30	44	39,3
3	45	52,3	46,6	39,6	39,8	48,2
4	50,8	49,3	42,2	38,7	40,9	37,7
5	49,2	48,6	41,5	37,6	39,2	36,2
	R=112,5 мм					
	σ_i, МПа					
1	52	50,5	44	43	42,9	38,5
2	19,1	17,2	20	27	37	35
3	42,4	46,5	47,9	38,4	38,1	43,5
4	49,9	49,8	43,4	38,2	38,2	36,1
5	48,6	48,7	42,8	37,5	37,2	39,3

Таблиця 3.4 – Розподіл деформацій у точках асиметрично осаджених зразків при відношенні R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25 та e = 12,5 мм

№ точки	ε=20%	ε=30%	ε=40%	ε=50%	ε=60%	ε=70%
	R=30 мм					
	ε_i					
1	0,000154	0,000294	0,00182	0,0048	0,0167	0,184
2	0,0225	0,0321	0,0344	0,0355	0,0322	0,0816
3	0,0031	0,0177	0,0273	0,0664	0,122	0,0067
4	0,00126	0,00203	0,0036	0,00714	0,0288	0,128
5	0,0013	0,00215	0,0058	0,0119	0,019	0,122
	R=50 мм					
	ε_i					
1	0,000352	0,000345	0,00134	0,00676	0,035	0,26
2	0,0226	0,0362	0,0362	0,0437	0,0456	0,116
3	0,00387	0,0245	0,0228	0,0821	0,0693	0,00482
4	0,00338	0,00296	0,00359	0,00857	0,0459	0,132
5	0,0035	0,00301	0,00364	0,00652	0,0362	0,1321
	R=75 мм					
	ε_i					
1	0,000675	0,000694	0,000696	0,00907	0,0482	0,355
2	0,0222	0,0284	0,0322	0,0366	0,0378	0,0781
3	0,00171	0,0167	0,0582	0,108	0,139	0,00483
4	0,00691	0,00823	0,00956	0,038	0,0783	0,137
5	0,0073	0,00843	0,00982	0,0321	0,0531	0,148
	R=112.5 мм					
	ε_i					
1	0,00404	0,00622	0,0127	0,0421	0,0907	0,386
2	0,0154	0,0195	0,0237	0,028	0,0305	0,034
3	0,00253	0,00255	0,0182	0,0545	0,0913	0,00302
4	0,0134	0,0217	0,034	0,0601	0,0938	0,147
5	0,0162	0,0252	0,039	0,064	0,0981	0,171

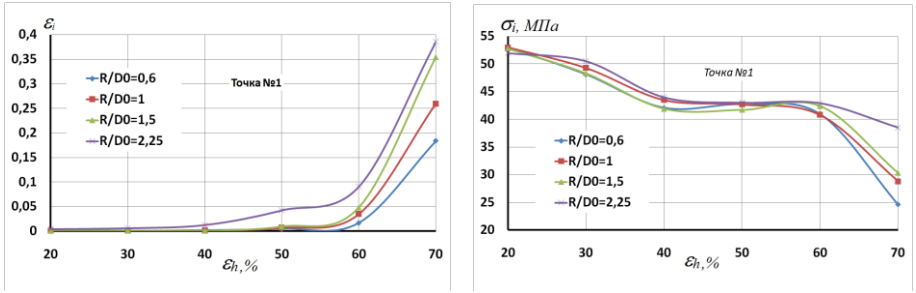


Рисунок 3.5 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) від відношення R/D_0 для точки №1

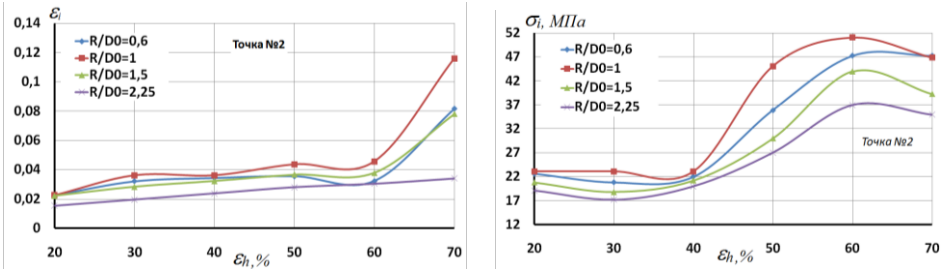


Рисунок 3.6 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) від відношення R/D_0 для точки №2

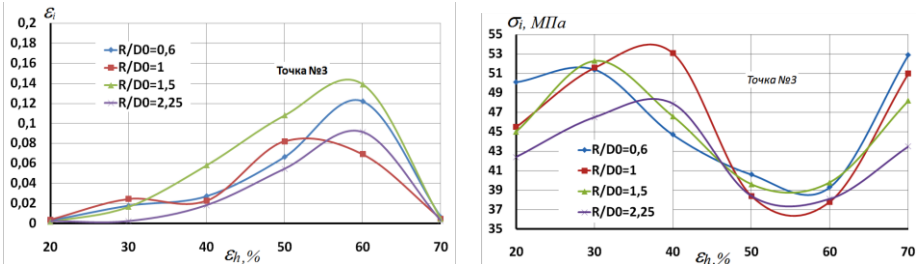


Рисунок 3.7 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) від відношення R/D_0 для точки №3

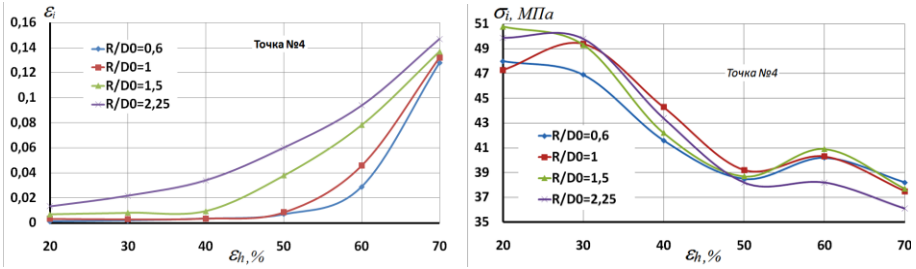


Рисунок 3.8 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) від відношення R/D_0 для точки №4

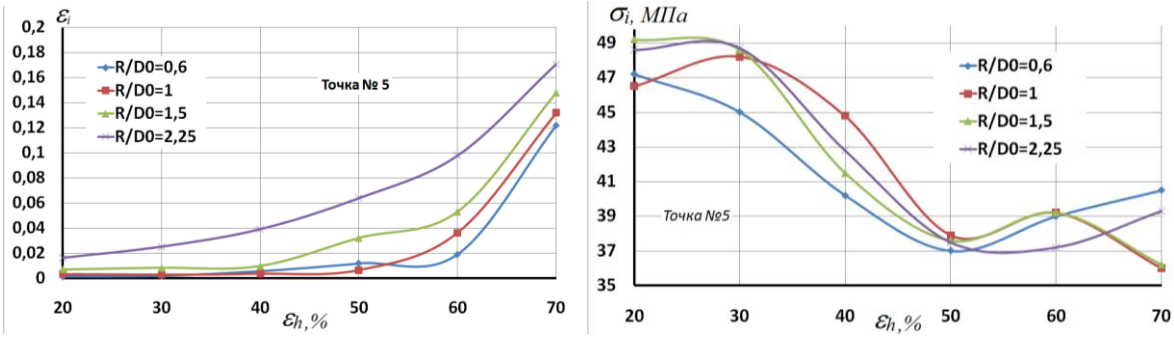
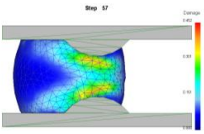
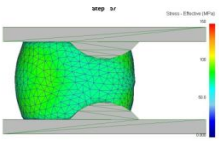
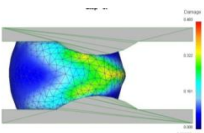
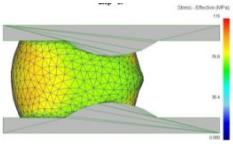
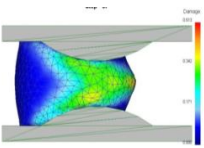
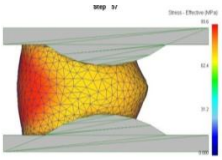
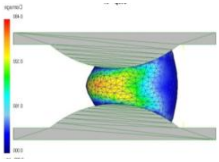
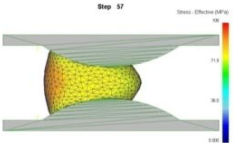


Рисунок 3.9 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) від відношення R/D_0 для точки №5

Таблиця 3.5 – Результати моделювання асиметричного осаджування заготовки (H_0 = 50 мм, D_0 = 50 мм) радіусними штамповими вставками до ε_h = 70 %

Радіус (відносний радіус) випуклості осаджувальних бойків	Інтенсивність деформацій, ε_i	Інтенсивність напружень, σ_i, МПа
R = 30 мм (R/D_0 = 0,6)		
R = 50 мм (R/D_0 = 1,0)		
R = 75 мм (R/D_0 = 1,5)		
R = 12,5мм (R/D_0 =2,25)		

Відношення висоти до діаметру заготовки H_0/D_0 = 2,0. При моделюванні використовували твердотільні моделі циліндричних заготовок з розмірами $H_0 \times D_0$ = 100×50 мм. Моделювали процес осаджування зі ступенями обтискання 20, 30, 40, 50, 60 і 70 %. Отримані дані заносили у табл. 3.6.

На підставі отриманих даних будували графічні залежності зміни інтенсивностей напружень та інтенсивностей деформацій від ступеню деформації і радіусу штампових вставок.

У табл. 3.8 занесені результати чисельного експерименту, які показують залежність розподілу інтенсивностей напружень та інтенсивностей деформацій по периферії осадженого напівфабрикату від радіусу випуклості осаджуваних бойків (штампових вставок) при асиметричному осаджуванні.

Аналізуючи графік $\varepsilon_i = f(\varepsilon_h; R/D_0)$, необхідно відзначити, що із зростанням обтискання ε_h також спостерігається загальне збільшення значень інтенсивностей деформацій. Причому найменші значення при максимальному обтисканні відповідають точці №3, а максимальні – точці №1. Зі збільшенням відношення R/D_0 при осаджуванні відбувається зростання значень ε_i. Значення інтенсивностей напружень у точках №1, №4 і №5 зі збільшенням ступеню деформації при асиметричному осаджуванні зменшуються, що пов'язано зі збільшенням площі контакту робочого інструменту з осаджувальною заготовкою.

3.2 Закономірності формозміни

3.2.1 При високому профілі радіусних штампових вставок

Відношення висоти до діаметру H_0/D_0 = 1,0. Дослідження проводили в пакеті Deform 3d. Об'єктом моделювання був процес асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) циліндричної заготовки з діаметром D_0 = 50 мм і висотою H_0 = 50 мм (відношення H_0/D_0 = 1,0).

Таблиця 3.6 – Розподіл напружень у точках асиметрично осаджених зразків при відношенні R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25 та e = 12,5 мм

№ точки	ε=20%	ε=30%	ε=40%	ε=50%	ε=60%	ε=70%
	R=30 мм					
	σ_i,МПа					
1	89,5	78,9	75,7	75,7	75,5	75,5
2	58,8	60,9	63,7	66,3	73,4	80,9
3	80,1	83,6	81,8	87,8	89	87,1
4	78	88,7	84,4	77,5	75,5	75,5
5	79,4	87,7	84,7	76,7	75,6	75,6
	R=50 мм					
	σ_i,МПа					
1	89,6	76,6	75,6	75,6	75,5	75,5
2	58,2	61	63,8	66,6	76,5	82,7
3	82,9	85	88,8	84,2	87	88,5
4	81,4	89,4	85,4	76,6	75,5	75,5
5	79,5	86,6	82,1	76,2	75,7	75,9
	R=75 мм					
	σ_i,МПа					
1	87,8	76,3	75,6	75,5	75,5	75,4
2	69	77	78,8	80,2	81,3	84,9
3	62,8	65,6	74,7	82,8	84,2	87,2
4	87,5	89,5	81,8	78,2	75,7	75,5
5	87,5	86,4	79,3	76,6	75,6	76
	R=112.5 мм					
	σ_i,МПа					
1	89,5	78,5	75,5	75,5	75,5	75,4
2	71,1	79,3	83	86	87,9	88,7
3	65,1	65,8	66,1	70,2	79,4	82,8
4	87,1	89,5	83,4	78,4	75,5	75,5
5	87,2	87,6	78,7	76,8	75,7	75,6

Таблиця 3.7 – Розподіл деформацій у точках асиметрично осаджених зразків при відношенні R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25 та e = 12,5 мм

№ точки	ε=20%	ε=30%	ε=40%	ε=50%	ε=60%	ε=70%
	R=30 мм					
	ε_i					
1	0,000364	0,00076	0,0008	0,00469	0,0739	0,0864
2	0,0213	0,0291	0,0339	0,038	0,0495	0,0815
3	0,0174	0,0262	0,0333	0,0129	0,02	0,0236
4	0,00126	0,00213	0,00648	0,0292	0,0646	0,125
5	0,00364	0,00343	0,00923	0,0114	0,0203	0,0333
	R=50 мм					
	ε_i					
1	0,000466	0,000463	0,00454	0,0679	0,231	0,344
2	0,0191	0,0239	0,0289	0,0324	0,0511	0,0913
3	0,00542	0,0056	0,00353	0,00629	0,00908	0,0194
4	0,00122	0,00298	0,0093	0,0517	0,13	0,273
5	0,00452	0,00436	0,00589	0,0172	0,0299	0,0394
	R=75 мм					
	ε_i					
1	0,000977	0,00421	0,0473	0,159	0,276	0,379
2	0,00581	0,0126	0,017	0,0194	0,0214	0,0376
3	0,0041	0,004	0,00614	0,00593	0,0156	0,0209
4	0,00154	0,00456	0,0142	0,0361	0,0638	0,312
5	0,00577	0,00765	0,0126	0,0205	0,0244	0,0243
	R=112,5 мм					
	ε_i					
1	0,000202	0,00108	0,0454	0,133	0,305	0,412
2	0,00699	0,0171	0,0291	0,0397	0,0522	0,0628
3	0,00851	0,0092	0,00709	0,00608	0,00809	0,00928
4	0,00174	0,00925	0,0276	0,0726	0,119	0,338
5	0,00436	0,00652	0,00905	0,0144	0,0125	0,0136

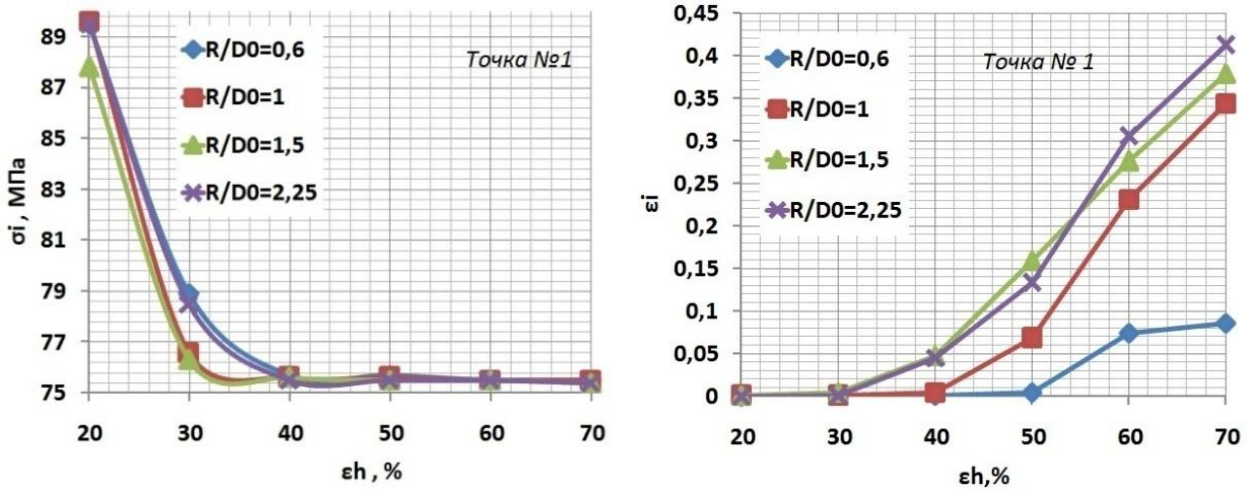


Рисунок 3.10 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) радіусними штамповими вставками від відношення R/D_0 для точки №1

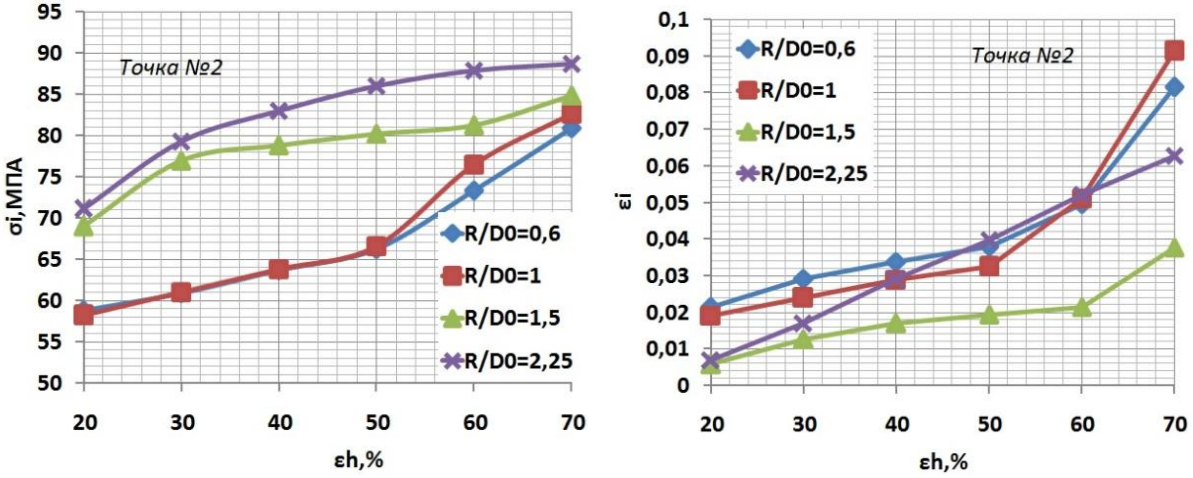


Рисунок 3.11 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) радіусними штамповими вставками від відношення R/D_0 для точки №2

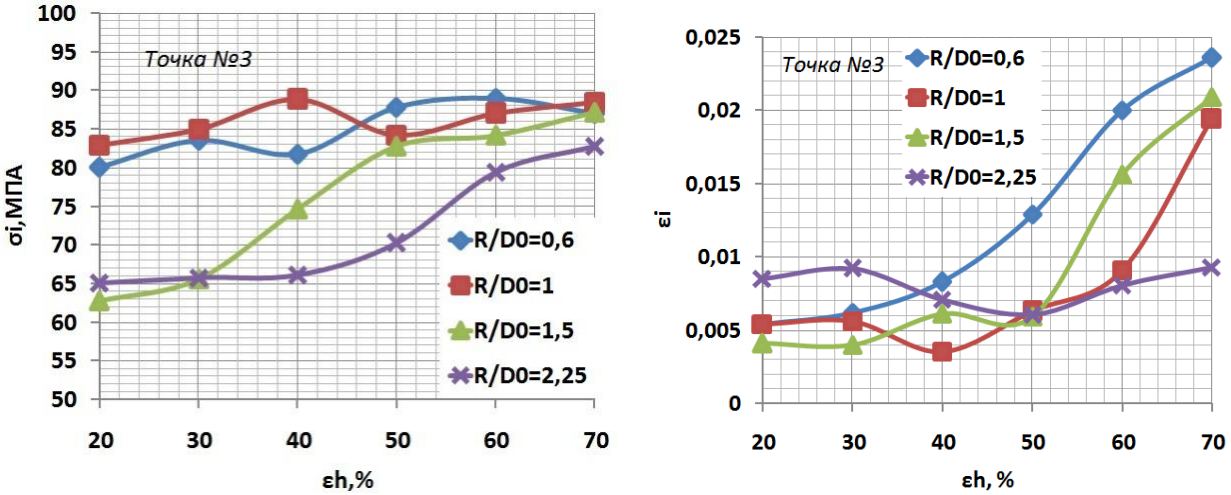


Рисунок 3.12 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) радіусними штамповими вставками від відношення R/D_0 для точки №3

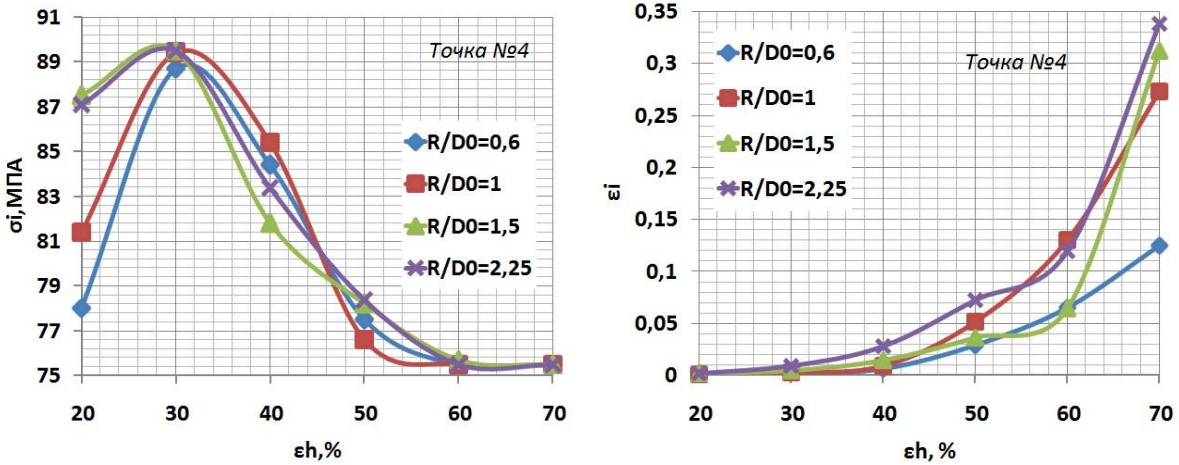


Рисунок 3.13 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) радіусними штамповими вставками від відношення R/D_0 для точки №4

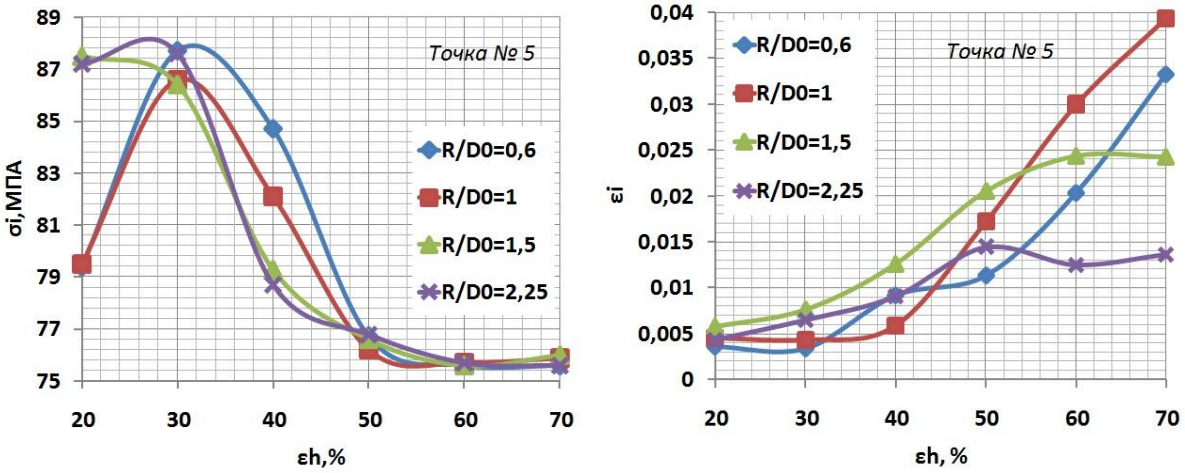
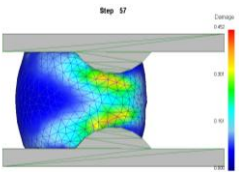
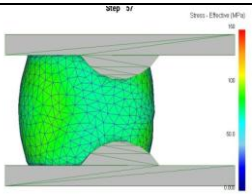
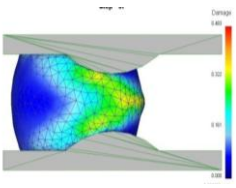
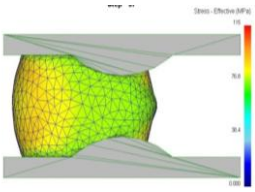
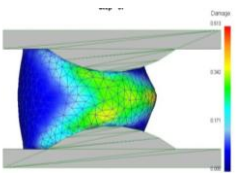
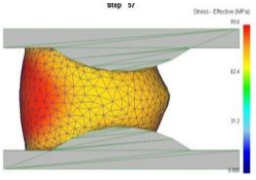
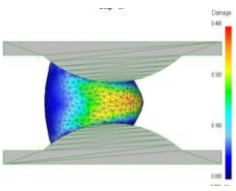
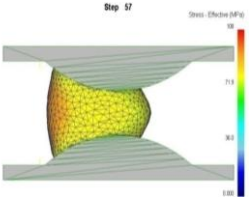


Рисунок 3.14 – Залежності розподілу інтенсивностей напружень (σ_i) та інтенсивностей деформацій (ε_i) у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) радіусними штамповими вставками від відношення R/D_0 для точки №5

Таблиця 3.8 – Результати моделювання асиметричного осаджування заготовки (H_0 = 50 мм, D_0 = 50 мм) радіусними штамповими вставками до ε_h = 70 %

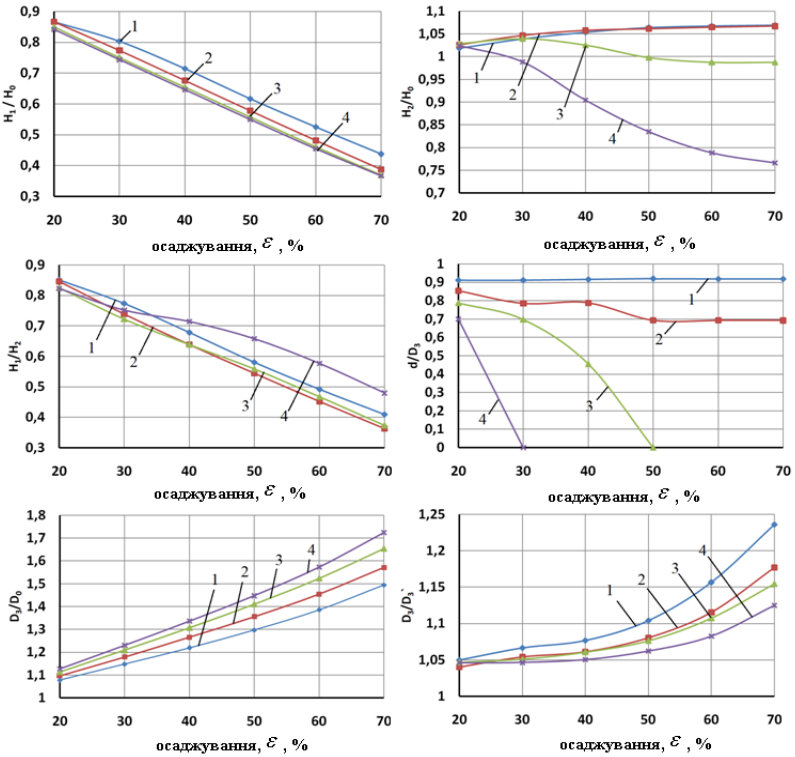
Радіус (відносний радіус) випуклості осаджувальних бойків	Інтенсивність деформацій, ε_i	Інтенсивність напружень, σ_i, МПа
R = 30 мм (R/D_0 = 0,6)		
R = 50 мм (R/D_0 = 1,0)		
R = 75 мм (R/D_0 = 1,5)		
R = 12,5мм (R/D_0 =2,25)		

Матеріал заготовки – Сталь 40, при цьому модель зміцнення, як і граничні умови, узяті відповідно до умов, запропонованих комп'ютерним пакетом. Температурні умови приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С. Задана кількість скінчених елементів складала 10000 шт., проте, після генерації сітки кількість елементів склала 7847 шт. Коефіцієнт контактного тертя при деформації приймали f = 0,3. У зв'язку з тим, що результати моделювання у широкому діапазоні відношення радіусу осаджувальних бойків R до діаметру заготовки D_0 передбачається перевірити експериментально шляхом осаджування на випробувальній машині, швидкість деформації прийнята υ = 1 мм/с.

Моделювали процес осаджування до відносних ступенів обтискання $\varepsilon_h = (\Delta h / H_0) \times 100\ \% = 70\ \%$. Значення асиметрії при осаджуванні, тобто неспівпадіння осі заготовки і вертикальної осі осаджувальних бойків, приймали e = 12,5 мм. Для дослідження формозміни заготовок запропонована схема контролю кінцевих розмірів профільованої заготовки (рис. 2.3). Відношення кінцевих геометричних розмірів заготовки є безрозмірними макропоказниками, що характеризують розвиток нерівномірності деформації у подовжньому, поперечному і висотному напрямках. За основні макропоказники прийняті (див. рис. 2.3): H_1/H_0; H_2/H_0; H_1/H_2; D_3/D_0; D_3/D_3'; d/D_3, де H_1 і H_2 висота крайових ділянок напівфабрикату після осаджування, D_3 і D_3' – діаметри напівфабрикату по довжині та ширині після осаджування, d – ширина приторцевої зони між точками A_1 і A_2 (див. рис. 2.3). Дослідження формозміни проводили у діапазоні ступенів обтискань ε_h від 20 % до 70 %. Для визначення впливу величини радіусу R випуклості осаджувальних бойків на параметри формозміни приймали значення

R = 30 мм; 50 мм; 75 мм и 112,5 мм, тобто відносний радіус складав R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 и 2,25.

Результати моделювання зміни прийнятих макропоказників у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) радіусними штамповими вставками з різним відношенням R/D_0 представлені на рис. 3.15 [162].



1 – R/D_0 = 0,6; 2 – R/D_0 = 1,0;
3 – R/D_0 = 1,5; 4 – R/D_0 = 2,25

Рисунок 3.15 – Залежності макропоказників формозміни при асиметричному осаджуванні (e = 12,5 мм)заготовок з H_0/D_0 = 1,0 [162]

Графік залежності $H_1/H_0 = f\,(R/D_0;\ \varepsilon_h)$ при e = 12,5 мм показує, що при значеннях $R/D_0 > 1{,}5$ вплив радіусу випуклості бойків на зміну цього макропоказника при осаджуванні до ε_h = 70 % є незначним за рахунок того, що торець заготовки в правій частині повністю обтікає поверхню деформуючого інструменту, і плин металу, спрямований у бік, протилежний до зміщення асиметрії вдавлювання штампових вставок у торець заготовки. У той же час показник, що характеризує деформацію лівої частини при співвідношенні R/D_0 = 1,5 і 2,25 починає зростати, як показує графік залежності $H_2/H_0 = f\,(R/D_0;\ \varepsilon_h)$. Криві графіку залежності $H_1/H_2 = f\,(R/D_0;\ \varepsilon_h)$ при e = 12,5 мм свідчать про те, що інтенсивність плину металу від осі зміщення асиметрії вдавлювання радіусних штампових вставок у торець заготовки є більшою при відношенні R/D_0 = 2,25. Це приведе до повного обтікання торцями напівфабрикату контактної поверхні випуклих бойків, що видно з графіку залежності $d/D_3 = f\,(R/D_0;\ \varepsilon_h)$.

Відношення висоти до діаметру H_0/D_0 = 2,0. Заготовки з відношенням $H_0/D_0 > 1{,}0$ називають відносно високими через особливості напружено-деформованого стану (зменшення впливу умов контактного тертя на напружено-деформований стан заготовки). Заздалегідь отримані дані свідчать про те, що асиметричне осаджування радіусними штамповими вставками заготовок з відношенням $H_0/D_0 > 1{,}5$ супроводжується поздовжнім згином [163]. Це явище доцільно покласти в основу технологічних рішень з виробництва поковок із зігнутою віссю, проте, закономірності формозміни відносно високих заготовок при профілюванні осаджуванням випуклими бойками з асиметрією вдавлювання радіусних штампових вставок в торці заготовки до теперішнього часу не вивчені.

Дослідження проводили з використанням пакету для скінчено-елементного аналізу Deform 3d. Об'єктом

моделювання був процес осаджування циліндричної заготовки з діаметром D_0 = 50 мм і висотою H_0 = 100 мм (відношення H_0/D_0 = 2,0). Матеріал заготовки – Сталь 40, при цьому модель зміцнення матеріалу для широкого діапазону температурно-швидкісних умов, як і граничні умови, прийняті у виді, рекомендованому комп'ютерним пакетом. Температурні умови приймали ізотермічними. Температура деформації 1100 °С, що відповідає першому переходу штампування – профілювання. Задана кількість скінчених елементів складала 10000 шт., проте, після генерації сітки, кількість елементів склала 8242 шт. Коефіцієнт контактного тертя при деформації, приймали f = 0,3. Результати моделювання у широкому діапазоні відношення радіусу осаджувальних бойків R до діаметру заготовки D_0 передбачається, в перспективі, перевірити експериментально шляхом осаджування на випробувальній машині, тому швидкість деформування приймали υ = 1 мм/с.

Моделювали процес осаджування до відносних ступенів обтискання $\varepsilon_h = (\Delta h / H_0) \times 100\%$ = 70 %. Значення асиметрії при осаджуванні, тобто неспівпадіння осі заготовки та вертикальної осі осаджувальних плит, приймали e = 12,5 мм Для дослідження формозміни заготовок запропоновано схему контролю кінцевих розмірів профільованої заготовки. Відношення кінцевих геометричних розмірів заготовки є безрозмірними показниками, які характеризують розвиток нерівномірності деформації у подовжньому, поперечному і висотному напрямах. За основні показники прийняті відношення (рис. 2.3): H_1/H_0; H_2/H_0; H_1/H_2; D_3/D_0; D_3/D_3'; d/D_3, де H_1 і H_2 − висота крайових ділянок напівфабрикату після осаджування, D_3 та D_3' − діаметральні розміри напівфабрикату в центральній зоні по довжині та ширині після осаджування, d – ширина приторцевої зони.

Дослідження формозміни проводили у діапазоні ступенів обтискань ε_h від 20 до 70 %. Для визначення впливу

величини радіусу R випуклості осаджувальних бойків на параметри формозміни використовували бойки із значенням радіусів R = 30; 50; 75 і 112,5 мм, тобто відносний радіус складав R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25.

Результати моделювання зміни прийнятих макропоказників у процесі асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) радіусними штамповими вставками із різним відношенням R/D_0 представлені на рис. 3.16 [164].

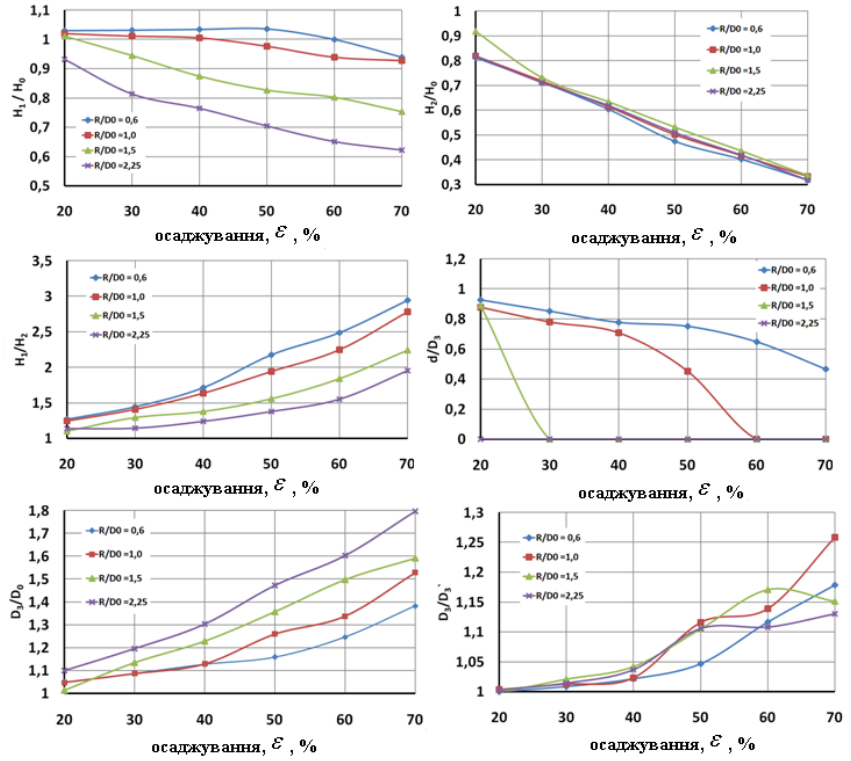


Рисунок 3.16 – Залежності макропоказників формозміни при асиметричному осаджуванні (e = 12,5 мм) заготовок радіусними штамповими вставками [164]

Графік залежності $H_1 / H_0 = f(R / D_0; \varepsilon)$ при e = 12,5 мм показує, що при значеннях від R / D_0 = 0,6 до R / D_0 = 2,25 відбувається пропорційне зменшення висоти крайової ділянки протилежної до напряму зміщення асиметрії вдавлювання радіусних штампових вставок у торці заготовки. Проте, при значеннях R / D_0 < 2,25 і ступеню деформації ε > 60 % значення параметра H_1 зростає за рахунок обтікання металом поверхні робочого інструменту. У той же час, значення показника $H_2 / H_0 = f(R / D_0; \varepsilon)$ із зростанням ступеню обтискання зменшується, а вплив параметра R / D_0 зменшується.

3.2.2 При низькому профілі радіусних штампових вставок

Відношення висоти до діаметру H_0/D_0 = 1,0. Дослідження проводили з використанням пакету для скінченоелементного аналізу Deform 3d. Об'єктом моделювання був процес осаджування циліндричних заготовок з діаметром D_0 = 50 мм і висотою H_0 = 100 мм (відношення H_0/D_0 = 1,0). Матеріал заготовки – Сталь 40, при цьому модель зміцнення матеріалу для широкого діапазону температурно-швидкісних умов, як і граничні умови, прийняті у вигляді, рекомендованому комп'ютерним пакетом для моделювання. Температурні умови приймали ізотермічними. Температура деформації 1100 °С, що відповідає першому переходу штампування – профілювання. Задана кількість скінчених елементів складала 10000 шт., проте, після генерації сітки кількість елементів склала 8242 шт. Коефіцієнт контактного тертя при деформації, приймаємо f = 0,3. Результати моделювання в широкому діапазоні відношення радіусу осаджувальних бойків R до діаметру заготовки

D_0 передбачається, в перспективі, перевірити експериментально шляхом осаджування на випробувальній машині, тому швидкість деформації приймали υ = 1 мм/с.

Моделювали процес осаджування до відносних ступенів обтискання $\varepsilon_h = \left(\Delta h / H_0\right) \times 100\%$ = 70 %. Значення асиметрії при осаджуванні приймали e = 12,5 мм. Відношення кінцевих геометричних розмірів заготовки є безрозмірними показниками, що характеризують розвиток нерівномірності деформації в подовжньому, поперечному і висотному напрямах. За основні показники прийняті відношення (рис. 1): H_1/H_0; H_2/H_0; H_1/H_2; D_3/D_0; D_3/D_3'; d/D_3, де H_1 і H_2 − висота крайових ділянок напівфабрикату після осаджування, D_3 і D_3' − діаметральні розміри напівфабрикату в центральній зоні по довжині та ширині після осаджування, d – ширина приторцевої зони.

Дослідження формозміни проводили у діапазоні ступенів обтискань ε_h від 20 до 70 %. Для визначення впливу величини радіусу R випуклості осаджувальних бойків на параметри формозміни їх значення приймали: R = 30; 50; 75 і 112,5 мм, тобто відносний радіус складав R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25.

Результати моделювання зміни прийнятих макропоказників у процесі осаджування випуклими бойками з різним відношенням R/D_0 і ексцентриситетом навантаження e = 12,5 мм представлені на рис. 3.17.

Графік залежності $H_1/H_0 = f(R/D_0; \varepsilon_h)$ при e = 12,5 мм показує, що при значеннях від R/D_0 = 0,6 до R/D_0 = 2,25 відбувається пропорційне зменшення висоти крайової ділянки протилежного до напряму зміщення асиметрії вдавлювання радіусних штампових вставок у торці заготовок. Проте при значеннях R/D_0 > 2,25 і ступеню деформації

ε_h > 60 % значення параметра H_1 зростає за рахунок обтікання металу поверхні робочого інструменту. У той же час, значення показника $H_2 / H_0 = f(R/D_0; \varepsilon_h)$ із зростанням ступеню обтискання зменшується. Відбувається формування напівфабрикату з нерівномірним діжкоутворенням.

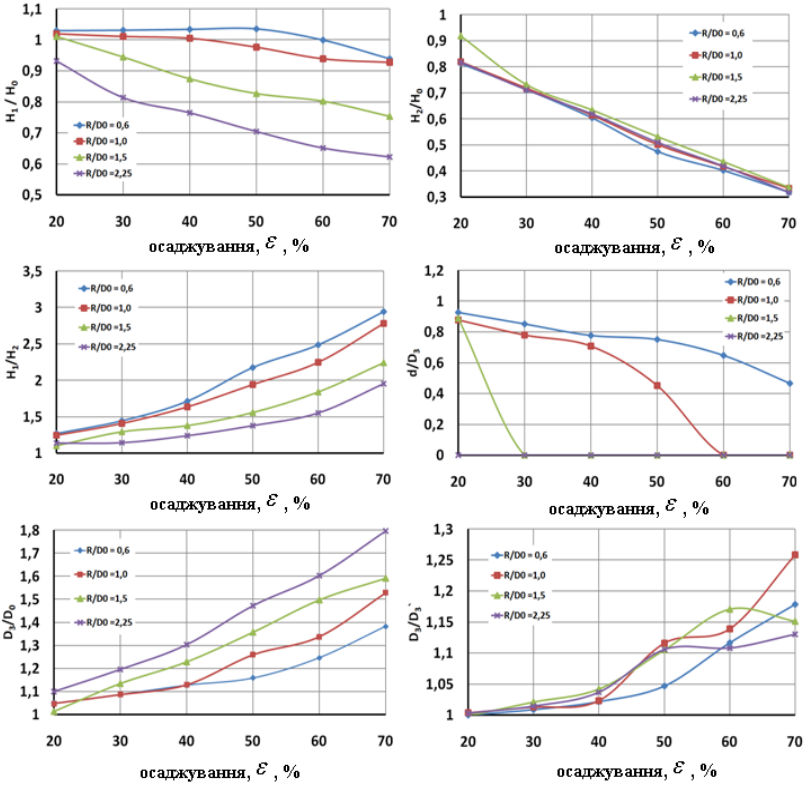


Рисунок 3.17 – Залежності макропоказників формозміни при асиметричному осаджуванні (*e* = 12,5 мм) заготовок радіусними штамповими вставками H_0/D_0 = 1,0

Відношення висоти до діаметру H_0/D_0 = 2,0. Дослідження проводили аналогічно, як і для випадку осаджування заготовки з H_0/D_0 = 1,0.

За основні показники прийняті відношення (рис. 3.18): H_1 / H_0; H_2 / H_0; H_1 / H_2; D_3 / D_0; D_3 / D'_3; d / D_3, де H_1 і H_2 − висота крайових ділянок напівфабрикату після осаджування, D_3 і $D_3^{/}$ − діаметральні розміри напівфабрикату в центральній зоні по довжині таі ширині після осаджування, d – ширина приторцевої зони.

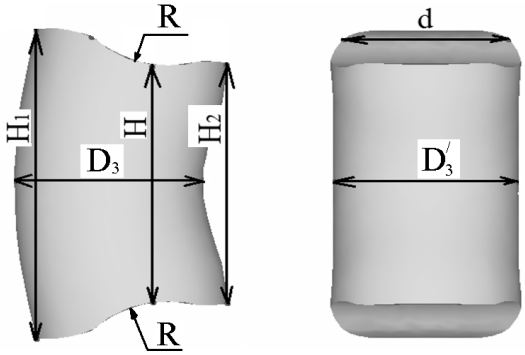


Рисунок 3.18 – Твердотільна модель заготовки після осаджування H_0/D_0 = 2,0

Дослідження формозміни проводили у діапазоні ступенів обтискань ε_h від 20 % до 70 %. Для визначення впливу величини радіусу R випуклості осаджувальних бойків на параметри формозміни приймали: R = 30; 50; 75 і 112,5 мм, тобто відносний радіус складав R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25.

Результати моделювання зміни прийнятих макропоказників в процесі осаджування випуклими бойками з різ-

ним відношенням R / D_0 і асиметрією навантаження e = 12,5 мм представлені на рис. 3.19.

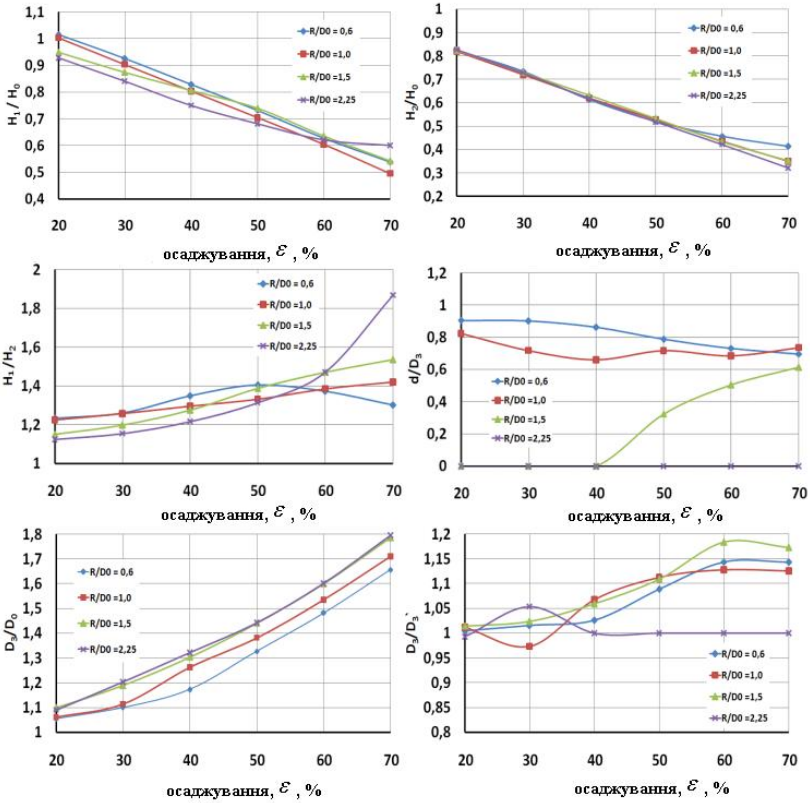


Рисунок 3.19 – Залежності макропоказників формозміни при асиметричному осаджуванні (e = 12,5 мм) заготовок радіусними штамповими вставками (H_0/D_0 = 2,0)

Графік залежності $H_1 / H_0 = f(R / D_0; \varepsilon)$ показує, що при значеннях від R/D_0 = 0,6 до R/D_0 = 2,25 відбувається розширення напівфабрикату в подовжньому і поперечному напрямі. За рахунок відношення початкової висоти до по-

чаткового діаметру заготовки $H_0 / D_0 > 1{,}5$ напівфабрикат отримує поздовжній згин і зменшення показника висоти H_2 відбувається за рахунок збільшення значення подовжнього згину.

3.3 Силові режими осаджування радіусними штамповими вставками

Дослідження проводили з використанням пакету Deform 3d. Об'єктом моделювання був процес асиметричного осаджування циліндричних заготовок з діаметром D_0 = 50 мм, висотою H_0 = 50 мм і H_0 = 100 мм (відношення H_0 / D_0 = 1,0 і 2,0). Матеріал заготовки – Сталь 40, при цьому модель зміцнення, як і граничні умови, приймали такі, що запропоновані пакетом. Температурні режими приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С. Задана кількість скінчених елементів складала 10000 шт. Коефіцієнт контактного тертя приймали f = 0,3.

Моделювали процес осаджування заготовок до відносних ступенів обтискання ε_h = 50 %, мм (рис. 3.20). Значення асиметрії при осаджуванні e = 0 мм і e = 12,5 мм (рис. 3.21). Для встановлення впливу геометричних параметрів на енергосилові показники асиметричного осаджування розглядали варіант деформування з різним радіусом R випуклості вставок і з обмеженням висоти опуклості профілю штампових вставок від максимальної величини $h_{p.max} = R$ до мінімального значення $h_{p.min} = R/4$. Відносний радіус складав R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25.

Були побудовані графіки зміни сили осаджування заготовок з різними значеннями відносного радіусу R / D_0 бойків (рис. 3.22).

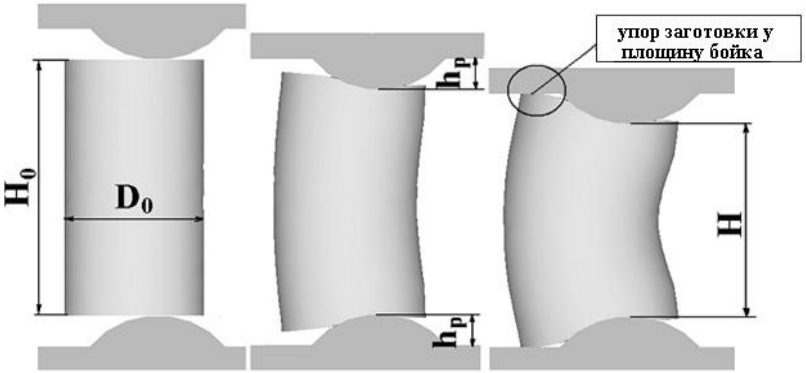
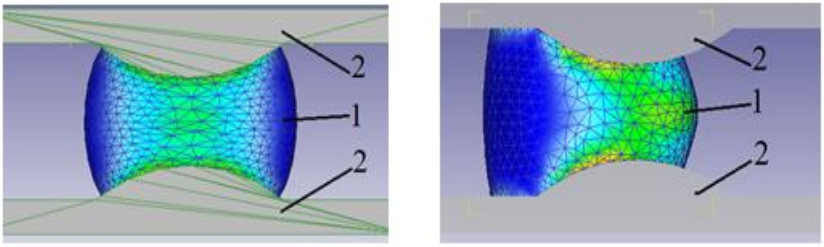


Рисунок 3.20 – Процес осаджування зі штучним упором

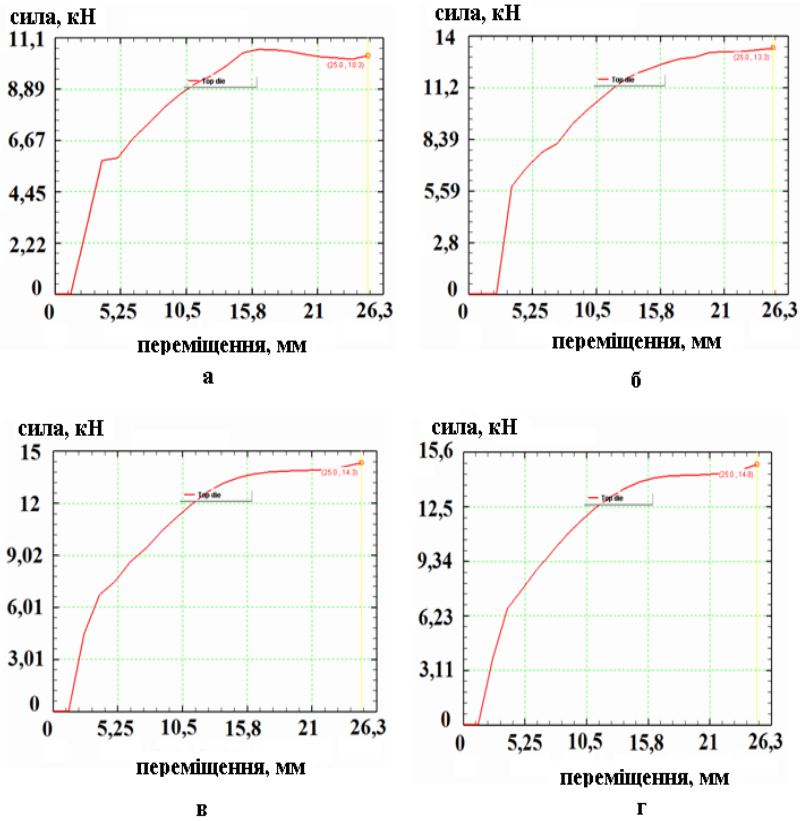


а б

а – без ексцентриситету e = 0 мм;
б – з ексцентриситетом e = 12,5 мм [165]

Рисунок 3.21 – Твердотільна модель заготовки (1) після осаджування випуклими бойками (2)

Надалі результати моделювання були зведені в узагальнені графічні залежності силових режимів осаджування без асиметрії (рис. 3.23) і з асиметрією (рис. 3.24) від ступеню обтискання [165].

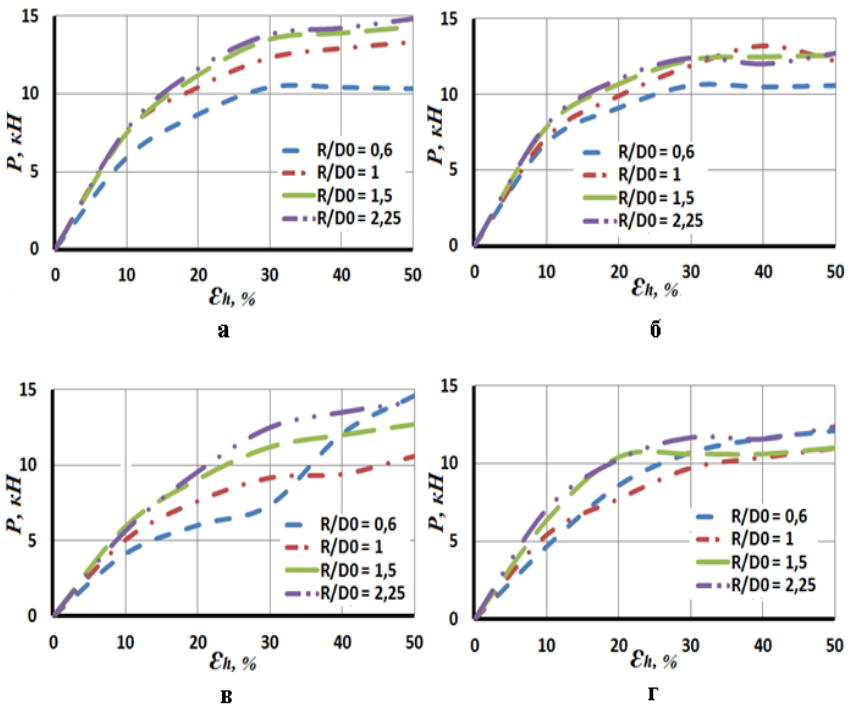


а – R/D_0 = 0,6; б – R/D_0 = 1,0;
в – R/D_0 = 1,5; г – R/D_0 = 2,25

Рисунок 3.22 – Графіки зміни сили осаджування заготовки з H_0 = 50 мм без ексцентриситету при $h_{p.\max} = R$ [165]

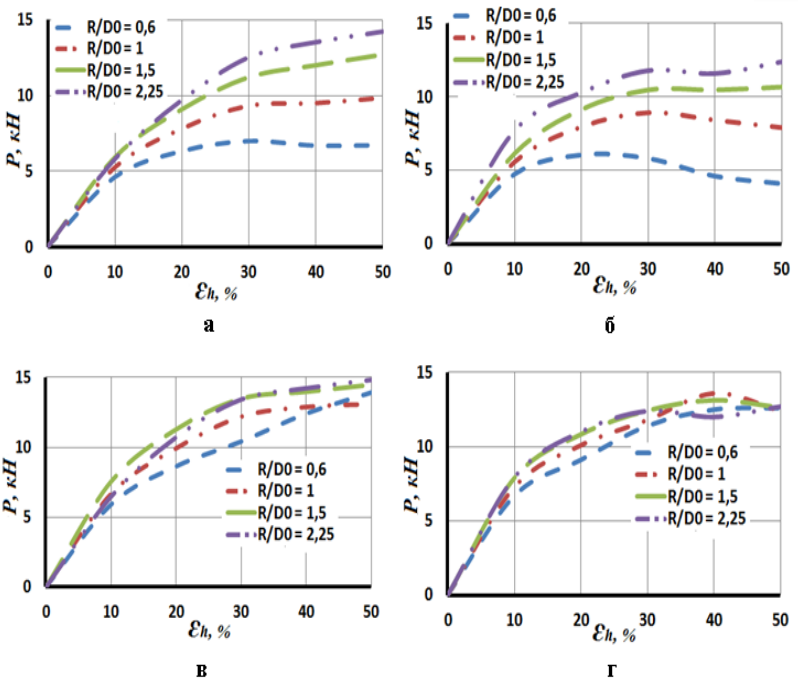
З графіків на рис. 3.23 і рис. 3.24 видно, що застосування штучного обмеження випуклості профілю бойка від максимального $h_{p.max} = R$ до мінімального значення $h_{p.min} = R/4$ призводить до зростання необхідної сили осаджування при значеннях R/D_0 = 0,6 і 1,0. Це пов'язано з

виникненням додаткових поверхонь контакту заготовки з площиною бойка при $h_{p.\min} = R/4$, тобто зі збільшенням площі контактної поверхні. При значеннях R/D_0 = 1,5 і 2,25, у випадку обмеження профілем бойка, контакту заготовки з плоскою поверхнею деформуючого інструменту не виникає.



а – $h_{p.\max} = R$, $H_0/D_0 = 1$; б – $h_{p.\max} = R$, $H_0/D_0 = 2$;
в – $h_{p.\min} = R/4$, $H_0/D_0 = 1$; г – $h_{p.\min} = R/4$, $H_0/D_0 = 2$

Рисунок 3.23 – Графіки залежності сили осаджування P від ступеню деформації ε_h за відсутності асиметрії (e = 0)



а – $h_{p.\max} = R$, $H_0/D_0 = 1$; б – $h_{p.\max} = R$, $H_0/D_0 = 2$;
в – $h_{p.\min} = R/4$, $H_0/D_0 = 1$; г – $h_{p.\min} = R/4$, $H_0/D_0 = 2$

Рисунок 3.24 – Графіки залежності сили осаджування P від ступеню деформації ε_h з максимальним значенням асиметрії ($e = 0{,}25D_0$)

За результатами моделювання також був проведений аналіз енергосилових режимів асиметричного осаджування (e = 12,5 мм) циліндричних заготовок радіусними штамповими вставками і побудовані графіки залежності сили осаджування (P) від відношення R/D_0 при різному відносному ступеню деформації ε_h (рис. 3.25), табл. 3.9–3.12.

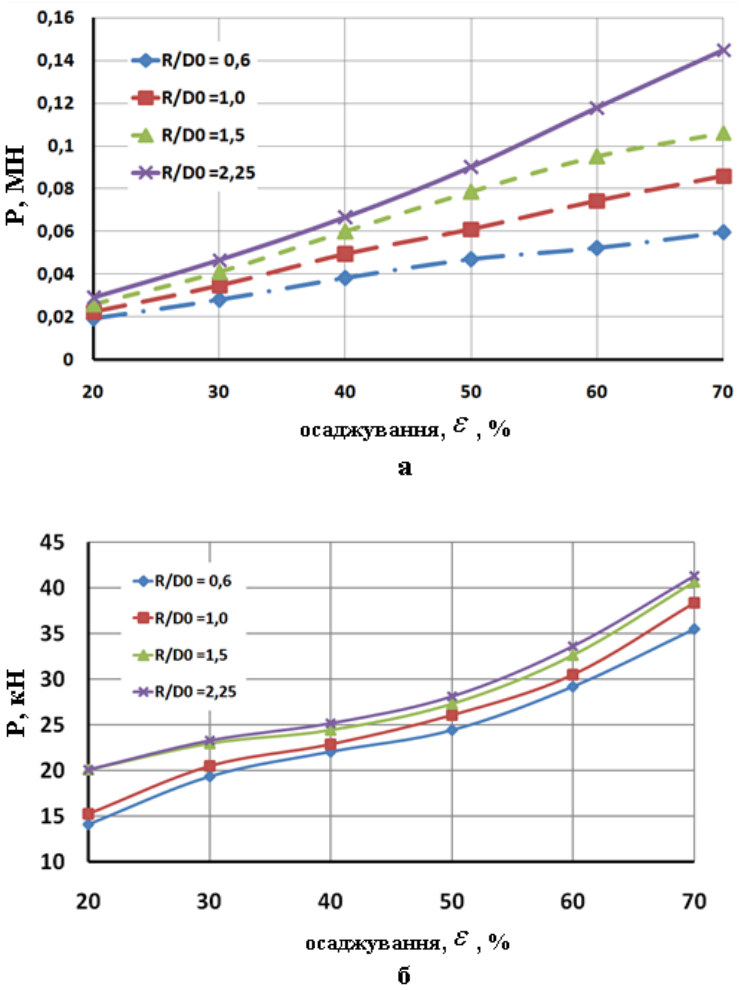


Рисунок 3.25 – Графік залежності сили при асиметричному осаджуванні циліндричних заготовок радіусними штамповими вставками (e = 12,5 мм) від ступеню деформації і відношення радіусу випуклих бойків R і початкового діаметру заготовки D_0 при H_0/D_0 = 1,0 (а) і H_0/D_0 = 2,0 (б)

Таблиця 3.9 – Зміна сили осаджування при R/D_0 = 0,6, e = 12,5 мм

ε_h,%	P, kH	P, МН
20	19,1	0,0191
30	27,8	0,0278
40	38,1	0,0381
50	46,8	0,0468
60	52,1	0,0521
70	59,5	0,0595

Таблиця 3.10 – Зміна сили осаджування при R/D_0 = 1, e = 12,5 мм

ε_h,%	P, kH	P, МН
20	22,4	0,0224
30	34,5	0,0345
40	49,3	0,0493
50	61,1	0,0611
60	74,4	0,0744
70	86	0,086

Таблиця 3.11 – Зміна сили осаджування при R/D_0 = 1,5, e = 12,5 мм

ε_h,%	P, kH	P, МН
20	25,7	0,0257
30	40,8	0,0408
40	59,8	0,0598
50	78,4	0,0784
60	94,9	0,0949
70	106	0,106

Таблиця 3.12 – Зміна сили осаджування при R/D_0 = 2,25, e = 12,5 мм

ε_h,%	P, kH	P, МН
20	28,9	0,0289
30	46,6	0,0466
40	66,5	0,0665
50	90	0,09
60	118	0,118
70	145	0,145

3.4 Встановлення залежностей показників формозміни від впливаючих факторів

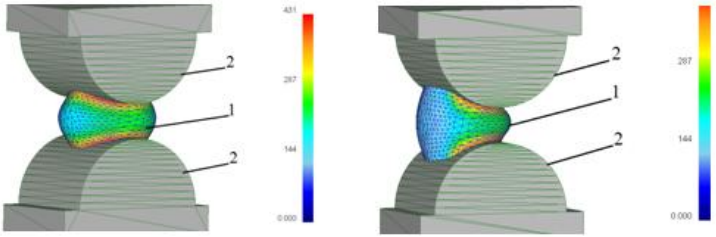
3.4.1 Висока висота профілю штампових вставок

Для досягнення вказаної мети досліджень виконували моделювання процесу осаджування заготовок у комп'ютерному пакеті скінчено-елементного аналізу Deform 3d. Матеріал заготовки – Сталь 38ХС, при цьому модель зміцнення, як і граничні умови, узяті відповідно до

умов, запропонованих пакетом. Температурні умови приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С. Задана кількість скінчених елементів складала 10000 шт., проте, після генерації сітки кількість елементів була прийнята 7847 шт. Коефіцієнт контактного тертя при деформації приймали f = 0,3.

У зв'язку з тим, що результати моделювання у широкому діапазоні відношення радіусу осаджувальних бойків R до діаметру заготовки D_0 передбачається перевірити експериментально шляхом осаджування на випробувальній машині, швидкість деформації прийнята υ = 1 мм/с. Моделювали процес осаджування до відносних ступенів обтискання $\varepsilon_h = (H_0 - H)/H_0 = 0{,}5$. Твердотільні моделі осаджених заготовок представлені на рис. 3.26.

Виділяли основні показники формозміни і встановлювали їх залежність від ступеню осаджування (ε_h), відношення радіусу опуклих плит до діаметру заготовки (R/D_0), відношення початкових розмірів заготовки (H_0/D_0) і величини асиметрії вдавлювання у торці заготовки (e) [166].

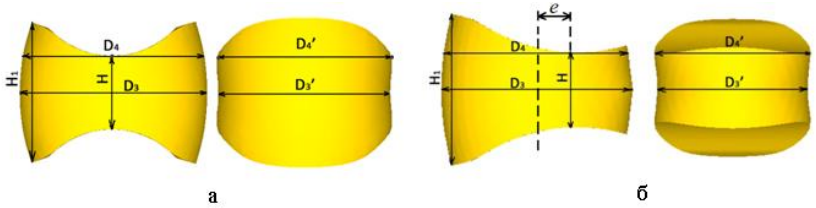


а б

а – без асиметрії e = 0 мм; б – з асиметрією e = 12,5 мм

Рисунок 3.26 – Твердотільна модель заготовки (1) після осаджування радіусними штамповими вставками (2)

Вивчення формозміни доцільно провести при максимальній величині асиметрії e = 0,25D_0 і e = 0. Відношення кінцевих геометричних розмірів заготовки є безрозмірними макропоказниками, що характеризують розвиток нерівномірності деформації в подовжньому, поперечному і висотному напрямах. За основні макропоказники прийняті (рис. 3.27, а і б): $Y_1 = H_1 / H_0$, $Y_2 = H / H_0$, $Y_3 = H_1 / H$, $Y_4 = D_3' / D_0$, $Y_5 = D_3' / D_0$, $Y_6 = D_4 / D_0$, $Y_7 = D_4' / D_0$, де H_1 – висота крайової ділянки напівфабрикату після осаджування, H – найменша висота профільованого напівфабрикату після осаджування, D_3 і D'_3 – подовжній і поперечний розміри напівфабрикату після осаджування на середині його висоти, D_4 і D'_4 – подовжній і поперечний розмір напівфабрикату в зоні контакту робочого інструменту із заготовкою після осаджування (див. рис. 3.27). Дослідження формозміни проводили в діапазоні ступенів обтискань ε_h від 0,2 до 0,5.



а – без асиметрії e = 0; б – з асиметрією e = 0,25 D_0 [166]

Рисунок 3.27 – Схема обміру заготовки після осаджування радіусними штамповими вставками

За даними моделювання були розраховані макропоказники формозміни, які використані в подальшому розрахунку і складанні рівнянь регресії. В якості основних факторів, що впливають на формозміну, були виділені: ε_h (фа-

ктор X_1) – відносна ступінь деформації; R/D_0 (X_2) – відношення радіусу деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки; H_0/D_0 (X_3) – відношення початкових розмірів заготовки; e/D_0 (X_4) – відношення величини асиметрії навантаження до початкового діаметру заготовки.

Значення факторів варіювали на двох рівнях. Рівні та інтервали варіювання факторів представлені у табл. 3.13.

Таблиця 3.13 – Дані повного факторного експерименту [166]

Фактори	ε_h	R/D_0	H_0/D_0	e/D_0
Позначення фактора, X_i	X_1	X_2	X_3	X_4
Нижній рівень, $X_{i\text{н}}$	0,2	0,6	1	0
Верхній рівень, $X_{i\text{в}}$	0,5	2,25	2	0,25
Нульовий рівень, X_{i0}	0,35	1,425	1,5	0,125
Інтервал варіювання, ΔX_i	0,15	0,825	0,5	0,125

У монографії розглядали лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій. В якості плану обчислювального експерименту використали дворівневий повнофакторний експеримент (ПФЕ) 2^4. Для реалізації такого експерименту використали програму Experimental Design (див. рис. 3.28), розроблену у ДВНЗ "ПДТУ".

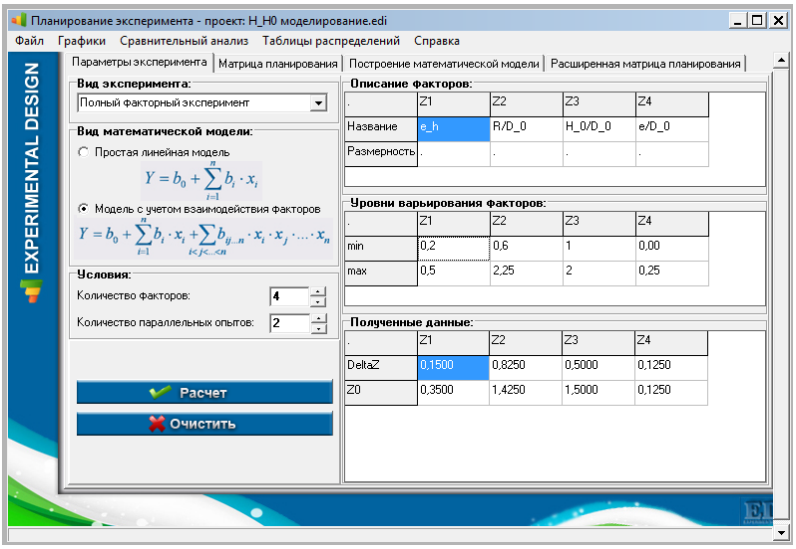


Рисунок 3.28 – Інтерфейс програми Experimental Design

Математичну модель процесу, що має вигляд:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4). \qquad (3.1)$$

запишемо у вигляді лінійного рівняння регресії з урахуванням усіх взаємодій:

$$\begin{aligned} Y = {} & b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_1 X_2 + \\ & + b_6 \cdot X_1 X_3 + b_7 \cdot X_1 X_4 + b_8 \cdot X_2 X_3 + b_9 \cdot X_2 X_4 + b_{10} \cdot X_3 X_4 + \\ & + b_{11} \cdot X_1 X_2 X_3 + b_{12} \cdot X_1 X_2 X_4 + b_{13} \cdot X_1 X_3 X_4 + b_{14} \cdot X_2 X_3 X_4 + \\ & + b_{15} X_1 X_2 X_3 X_4 \end{aligned} , \qquad (3.2)$$

де b_i – коефіцієнти рівняння в кодованому масштабі, що визначають як:

$$b_j = \sum_{i=1}^{N} Y_i X_{ji} / N, \quad j = 0,1...k, \qquad (3.3)$$

де $N = 2^k$ – число дослідів в експерименті (тут k – число факторів).

Кодовані значення факторів на верхньому $Z_{зв}$ і нижньому $Z_{зн}$ рівнях:

$$Z_{iв} = (X_{iв} - X_{i0}) / \Delta X_i; \quad Z_{iн} = (X_{iн} - X_{i0}) / \Delta X_i. \qquad (3.4)$$

Виконували реалізацію моделювання згідно з планом повного факторного експерименту за методикою планування 2^4 з повною взаємодією факторів. Методика планування експерименту припускає наявність паралельних дослідів з перевіркою гіпотези однорідності дисперсій S^2 [167, 168]. Проте, проведення обчислень у процесі математичного моделювання обумовлює відсутність ймовірного розкиду результатів. Для забезпечення можливості обробки результатів обчислень по відомих методиках [167, 168] вводили малу дисперсію S^2 = 0,0001 виходячи з гіпотетичного припущення проведення двох паралельних дослідів. Задавалися рівнем надійності α = 0,95. Тоді табличне значення критерію Кохрена для моделювання формозміни сталевих заготовок $G_{табл}$ = 0,4546 [167, 168]. Дисперсії вважають однорідними, коли розрахункове значення $G_р < G_{табл}$, що вимагає перевірки. При постійному значенні внесеної дисперсії $S^2 = S^2_{max}$ = 0,0001 розрахункових значень $G_р$ = 0,0625 < $G_{табл}$ = 0,4546. Отже, внесені дисперсії однорідні. Критичні значення критеріїв Фішера для оцінки адекватності регресійної моделі [167, 168]: $F_{кр}$ = 3,24. У разі, коли розрахунковий критерій Фішера F менший за критичний, тобто $F < F_{кр}$, модель є адекватною. Оцінку кожного коефіцієнту рівнянь регресії проводили за критерієм Ст'юдента, які визначені як [167, 168]: $t_{(\alpha,f)}$ = 2,12. Прово-

дили моделювання значень макропоказників формозміни: Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7.

Перехід від кодованих значень до натуральних виконували як:

$$X_1 = \frac{\varepsilon_h - 0{,}35}{0{,}15}; \quad X_2 = \frac{\dfrac{R}{D_0} - 1{,}425}{0{,}825}; \tag{3.5}$$

$$X_3 = (H_0 / D_0 - 1{,}5) / 0{,}5; \quad X_4 = (e / D_0 - 0{,}125) / 0{,}125.$$

У таблиці. 3.13 – 3.19 наведені результати розрахунків по формозміні заготовок із використанням методики планування повного факторного експерименту для Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7.

Рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії і взаємодії усіх факторів:

$$\begin{gathered} Y_1 = 0{,}81383 - 0{,}11338 \cdot X_1 - 0{,}05772 \cdot X_2 - 0{,}03266 \cdot X_4 - \\ -0{,}0237 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}00897 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0{,}02473 \cdot X_1 \cdot X_4 + \\ +0{,}02879 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0{,}05540 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}02359 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ +0{,}01212 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4. \end{gathered} \tag{3.6}$$

$$Y_2 = 0{,}65774 - 0{,}15194 \cdot X_1 - 0{,}00480 \cdot X_3 \tag{3.7}$$

$$\begin{gathered} Y_3 = 1{,}26484 + 0{,}12286 \cdot X_1 - 0{,}09956 \cdot X_2 + 0{,}01275 \cdot X_3 - \\ - 0{,}06651 \cdot X_4 - 0{,}05729 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}00620 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ -0{,}05089 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0{,}00632 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}05794 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ +0{,}09172 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}01393 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ 0{,}04936 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ +0{,}03632 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}00600 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4. \end{gathered} \tag{3.8}$$

$$\begin{gathered} Y_4 = 1{,}23689 + 0{,}14032 \cdot X_1 + 0{,}04026 \cdot X_2 - 0{,}00396 \cdot X_4 + \\ +0{,}01792 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}01695 \cdot X_1 \cdot X3 + 0{,}00517 \cdot X_1 \cdot X_4 - \\ - 0{,}00469 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}00472 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0{,}00645 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ - 0{,}00551 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \end{gathered} \tag{3.9}$$

Таблиця 3.14 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.2) для показника Y_1

Макропоказники	Коефіцієнти регресії							
$Y_1 = H_1/H_0$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	0,81336	-0,11113	0,05683	0,00347	-0,03436	-0,02374	-0,00917	0,02264
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	0,00073	0,02848	0,05681	0,00777	0,02272	0,01077	-0,00621	0,00198
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена			
	$F = 1{,}75917 < F_{\text{кр}} = 3{,}24$				$G_{\text{р}} = 0{,}0625 < G_{\text{табл}} = 0{,}4546$			

Таблиця 3.15 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.2) для показника Y_2

Макропоказники	Коефіцієнти регресії							
$Y_2 = H/H_0$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	0,65774	-0,15194	0,00029	-0,00480	0,00129	-0,00066	-0,00248	0,00034
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,00133	-0,00129	0,00107	-0,00037	-0,00026	0,00003	-0,00087	0,00015
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена			
	$F = 0{,}34427 < F_{\text{кр}} = 3{,}24$				$G_{\text{р}} = 0{,}0625 < G_{\text{табл}} = 0{,}4546$			

Таблиця 3.16 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.2) для показника Y_3

Макропоказники	Коефіцієнти регресії							
$Y_3 = H_1/H$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	1,26484	0,12286	-0,09956	0,01275	-0,06651	-0,05729	-0,00620	-0,05089
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	0,00632	0,05794	0,09172	0,01393	0,04936	0,03632	-0,00600	0,00280
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена			
	$F = 2{,}50879 < F_{\text{кр}} = 3{,}24$				$G_{\text{р}} = 0{,}0625 < G_{\text{табл}} = 0{,}4546$			

Таблиця 3.17 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.2) для показника Y_4

Макропоказники	Коефіцієнти регресії							
$Y_4 = D_3/D_0$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	1,23689	0,14032	0,04026	0,00041	-0,00396	0,01792	0,01695	0,00517
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,00036	0,00346	-0,00469	-0,00065	0,00472	-0,00645	-0,00551	-0,00200
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена			
	$F = 1{,}06963 < F_{\text{кр}} = 3{,}24$				$G_{\text{р}} = 0{,}0625 < G_{\text{табл}} = 0{,}4546$			

Таблиця 3.18 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.2) для показника Y_5

Макропоказники	Коефіцієнти регресії							
$Y_5 = D'_3/D_0$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	1,06938	0,03444	0,00118	-0,0412	-0,02579	-0,00579	-0,00993	-0,01430
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,02544	-0,01941	0,01930	-0,01340	-0,00855	0,01249	0,01853	0,00849
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена			
	$F = 0{,}44179 < F_{\text{кр}} = 3{,}24$				$G_{\text{р}} = 0{,}0625 < G_{\text{табл}} = 0{,}4546$			

Таблиця 3.19 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.2) для показника Y_6

Макропоказники	Коефіцієнти регресії							
$Y_6 = D_4/D_0$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	1,16544	0,11406	-0,00074	0,02334	-0,00856	0,00599	0,00686	-0,01299
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,01714	0,00001	0,01504	-0,01041	0,00059	0,01491	0,00181	0,00259
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена			
	$F = 0{,}69565 < F_{\text{кр}} = 3{,}24$				$G_{\text{р}} = 0{,}0625 < G_{\text{табл}} = 0{,}4546$			

Таблиця 3.20 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.2) для показника Y_7

Макропоказники	Коефіцієнти регресії							
$Y_7 = D'_4/D_0$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	1,09096	0,02023	0,00463	0,00221	0,12267	-0,00199	0,01226	0,05649
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,00292	0,00407	-0,01191	0,00048	-0,01676	0,00774	-0,00421	-0,00746
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена			
	$F = 1{,}40745 < F_{\text{кр}} = 3{,}24$				$G_{\text{р}} = 0{,}0625 < G_{\text{табл}} = 0{,}4546$			

$$Y_5 = 1{,}06938 + 0{,}03444 \cdot X_1 - 0{,}04119 \cdot X_3 - 0{,}02579 \cdot X_4 - \\ -0{,}00579 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}00993 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0{,}01430 \cdot X_1 \cdot X_4 - \\ -0{,}02544 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0{,}01941 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0{,}01930 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ - 0{,}01340 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0{,}00855 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ + 0{,}01249 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}01853 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + \\ + 0{,}00849 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4. \qquad (3.10)$$

$$Y_6 = 1{,}16544 + 0{,}11406 \cdot X_1 + 0{,}02334 \cdot X_3 - \\ - 0{,}00856 \cdot X_4 + 0{,}00599 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}00686 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ -0{,}01299 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0{,}01714 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}01504 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ - 0{,}01041 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + + 0{,}01491 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4. \qquad (3.11)$$

$$Y_7 = 1{,}09096 + 0{,}02023 \cdot X_1 + 0{,}00463 \cdot X_2 + 0{,}12267 \cdot X_4 + \\ 0{,}01226 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0{,}05649 \cdot X_1 \cdot X_4 + +0{,}00407 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\ 0{,}01191 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}01676 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0{,}00774 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ -0{,}00421 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ - 0{,}00746 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4. \qquad (3.12)$$

Рівняння регресії у вигляді простої лінійної моделі з урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії:

$$Y_1 = 1{,}26484 + 0{,}12286 \cdot X_1 - 0{,}09956 \cdot X_2 + \\ + 0{,}01275 \cdot X_3 - 0{,}06651 \cdot X_4. \qquad (3.13)$$

$$Y_2 = 0{,}65774 - 0{,}15194 \cdot X_1 - 0{,}00480 \cdot X_3. \qquad (3.14)$$

$$Y_3 = 0{,}65792 - 0{,}15176 \cdot X_1 - 0{,}00451 \cdot X_3. \qquad (3.15)$$

$$Y_4 = 1{,}23689 + 0{,}14032 \cdot X_1 + 0{,}04026 \cdot X_2 - 0{,}00396 \cdot X_4. \qquad (3.16)$$

$$Y_5 = 1{,}06938 + 0{,}03444 \cdot X_1 - 0{,}04119 \cdot X_3 - 0{,}02579 \cdot X_4. \qquad (3.17)$$

$$Y_6 = 1{,}16544 + 0{,}11406 \cdot X_1 + 0{,}02334 \cdot X_3 - 0{,}00856 \cdot X_4. \qquad (3.18)$$

$$Y_7 = 1{,}09096 + 0{,}02023 \cdot X_1 + 0{,}00463 \cdot X_2 + 0{,}12267 \cdot X_4. \quad (3.19)$$

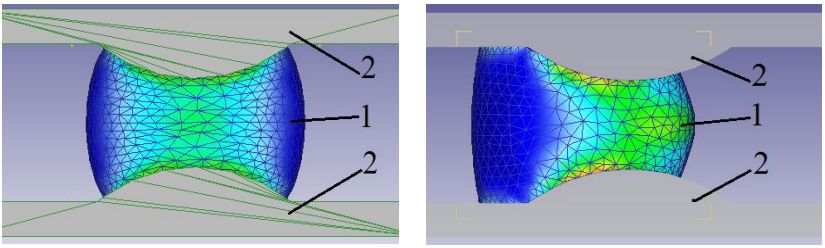
Результати дозволяють прогнозувати формозміну циліндричних заготовок у процесах профілювання осаджуванням випуклими подовженими бойками, як з асиметрією, так і без неї. Оцінка значущості факторів показує істотний вплив на формозміну відносного ступеню деформації ε_h, відношення радіусу деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки R/D_0, відношення початкових розмірів заготовки H_0/D_0, відношення величини асиметрії навантаження до початкового діаметру заготовки e/D_0 у досліджуваних межах. При цьому на характеристику висотної деформації H_1/H_0 значимо впливають тільки фактори H_0/D_0 і e/D_0, а на характеристику подовжньої деформації D_4/D'_4 і ступінь деформації осаджування ε_h істотного впливу не має.

3.4.2 При низькій висоті профілю радіусних штампових вставок

Усі параметри моделювання осаджування радіусними штамповими вставками (рис. 3.30) бралися з тими ж умовами, що і для асиметричного осаджування заготовок радіусними штамповими вставками з високою висотою профілю. Заміри осадженого напівфабрикату проводили згідно схеми рис. 3.31.

За основні макропоказники прийняті: $Y_1 = H_1 / H_0$, $Y_2 = H / H_0$, $Y_3 = H_1 / H$, $Y_4 = D_3 / D_0$, $Y_5 = D'_3 / D_0$, $Y_6 = D_4 / D_0$, $Y_7 = D'_4 / D_0$, де H_1 – висота крайової ділянки напівфабрикату після осаджування, H – найменша висота профільованого напівфабрикату після осаджування, D_3 і D'_3 – подовжній і поперечний розміри напівфабрикату після осаджування на середині його висоти, D_4 і D'_4 – подовжній і поперечний розміри напівфабрикату в зоні кон-

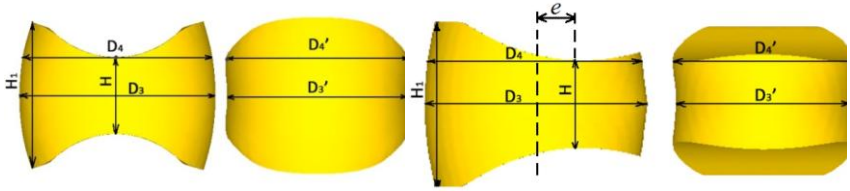
такту робочого інструменту із заготовкою після осаджування (див. рис. 3.31) [169, 170].



а б

а – без асиметрії e = 0; б – з асиметрією e = 0,25 D_0 [169]

Рисунок 3.30 – Твердотільна модель заготовки (1) після осаджування випуклими бойками (2)



а б

а – без асиметрії e = 0;
б – з асиметрією e = 0,25 D_0 [169]

Рисунок 3.31 – Схема обміру заготовки після осаджування випуклими бойками

Дослідження формозміни проводили в діапазоні ступенів обтискань ε_h від 0,2 до 0,5. За даними моделювання були розраховані макропоказники формозміни, для яких складали рівняння регресії. В якості основних факторів, що впливають на формозміну, були виділені: ε_h (фактор X_1) – відносний ступінь деформації; $R / D_0 \left(X_2 \right)$ – відношення радіусу деформувального інструменту до початкового діа-

метру заготовки; $H_0 / D_0 (X_3)$ – відношення початкових розмірів заготовки; $e / D_0 (X_4)$ – відношення величини асиметрії навантаження до початкового діаметру заготовки; $h_p / D_0 (X_5)$ – відношення висоти опуклості профілю інструменту до початкового діаметру заготовки.

Значення факторів варіювали на двох рівнях. Рівні і інтервали варіювання факторів представлені в табл. 3.21.

Таблиця 3.21 – План повнофакторного експерименту [169]

Фактори	ε_h	R / D_0	H_0 / D_0	e / D_0	h_p / D_0
Позначення фактора, X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Нижній рівень, $X_{iн}$	0,2	0,6	1	0	7.5
Верхній рівень, $X_{iв}$	0,5	2,25	2	0,25	112.5
Нульовий рівень, X_{i0}	0,35	1,425	1,5	0,125	52.5
Інтервал варіювання, ΔX_i	0,15	0,825	0,5	0,125	60

У монографії розглядається лінійна регресійна модель з урахуванням парних взаємодій. В якості плану обчислювального експерименту використовується дворівневий повнофакторний експеримент (ПФЕ) 2^5 [167, 168].

Залежність показників формозміни від впливаючих факторів

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5). \qquad (3.20)$$

представляли у вигляді лінійного рівняння регресії з урахуванням усіх взаємодій:

$$
\begin{aligned}
&Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_1 \cdot X_2 + b_7 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\
&+ b_8 \cdot X_1 \cdot X_4 + b_9 \cdot X_1 \cdot X_5 + b_{10} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{12} \cdot X_2 \cdot X_5 + \\
&+ b_{13} \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{14} \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{15} \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{16} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{17} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\
&+ b_{18} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 + b_{19} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{20} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{21} \cdot X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\
&+ b_{22} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{25} \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\
&+ b_{26} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{27} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + b_{28} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\
&+ b_{29} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{30} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + b_{31} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5,
\end{aligned}
\qquad (3.21)
$$

де b_i – коефіцієнти рівняння в кодованому масштабі, які визначали як:

$$b_j = \sum_i^N Y_i X_{ji} / N,\ j = 0,1...k, \qquad (3.22)$$

де $N = 2^k$ – число дослідів у експерименті (тут k – число факторів).

Кодовані значення факторів на верхньому $Z_{iв}$ і нижньому $Z_{iн}$ рівнях:

$$Z_{iв} = (X_{iв} - X_{i0}) / \Delta X_i ; Z_{iн} = (X_{iн} - X_{i0}) / \Delta X_i . \qquad (3.23)$$

Виконували реалізацію моделювання згідно з планом повного факторного експерименту за методикою планування 2^5 з повною взаємодією факторів. Методика планування експерименту припускає наявність паралельних дослідів з перевіркою гіпотези однорідності дисперсій S^2 [167, 168]. Проте, проведення обчислень в процесі математичного моделювання обумовлює відсутність імовірнісного розкиду результатів. Для забезпечення можливості об-

робки результатів обчислень за відомими методиками [167, 168] вводили малу дисперсію $S^2 = 0{,}0001$, виходячи з гіпотетичного припущення проведення двох паралельних дослідів. Задавалися рівнем надійності $\alpha = 0{,}95$. Тоді табличне значення критерію Кохрена для моделювання формозміни сталевих заготовок $G_{табл} = 0{,}2817$ [167, 168]. Дисперсії вважають однорідними, коли розрахункове значення $G_p < G_{табл}$, що вимагає перевірки. При постійному значенні внесеної дисперсії $S^2 = S^2{}_{max} = 0{,}0001$ розрахункові значення $G_p = 0{,}0312 < G_{табл} = 0{,}2817$. Отже, внесені дисперсії однорідні. Критичні значення критеріїв Фішера для оцінки адекватності регресійної моделі [167, 168]: $F_{кр} = 2{,}9$. У разі, коли розрахунковий критерій Фішера F менший за критичний, тобто, $F < F_{кр}$, модель є адекватною. Оцінку кожного коефіцієнту рівнянь регресії проводили за t-критерієм Ст'юдента, які визначені як [167, 168]: $t_{\alpha,f} = 2{,}036$. Проводили моделювання зміни макропоказників: $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7$.

Перехід від кодованих значень до натуральних виконували як:

$$\begin{gathered} X_1 = (\varepsilon_h - 0{,}35)/0{,}15;\ X_2 = (R/D_0 - 1{,}425)/0{,}825; \\ X_3 = (H_0/D_0 - 1{,}5)/0{,}5;\ X_4 = (e/D_0 - 0{,}125)/0{,}125; \\ X_5 = (h_p - 1{,}2)/1{,}05 \end{gathered} \quad . \qquad (3.24)$$

У табл. 3.21 і табл. 3.22 наведені приклади розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії для опису зміни макропоказників Y_3 і Y_4. Аналогічні розрахунки коефіцієнтів рівнянь регресії отримані для макропоказників Y_1, Y_2, Y_5, Y_6, Y_7 [169]. Рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії і взаємодії усіх факторів:

$$Y_1 = 0{,}85317 - 0{,}09285 \cdot X_1 - 0{,}06470 \cdot X_2 - 0{,}01777 \cdot X_3 + \\ + 0{,}00934 \cdot X_4 - 0{,}01821 \cdot X_5 - 0{,}03351 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ 0{,}01194 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0{,}00482 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}01555 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\ 0{,}01053 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0{,}03730 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}04286 \cdot X_3 \cdot X_5 - \\ 0{,}02209 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}00578 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}01021 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\ 0{,}00703 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0{,}01052 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}02186 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 \\ - 0{,}00313 \cdot X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}01734 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}01285 \cdot X_2 \cdot X_3 \\ \cdot X_5 - 0{,}00547 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}04112 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}00781 \cdot X_1 \\ \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}01481 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 - 0{,}00429 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ + 0{,}01934 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}00726 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 - \\ - 0{,}00700 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5. \qquad (3.25)$$

$$Y_2 = 0{,}65906 - 0{,}15200 \cdot X_1 - 0{,}00529 \cdot X_3. \qquad (3.26)$$

$$Y_3 = 1{,}33248 + 0{,}16619 \cdot X_1 - 0{,}11634 \cdot X_2 - 0{,}02140 \cdot X_3 + \\ + 0{,}01382 \cdot X_4 - 0{,}02725 \cdot X_5 - 0{,}07684 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}02134 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ 0{,}00637 \cdot X_1 \cdot X_5 - 0{,}00471 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}03116 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\ - 0{,}01826 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0{,}06291 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}07455 \cdot X_3 \cdot X_5 - \\ - 0{,}03994 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}00750 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}02316 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 - \\ - 0{,}01516 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0{,}03028 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}05208 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 - \\ - 0{,}01619 \cdot X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}02822 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}02401 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 - \\ - 0{,}00827 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}06922 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 - \\ - 0{,}01792 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}02828 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 - \\ - 0{,}00853 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}04298 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 - \\ - 0{,}01282 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}01400 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5. \qquad (3.27)$$

$$Y_4 = 1{,}22573 + 0{,}13651 \cdot X_1 + 0{,}04626 \cdot X_2 + 0{,}00440 \cdot X_3 - \\ 0{,}01194 \cdot X_4 + 0{,}00289 \cdot X_5 + 0{,}02467 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}01071 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ 0{,}00271 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0{,}00508 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0{,}00853 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0{,}01078 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0{,}00742 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0{,}00364 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ - 0{,}01227 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}00611 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}00843 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ + 0{,}00472 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0{,}00581 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}00265 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 + \\ + 0{,}00375 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}00453 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}00610 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 - \\ - 0{,}00933 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}00340 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + \\ + 0{,}00470 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}00775 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 - \\ - 0{,}00954 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}00416 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ + 0{,}00606 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5. \qquad (3.28)$$

Таблиця 3.22 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.21) для показника Y_1

Макро-показники	Коефіцієнти рівнянь регресії						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	0,85317	-0,09285	-0,0647	-0,01777	0,00934	-0,01821	-0,03351
$Y_1=H_1/H_0$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	-0,01194	-0,00043	0,0008	-0,00482	0,01555	-0,01053	0,0373
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	0,04286	-0,02209	0,00578	0,01021	-0,00703	0,01052	0,02186
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	-0,00313	-0,01734	-0,01285	-0,00547	0,04112	-0,00781	-0,01481
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	-0,00429	0,01934	-0,00726	-0,007	-	-	-
	Критерій Фішера			Критерій Кохрена			
	$F = 0,26 < F_{кр} = 3,3$			$G_p = 0,0312 < G_{табл} = 0,2817$			

Таблиця 3.23 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.21) для показника Y_2

Макро-показни-ки	Коефіцієнти рівнянь регресії						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	0,65906	-0,152	0,00034	-0,00529	0,00045	-0,00089	-0,00037
$Y_2=H/H_0$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	-0,00038	0,00011	0,00085	-0,00077	-0,00104	-0,00067	0,00027
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	0,00103	0,0014	-0,00005	-0,00005	0,00012	-0,0001	-0,0012
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	0,00113	-0,00089	-0,00104	-0,00075	0,00122	0,0001	0,00019
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	0,00031	0,00091	-0,00059	0,00046	-	-	-
	Критерій Фішера			Критерій Кохрена			
	$F = 2{,}01 < F_{кр} = 3{,}6$			$G_p = 0{,}0312 < G_{табл} = 0{,}2817$			

Таблиця 3.24 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.21) для показника Y_3

Макро-показни-ки	Коефіцієнти рівнянь регресії						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	1,34087	0,15863	-0,08034	-0,07593	0,07562	-0,05999	-0,05157
$Y_3=H_1/H$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	-0,04525	0,04445	-0,05423	-0,00172	0,01437	0,05977	0,00457
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	0,00399	-0,02213	0,00296	0,00264	0,05478	-0,00202	0,00621
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	-0,01794	-0,01508	0,00824	0,02783	-0,01048	-0,01020	-0,00190
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	0,02079	-0,01176	0,01230	0,01138	-	-	-
	Критерій Фішера			Критерій Кохрена			
	$F = 2{,}27549 < F_{кр} = 2{,}9$			$G_p = 0.0312 < G_{табл} = 0.2817$			

Таблиця 3.25 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.21) для показника Y_4

Макро-показни-ки	Коефіцієнти рівнянь регресії						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	1,22501	0,14129	0,03290	0,00723	-0,01161	-0,00181	0,01778
$Y_4=D_3/D_0$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	0,00826	-0,00605	0,00515	0,00820	0,00978	-0,00657	-0,00242
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	0,01249	0,00142	0,00447	0,00300	-0,00310	-0,00159	0,00649
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	0,00451	-0,00117	-0,00502	-0,00716	0,00772	0,00035	-0,00493
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	-0,00698	0,00496	-0,00133	-0,00242			
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена		
	$F = 1{,}82273 < F_{кр} = 2{,}25$				$G_p = 0.0312 < G_{табл} = 0.2817$		

Таблиця 3.26 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.21) для показника Y_5

Макро-показни-ки	Коефіцієнти рівнянь регресії						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	1,16335	0,09374	0,05793	0,01135	-0,01241	-0,00405	0,03219
$Y_5=D'_3/D_0$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	0,00515	-0,00313	-0,00652	-0,00235	0,00215	0,00032	-0,00206
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	-0,01004	0,00649	-0,00211	0,00423	-0,00417	-0,00569	-0,00775
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	0,00664	0,00117	-0,00133	0,00353	-0,00619	-0,00112	0,0007
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	0,00702	-0,00947	0,00714	0,0076			
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена		
	$F = 1{,}69459 < F_{кр} = 2{,}19$				$G_p = 0.0312 < G_{табл} = 0.2817$		

Таблиця 3.27 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.21) для показника Y_6

Макро-показни-ки	Коефіцієнти рівнянь регресії						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	1,17056	0,11729	0,00064	0,01455	-0,00487	-0,00204	0,00259
$Y_6=D_4/D_0$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	0,00612	-0,00796	0,00187	-0,01618	-0,00049	0,00039	0,00628
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	-0,0022	-0,00061	-0,0107	0,00066	0,00096	0,00918	-0,00218
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	0,00007	0,00239	0,00053	0,00228	-0,00223	0,00109	-0,00192
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	-0,00251	0,0028	0,00091	-0,00071			
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена		
	$F = 1{,}55207 < F_{кр} = 1{,}91$				$G_p = 0.0312 < G_{табл} = 0.2817$		

Таблиця 3.28 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.21) для показника Y_7

Макро-показники	Коефіцієнти рівнянь регресії						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	1,08707	0,0532	0,0216	0,01178	-0,00159	-0,02138	0,02645
$Y_7=D'_4/D_0$	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	0,00945	-0,01158	-0,00693	-0,02165	0,0143	-0,00314	0,02586
	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}
	-0,02254	0,01809	-0,01163	0,00756	0,00197	0,01416	-0,01254
	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}
	0,0061	-0,00377	0,00056	0,00375	0,02107	-0,00208	0,0034
	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	-	-	-
	-0,00219	0,0125	-0,00102	-0,00451			
	Критерій Фішера				Критерій Кохрена		
	$F = 1{,}79609 < F_{кр} = 2{,}4$				$G_p = 0.0312 < G_{табл} = 0.2817$		

$$Y_5 = 1{,}16335 + 0{,}09374 \cdot X_1 + 0{,}05793 \cdot X_2 + 0{,}01135 \cdot X_3 - \\ - 0{,}01241 \cdot X_4 - 0{,}00405 \cdot X_5 + 0{,}03219 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}00515 \cdot X_1 \cdot X_3 \\ - 0{,}00313 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0{,}00652 \cdot X_1 \cdot X_5 - 0{,}01004 \cdot X_3 \cdot X_5 + \\ + 0{,}00649 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}00423 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0{,}00417 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 - \\ - 0{,}00569 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}00775 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}00664 \cdot X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ 0{,}00353 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}00619 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}00702 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 - \\ 0{,}00947 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}00714 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ + 0{,}00760 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 \qquad (3.29)$$

$$Y_6 = 1{,}17056 + 0{,}11729 \cdot X_1 + 0{,}01455 \cdot X_3 - 0{,}00487 \cdot X_4 + \\ + 0{,}00259 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}00612 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0{,}00796 \cdot X_1 \cdot X_4 - \\ - 0{,}01618 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}00628 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}01070 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0{,}00918 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}00280 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5. \qquad (3.30)$$

$$Y_7 = 1{,}08707 + 0{,}05320 \cdot X_1 + 0{,}02160 \cdot X_2 + 0{,}01178 \cdot X_3 - \\ - 0{,}02138 \cdot X_5 + 0{,}02645 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}00945 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ - 0{,}01158 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0{,}00693 \cdot X_1 \cdot X_5 - 0{,}02165 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0{,}01430 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0{,}00314 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0{,}02586 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ - 0{,}02254 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}01809 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}01163 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ + 0{,}00756 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0{,}01416 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}01254 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 + \\ + 0{,}00610 \cdot X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}00377 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + \\ + 0{,}00375 \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0{,}02107 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ + 0{,}00340 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}01250 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 - \\ - 0{,}00451 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5. \qquad (3.31)$$

Рівняння регресії у вигляді простої лінійної моделі з урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії:

$$Y_1 = 0{,}85317 - 0{,}09285 \cdot X_1 - 0{,}06470 \cdot X_2 - 0{,}01777 \cdot X_3 + \\ + 0{,}00934 \cdot X_4 - 0{,}01821 \cdot X_5. \qquad (3.32)$$

$$Y_2 = 0{,}65906 - 0{,}15200 \cdot X_1 - 0{,}00529 \cdot X_3. \qquad (3.33)$$

$$Y_3 = 1{,}33248 + 0{,}16619 \cdot X_1 - 0{,}11634 \cdot X_2 - 0{,}02140 \cdot X_3 + \\ + 0{,}01382 \cdot X_4 - 0{,}02725 \cdot X_5. \qquad (3.34)$$

$$Y_4 = 1{,}22573 + 0{,}13651 \cdot X_1 + 0{,}04626 \cdot X_2 + 0{,}00440 \cdot X_3 - \\ - 0{,}01194 \cdot X_4 + 0{,}00289 X_5. \qquad (3.35)$$

$$Y_5 = 1{,}16335 + 0{,}09374 \cdot X_1 + 0{,}05793 \cdot X_2 + 0{,}01135 \cdot X_3 - \\ - 0{,}01241 \cdot X_4 - 0{,}00405 \cdot X_5. \quad (3.36)$$

$$Y_6 = 1{,}17056 + 0{,}11729 \cdot X_1 + 0{,}01455 \cdot X_3 - \\ 0{,}00487 \cdot X_4. \quad (3.37)$$

$$Y_7 = 1{,}08707 + 0{,}05320 \cdot X_1 + 0{,}02160 \cdot X_2 + 0{,}01178 \cdot X_3 - \\ - 0{,}02138 \cdot X_5. \quad (3.38)$$

Результати дозволяють прогнозувати формозміну циліндричних заготовок у процесах профілювання осаджуванням випуклими радіусними штамповими вставками з різною висотою профілю. Оцінка значущості факторів показує істотний вплив на формозміну відносного ступеню деформації ε_h, відношення радіусу деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки R / D_0, відношення початкових розмірів заготовки H_0 / D_0, відношення величини асиметрії навантаження до початкового діаметру заготовки e / D_0, відношення висоти випуклості профілю інструменту до початкового діаметру заготовки h_p / D_0 в досліджуваних межах. При цьому, на характеристику висотної деформації H_1 / H_0 значимо впливають тільки фактори H_0 / D_0 і e / D_0, а на характеристику поздовжньої деформації D_4 / D'_4 ступінь деформації осаджування ε_h істотного впливу не має.

3.5 Виявлення умов появи поздовжнього згину при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками

Дослідження попереднього профілювання заготовок при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками перед подальшим штампуванням розпочаті

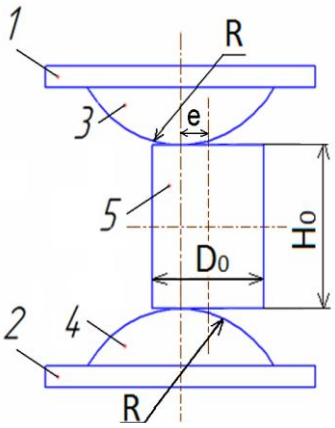
авторами в роботах [162, 163], де отримані відомості про зміну НДС і показників форми заготовок. Вочевидь, що для різних технологій можливі різні варіанти реалізації профілювання випуклими вставками в широкому діапазоні асиметрії при осаджуванні, радіусів випуклості бойків, співвідношень габаритів заготовки, ступенів деформацій тощо. При цьому на формозміну істотно впливають такі граничні умови на контакті заготовки з випуклими бойками, як фактор тертя, значення якого в попередніх дослідженнях, виконаних у програмних пакетах для скінченоелементного аналізу, приймали фіксованим.

Метою дослідження є визначення умов появи поздовжнього згину в процесі асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками, які залежать від низки факторів: відношення початкової висоти заготовки до початкового діаметру H_0 / D_0, відношення радіусу випуклості вставок деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки R / D_0, ступінь деформації ε_h і асиметрії навантаження e / D_0.

Необхідність цього дослідження обумовлюється тим, що дослідження факторів, що впливають на вигнутість заготовки, є досить важливою при розробці технологічного процесу штампування поковок складної конфігурації та поковок із зігнутою віссю з точки зору ресурсозбереження і підвищення конкурентоспроможності продукції, що випускається, коли необхідно досягти максимально близького наближення форми заготовки до форми готового виробу.

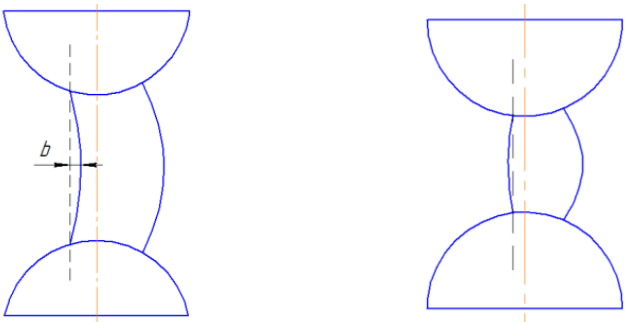
Для відносно низьких заготовок з $H_0 / D_0 < 1{,}5$ поздовжній згин виникати не буде, а в процесі асиметричного осаджування спостерігається характерна нерівномірність деформації з яскраво вираженим діжкоутворенням [171].

Дослідження проводили шляхом моделювання процесу асиметричного осаджування (рис. 3.32) в програмному комплексі для скінчено-елементного аналізу Deform 3d.



1 – верхній осаджувальний бойок;
2 – нижній осаджувальний бойок;
3 – верхній випуклий профіль;
4 – нижній випуклий профіль;
5 – заготовка;
e – значення асиметрії;
R – радіус випуклих бойків;
D_0 – початковий діаметр заготовки;
H_0 – початкова висота заготовки;
e – величина ексцентриситету

Рисунок 3.32 – Схема осаджування випуклими бойками з асиметрією навантаження



а б

b – величина прогину заготовки у процесі осаджування

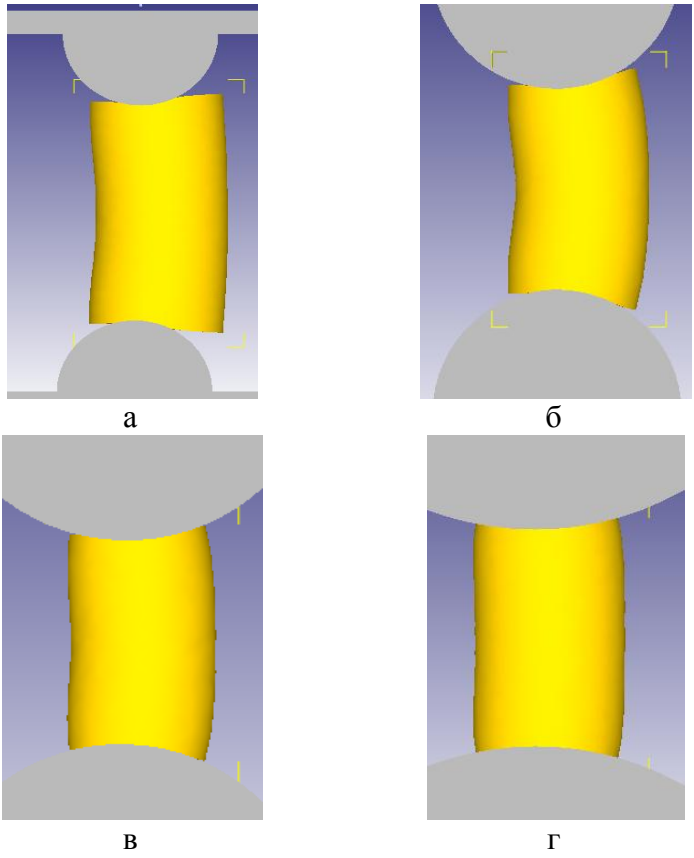
Рисунок 3.33 – Поява поздовжнього згину (а) і діжкоутворення (б) в процесі асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками [171]

Матеріал заготовки – Сталь 40, модель зміцнення узята відповідно до умов, запропонованих пакетом. Температурні умови приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С. Моделювали осаджування заготовок діаметром D_0 = 50 мм, висотою від H_0 = 75 мм до 100 мм з кроком 5 мм, тобто дотримувалися діапазону відношень H_0 / D_0 = 1,5 – 2,0 з кроком 0,1. Віртуальну деформацію проводили при радіусах закруглення випуклих бойків R = 30; 50; 75 і 112,5 мм, тобто витримували відношення R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25. При осаджуванні забезпечували асиметрію вертикальної осі випуклих плит і заготовки e = 5 мм; 7,5 мм і 12,5 мм, тобто відношення e / D_0 складало відповідно 0,1; 0,15 і 0,25.

На рис. 3.34–3.36 показані моделі заготовок, осаджених до критичного ступеню деформації $\varepsilon_{кр}$, при якому виникає поздовжній згин, при різному значенні асиметрії і радіусу випуклих бойків.

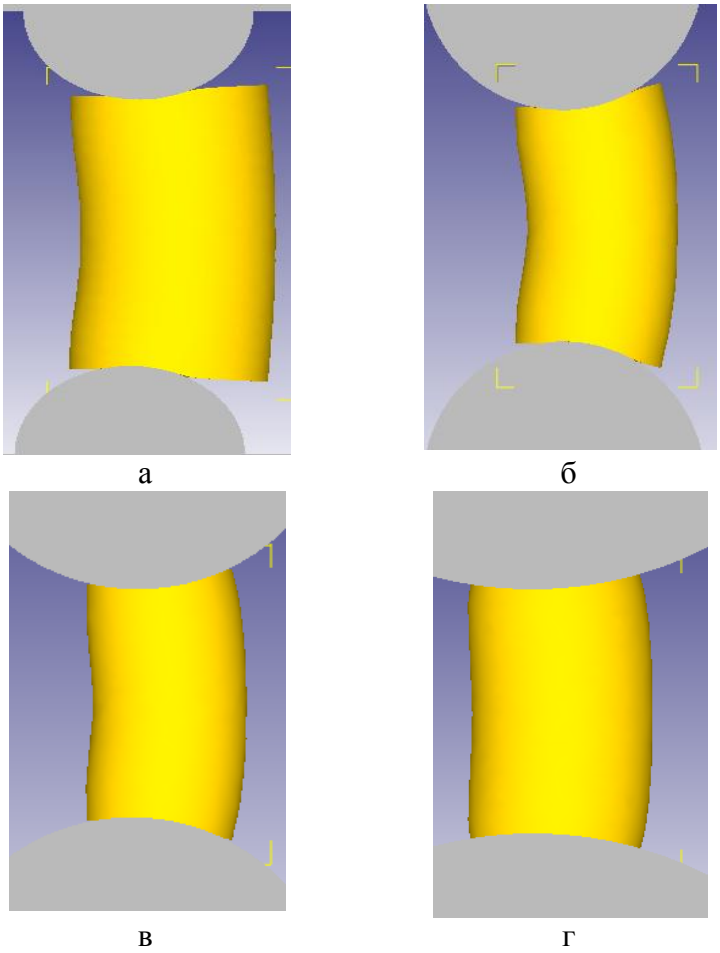
За результатами моделювання проведений аналіз факторів, що впливають на умову появи поздовжнього згину, і побудовані графіки залежності критичного ступеню деформації $\varepsilon_{кр}$, при якому виникає вигин заготовки від величини розмірів початкової заготовки H_0 / D_0, асиметрії навантаження e / D_0 і радіусу випуклої частини робочого інструменту R / D_0 (рис. 3.37) [171].

Вигин при осаджуванні заготовки зберігатиметься тільки для умов R / D_0 = 0,6, в інших випадках (R / D_0 = 1; 1,5; 2,25) поздовжній згин зберігатиметься до певного ступеню деформації ε_{δ}, досягнувши якої, заготовка набуватиме діжкоподібної форми.



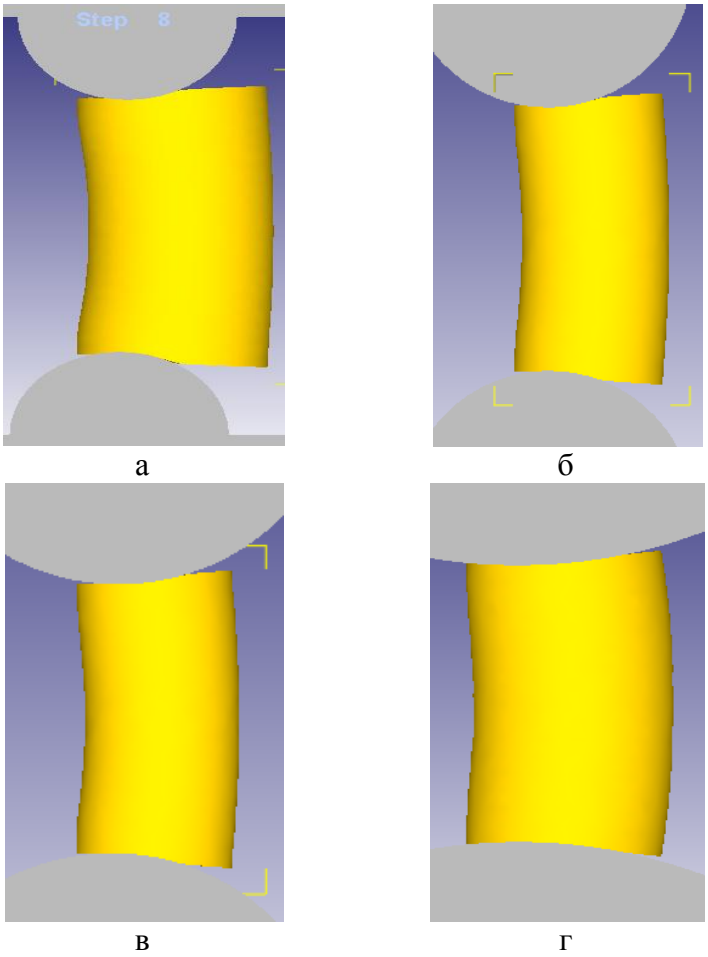
а – R/D_0 = 0,6; б – R/D_0 =1,0;
в – R/D_0 =1,5; г – R/D_0 =2,25

Рисунок 3.34 – Осаджування заготовки висотою H_0/D_0 = 2 при e/D_0 = 0,1



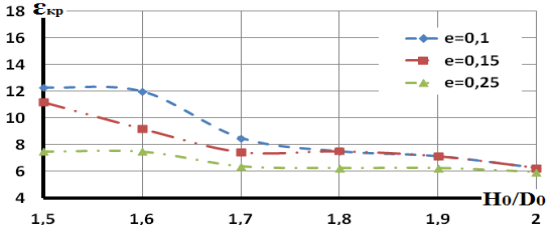
а – R/D_0 = 0,6; б – R/D_0 =1,0;
в – R/D_0 =1,5; г – R/D_0 =2,25

Рисунок 3.35 – Осаджування заготовки висотою H_0/D_0 = 2 при e/D_0 = 0,15

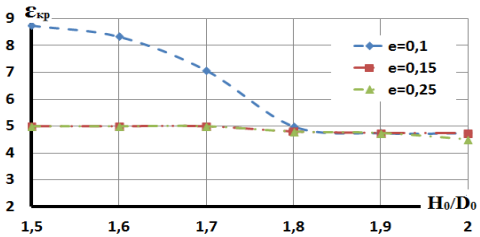


а – R/D_0 = 0,6; б – R/D_0 =1,0;
в – R/D_0 =1,5; г – R/D_0 =2,25

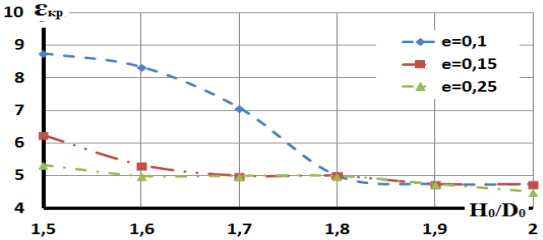
Рисунок 3.36 – Осаджування заготовки висотою H_0/D_0 = 2 при e/D_0 = 0,25



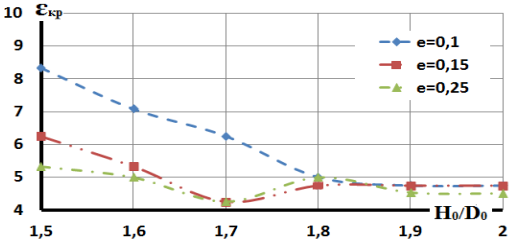
а



б



в

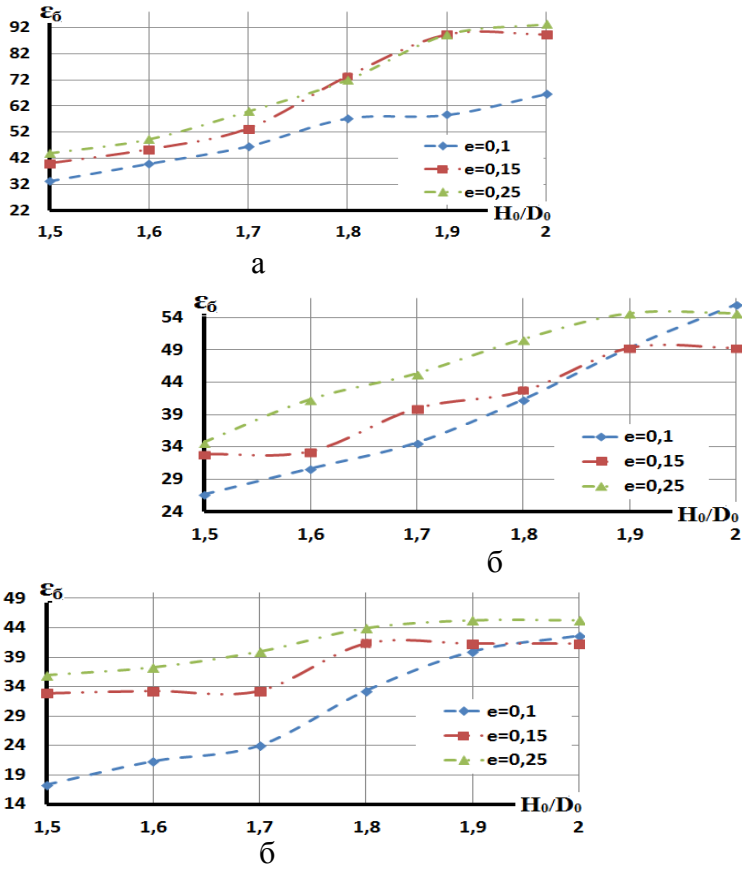


г

а – R/D_0= 0,6; б – R/D_0 = 1; в – R/D_0 = 1,5; г – R/D_0 = 2,25

Рисунок 3.37 – Ступінь деформації, при якій виникає поздовжній згин

За результатами моделювання побудовані графічні залежності появи нерівномірної діжки від геометричних параметрів заготовки деформуючого інструменту і від асиметрії вдавлювання радіусних штампових вставок у торці циліндричної заготовки (рис. 3.38).



а – R/D_0=0,6; б – R/D_0 = 1; в – R/D_0 = 1,5

Рисунок 3.38 – Ступінь деформації, при якій виникає нерівномірна діжка [172]

З графіків видно, що сам процес виникнення поздовжнього згину для заготовок з H_0 / D_0 > 1,5 відбувається при малих ступенях деформації і при мінімальному значенні асиметрії вдавлювання інструменту в торці заготовки e / D_0 = 0,1. При осаджуванні заготовок з висотою H_0 / D_0 = 1,5 – 2,0; e / D_0 = 0,1 спостерігається мінімальний поздовжній згин на малих ступенях деформації, який повністю зникає при підвищенні ступеню деформації, і заготовка набуває вираженої форми нерівномірної діжки. Зі збільшенням значення H_0 / D_0 і e / D_0 зростає і ступінь деформації, при якому зникає поздовжній згин.

3.6 Виявлення впливу різних факторів на вислизання заготовки з області деформуючого інструменту

В процесі асиметричного осаджування циліндричних заготовок при високому профілі радіусних штампових вставок, великих ступенях деформації і низьких коефіцієнтах тертя формозміна супроводжується прослизанням заготовки по поверхні деформуючого інструменту [173]. Початок прослизання характеризується деяким ступенем деформації $\varepsilon_{ск}$, при цьому подальша деформація, залежно від сукупності технологічних факторів і граничних умов, може відбуватися із стабільною формозміною. Критичним ступенем деформації $\varepsilon_{кр}$ слід вважати такий, при якому відбувається початок вислизання заготовки з випуклих бойків, що може привести до випадання незафіксованої заготовки з робочого простору. Для забезпечення умов стабільної формозміни необхідно виявити вплив фактора тертя і інших технологічних факторів процесу асиметрич-

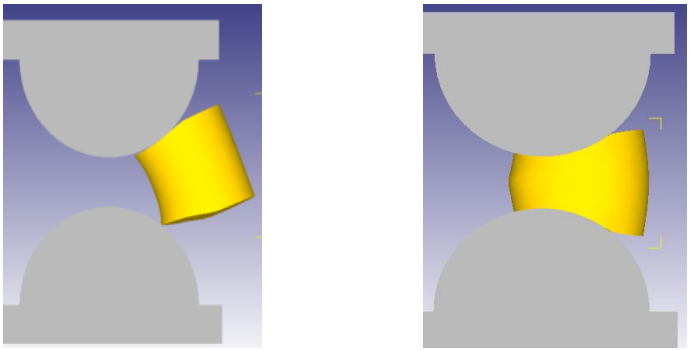
ного осаджування випуклими бойками на початок прослизання заготовки ($\varepsilon_{ск}$).

Метою є виявлення закономірностей впливу фактору тертя на контакті випуклих бойків і циліндричної заготовки, а також таких технологічних факторів, як відношення початкових розмірів заготовки, характеристика профілю випуклих бойків і величини асиметрії вдавлювання на початок вислизання заготовки при асиметричному осаджуванні.

Виконували моделювання процесу асиметричного осаджування заготовок випуклими бойками в пакеті скінчено-елементного аналізу Deform 3d. Матеріал заготовки – Сталь 40, модель зміцнення взята відповідно до умов, запропонованих пакетом. Температурні умови приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С. Задана кількість скінчених елементів складала 10000 шт., проте після генерації сітки кількість елементів скоротилася до 7847 шт. Моделювали осаджування заготовок діаметром D_0 = 50 мм, висотою H_0 = 50 мм і 100 мм, тобто дотримувалися відношення H_0 / D_0 = 1,0 і 2,0 відповідно. Віртуальну деформацію проводили при радіусах закруглення випуклих бойків R = 30; 50; 75 і 112,5 мм, тобто витримували відношення R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25. При осаджуванні забезпечували асиметрію вертикальної осі випуклих плит і заготовки e = 5 мм і 12,5 мм, тобто відношення e / D_0 складало відповідно до 0,1 і 0,25 [173, 174]. Ступінь деформації задавали в діапазоні ε_h = 20…50 %, в якості показника тертя вибирали коефіцієнт тертя μ по Зібелю, який варіював в межах від 0,02 до 0,5.

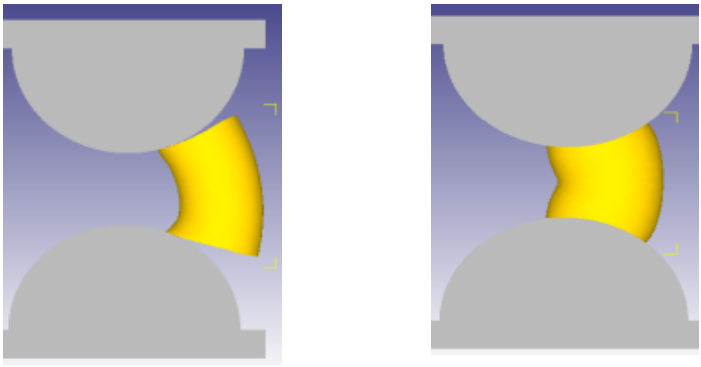
При моделюванні асиметричного осаджування циліндричної заготовки радіусними штамповими вставками за різних умов на контакті спостерігалися як стабільна формозміна (рис. 3.39, рис. 3.40, б), так і, у ряді випадків, пов-

не вислизання заготовки з робочого простору (рис. 3.39, рис. 3.40, а).



а б

Рисунок 3.39 – Твердотільна модель осадженої заготовки до ε_h = 50% при R/D_0 = 0,6 і H_0/D_0 = 1; μ = 0,02 (а) та μ = 0,5 (б)



а б

Рисунок 3.40 – Твердотільна модель осадженої заготовки до ε_h = 50% при R/D_0 = 1,5 і H_0/D_0 = 2; μ = 0,02 (а) та μ = 0,5 (б)

В якості основних впливаючих факторів були виділені: $X_1 = \mu$ – коефіцієнт тертя; $X_2 = R/D_0$ – відношення радіусу деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки; $X_3 = H_0/D_0$ – відношення початкових розмірів заготовки; $X_4 = e/D_0$ – відношення величини асиметрії вдавлювання деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки. Значення факторів варіювали на двох рівнях. Рівні та інтервали варіювання факторів представлені в таблиці 3.24 [173, 175].

Таблиця 3.24 – План повного факторного експерименту

Фактори	μ	R/D_0	H_0/D_0	e/D_0
Позначення фактора, X_i	X_1	X_2	X_3	X_4
Нижній рівень, $X_{iн}$	0,02	0,6	1	0,1
Верхній рівень, $X_{iв}$	0,5	2,25	2	0,25
Нульовий рівень, X_{i0}	0,24	1,425	1,5	0,175
Інтервал варіювання ΔX_i	0,26	0,825	0,5	0,075

У роботі розглядали лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій. В якості плану обчислювального експерименту використовували дворівневий повнофакторний експеримент (ПФЕ) 2^4 [168].

Залежність показників формозміни від впливаючих факторів:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4) \qquad (3.39)$$

представляли у вигляді лінійного рівняння регресії з урахуванням усіх взаємодій:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_1 \cdot X_2 + b_6 \cdot X_1 \cdot X_3 + b_7 \cdot X_1 \cdot X_4 + \\ + b_8 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_9 \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{10} \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{11} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ + b_{13} + \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{14} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{15} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4, \quad (3.40)$$

де b_j – коефіцієнти рівняння, визначувані як [168]:

$$b_j = \sum_{i=1}^{N} Y_i X_{ji} / N, j = 0,1...k, \quad (3.41)$$

де $N = 2^k$ – число дослідів у експерименті (тут k – число факторів).

Кодовані значення факторів на верхньому $Z_{iв}$ і нижньому $Z_{iн}$ рівнях:

$$Z_{iв} = (X_{iв} - X_{i0}) / \Delta X_i ; Z_{iн} = (X_{iн} - X_{i0}) / \Delta X_i . \quad (3.42)$$

Моделювання реалізовували згідно з планом повного факторного експерименту 2^4 з повною взаємодією факторів. Для забезпечення можливості обробки результатів обчислень [168] вводили малу дисперсію S^2 = 0,0001. Задавалися рівнем надійності α = 0,95. Тоді табличне значення критерію Кохрена для моделювання формозміни заготовок $G_{табл}$ = 0,4546 [168]. Дисперсії вважають однорідними, коли розрахункове значення $G_p < G_{табл}$, що вимагає перевірки. При постійному значенні внесеної дисперсії розрахункові значення G_p = 0,0625 < $G_{табл}$ = 0,4546. Отже, внесені дисперсії однорідні. Критичні значення критеріїв Фішера для оцінки адекватності регресійної моделі [168]: $F_{кр}$ = 3,24. У разі, коли розрахунковий критерій Фішера F менший за критичний, тобто, $F < F_{кр}$, модель є адекватною. Оцінку кожного коефіцієнту рівнянь регресії проводили за *t*-критерієм Ст'юдента, який визначений як [168]: $t_{\alpha,\mu}$ = 2,12.

Перехід від кодованих значень до натуральних виконували як:

$$X_1 = (\mu - 0{,}24)/0{,}26; \qquad X_2 = (R/D_0 - 1{,}425)/0{,}825;$$
$$X_3 = (H_0/D_0 - 1{,}5)/0{,}5; \quad X_4 = (e/D_0 - 0{,}175)/0{,}075. \tag{3.43}$$

В результаті досліджень отримані графічні залежності ступеню деформації $\varepsilon_{ск}$, при якому виникає ковзання заготовки по поверхні випуклого бойка, від відносної висоти заготовки (H_0/D_0), відносної асиметрії (e/D_0) і показника форми бойка (R/D_0), а також коефіцієнта тертя μ. Ці графіки наведені на рис. 3.41.

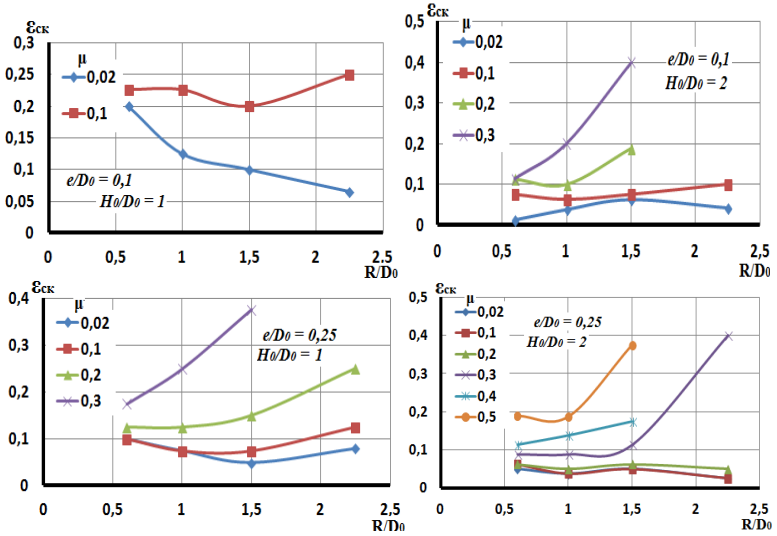


Рисунок 3.41 – Графіки залежності ступеню деформації $\varepsilon_{ск}$, при якому виникає ковзання заготовки по поверхні випуклого бойка, від відносної висоти заготовки (H_0/D_0), відносної асиметрії (e/D_0), показника форми бойків (R/D_0) і коефіцієнта тертя μ

У таблиці 3.25 показані результати розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії для опису зміни ступеню деформації, при якому виникає ковзання заготовки по поверхні робочого інструменту Y_1.

Таблиця 3.25 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння (3.40) для показника Y_1

Макропоказник	Коефіцієнти рівняння регресії							
$Y_1 = \varepsilon_{ск}$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
	0,05567	-0,03192	-0,02761	0,00386	0,02370	0,02145	0,00823	-0,01292
	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
	-0,01552	-0,02277	0,01083	-0,01536	-0,00839	–	–	–
	Критерій Фішера $F = 0,66633 < F_{кр} = 3,24$				Критерій Кохрена $G_p = 0,0625 < G_{табл} = 0,4546$			

Отримане рівняння регресії зі значимими коефіцієнтами і врахуванням повної взаємодії усіх факторів матиме вигляд:

$$\begin{gathered} Y = 0,05567 - 0,03192 \cdot X_1 - 0,02761 \cdot X_2 + \\ +0,00386 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,02370 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,02145 \cdot X_1 \cdot X_4 - \\ -0,00823 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,01292 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,01552 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ - 0,02277 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,01083 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ -0,01536 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,00839 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4. \end{gathered} \qquad (3.44)$$

Проста лінійна модель рівняння регресії після оцінки значущості усіх коефіцієнтів рівняння регресії прийме вигляд:

$$Y = 0,05567 - 0,03192 \cdot X_1 - 0,02761 \cdot X_2. \qquad (3.45)$$

Після розкриття кодованих значень, отримаємо підсумкову формулу для знаходження ступеню деформації, при якому виникає ковзання заготовки по поверхні деформуючого інструменту:

$$\varepsilon_{ск} = 0{,}181 - 0{,}123 \cdot \mu - 0{,}067 \cdot R/D_0. \qquad (3.46)$$

Оцінка значущості факторів показує істотний вплив на стабільність процесу осаджування коефіцієнта тертя, відношення радіусу деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки R/D_0. При цьому, зі збільшенням асиметрії і зменшенням коефіцієнту тертя, процес осаджування вимагає більшого контролю. Підвищення значення відношення радіусу деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки R/D_0 призводить до стійкішого положення заготовки між бойками у процесі осаджування при великих ступенях деформації.

Для усунення вислизання циліндричної заготовки з робочого простору деформуючого інструменту в процесі асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками було запропоновано використовувати штампові вставки з низьким профілем випуклої частини (рис. 3.20) [176].

Висновки по розділу 3

1. На основі отриманих результатів моделювання встановлено, що в початковий момент осаджування інтенсивності напружень і деформацій локалізуються у контактних зонах заготовки з інструментом, а збільшення обтискання призводить до перенесення акценту значень параметрів НДС від контактної поверхні до центру і периферії заготовки в її горизонтальній площині симетрії.

2. Виявлено, що при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками параметри НДС матеріалу на бічній поверхні залежать від величини відношення R/D_0 і розподіляються нерівномірно. Області максимальних значень σ_i і ε_i зміщуються до лівого краю заготовки (у бік асиметрії прикладеного навантаження).

3. З використанням МСЕ вивчено основні закономірності формозміни при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками. Запропоновані макропоказники, що характеризують нерівномірність деформації. Виявлено, що збільшення радіусу випуклості циліндричних бойків приводить до зростання площі контакту деформованої заготовки з радіусними бойками.

4. На основі використання методу скінчених елементів вивчені основні закономірності формозміни при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками заготовок з відношенням $H_0/D_0 = 2{,}0$. Виявлено, що наявність асиметрії вдавлювання радіусних штампових вставок у торці відносно високих заготовок призводить до їх поздовжнього згину. Показано, що зміна радіусу випуклості профілю осаджувальних плит істотно впливає на показники формозміни. Для підвищення стабільності формозміни при осаджуванні відносно високих заготовок запропоновано обмежувати висоту профілю штампових вставок.

5. Виявлено, що обмеження випуклості профілю штампових вставок приводить до зростання площі контакту деформованої заготовки з радіусними вставками, що приводить до зростання сили осаджування. Збільшення значення радіусності R/D_0 для випуклих вставок також призводить до зростання сили деформації. Дослідження силових режимів на операціях попереднього профілювання дозволить, у перспективі, уточнити методику вибору пресового устаткування за граничною номінальною силою і навантаженням, що допускаються у виконавчому механіз-

мі при автоматичних режимах багаторівчакового штампування з поєднанням профілюючих і штампувальних операцій за один хід пресу.

6. У вигляді рівнянь регресії встановлено залежності зміни основних показників нерівномірності деформації по висоті, а також у поздовжньому і поперечному напрямах, від факторів відносного ступеню деформації осаджування ε_h, відношення радіусу деформуючого інструменту до початкового діаметру заготовки R/D_0, відношення початкових розмірів заготовки H_0/D_0, відношення величини асиметрії навантаження до початкового діаметру заготовки e/D_0 для зразків з H_0/D_0 = 1,0 і 2,0. Адекватність отриманих регресійних моделей підтверджується значеннями критеріїв Фішера (максимальне значення $F = 2{,}50879 < F_{кр} = 3{,}24$), а відтворюваність – величинами критеріїв Кохрена ($G_p = 0{,}0625 < G_{табл} = 0{,}4546$).

7. Виявлені умови появи поздовжнього згину відносно високої заготовки при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками із застосуванням пакету для скінчено-елементного аналізу Deform 3d. Встановлено, що поява поздовжнього згину можлива за умови $H_0 / D_0 > 1{,}5$ і R/D_0 = 0,6; 1; 1,5. При R/D_0 = 2,25 поздовжній згин виникає, але дуга вигину мінімальна і зникає при збільшенні ступеню деформації. Зі збільшенням значення H_0 / D_0 критичний ступінь деформації, при якому виникає поздовжній згин, зменшується, а значення асиметрії e / D_0 = 0,1 не впливає на зміну критичного ступеню деформації.

8. В результаті досліджень встановлений значний вплив коефіцієнту контактного тертя на стабільність процесу асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками з точки зору вислизання заготовки з штампового простору. Показано, що при осаджуванні відносно низьких

заготовок ($H_0 / D_0 = 1{,}0$) значення R / D_0 не має істотного впливу на стійкість процесу осаджування заготовки, при цьому бажано забезпечувати значення коефіцієнту контактного тертя в інтервалі $\mu = 0{,}4 \div 0{,}5$. Встановлено, що при коефіцієнті контактного тертя $\mu = 0{,}1 \div 0{,}3$ заготовка ковзає по поверхні бойків у процесі осаджування, проте, це не впливає на кінцеву формозміну. Зі збільшенням відносної висоти початкової заготовки до $H_0 / D_0 = 2{,}0$ при малих значеннях коефіцієнту тертя $\mu = 0{,}1 \div 0{,}3$ і $R / D_0 = 1{,}0$ спостерігається вислизання заготовки з бойків. Показано, що процес асиметричного осаджування є стійким при значеннях $R / D_0 \leq 1{,}5$ і коефіцієнтах контактного тертя $\mu = 0{,}4 \div 0{,}5$.

Розділ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВЧОГО ПРОФІЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК АСИМЕТРИЧНИМ ОСАДЖУВАННЯМ РАДІУСНИМИ ШТАМПОВИМИ ВСТАВКАМИ

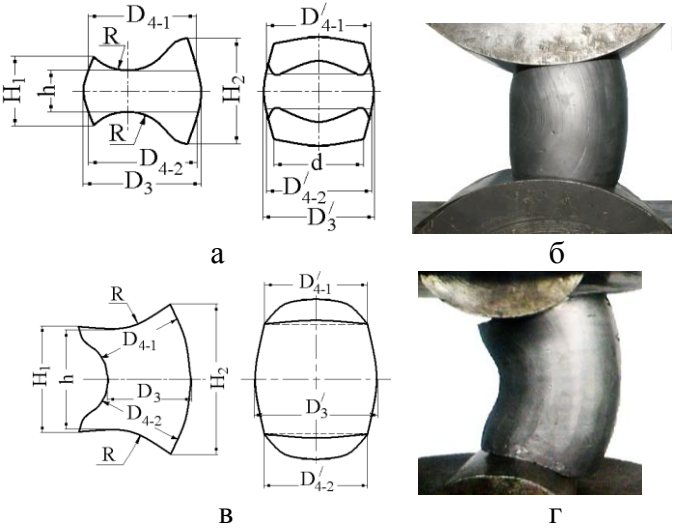
4.1 Зміна показників формозміни заготовок

4.1.1 Асиметричне осаджування зразків з H_0/D_0 = 1,0 і H_0/D_0 = 2,0. Метою дослідження є експериментальне виявлення закономірностей формозміни заготовок при профілюванні асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками. Знання цих закономірностей потрібне для визначення номенклатури поковок, під які доцільно використовувати спосіб профілювання, розробки методики розрахунку заготовки, фізико-геометричних умов профілювання і вибору технологічних переходів гарячого об'ємного штампування, що вивчається.

Через те, що осаджуванню піддають заготовки з $H_0 / D_0 \geq 1{,}0$, а також через малі площі контакту інструменту і заготовки, впливом фактору тертя на кінцеву формозміну заготовок при осаджуванні опуклим інструментом можна нехтувати. Застосовували методи фізичного моделювання пластичного плину на зразках зі свинцю сурм'янистого марки ССУ, характеристики реології якого відповідають характеристикам реології групи конструкційних середньовуглецевих сталей в діапазоні температур гарячої деформації. Дослідження виконували на універсальній розривній машині номінальною силою 0,2 МН. Отже, в процесі проведення експерименту забезпечували умови статичного навантаження заготовок.

Осаджування виконували випуклими (радіусними) вставками (рис. 2.7, а) зі сталі 5ХНВ (R_a = 6,3 мкм) з радіусом закруглення робочої поверхні R = 30; 50; 75 і

112,5 мм, тобто витримували відношення R/D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 і 2,25. Діаметр зразків D_0 = 50 мм, висота зразків H_0 = 50 мм і 100 мм, тобто відношення H_0/D_0 = 1,0 і 2,0 відповідно. При осаджуванні забезпечували фіксоване значення асиметрії вертикальної осі бойка і експериментального зразка e = 12,5 мм, тобто для усіх заготовок відношення e/D_0 складало 0,25. Зразки осаджували в діапазоні ε_h = 20…50 % з кроком $\Delta\varepsilon_h$ = 10 %. Вимірювання проводили після кожного обтискання за допомогою штангенциркуля. Схема обміру зразків показана на рис. 4.1. Для забезпечення статистичної обробки результатів вимірів кожен експеримент за однакових умов повторювали п'ять разів.



а та б – H_0/D_0 = 1,0; в та г – H_0/D_0 = 2,0; H_1, H_2, d, D_3, D'_3, D_{4-1}, D_{4-2}, D'_{4-1}, D'_{4-2} – контрольовані розміри

Рисунок 4.1 – Схема обміру і зразки після асиметричного осаджування штамповими вставками з радіусом R [177]

Для визначення відносних показників формозміни використовували середні значення (математичні очікування) п'яти вимірів за запропонованою схемою. У розрахунках використали усереднені розміри симетричних верхньої та нижньої частин профільованих напівфабрикатів: $D_4 = (D_{4-1} + D_{4-2})/2$ і $D_4' = (D_{4-1}' + D_{4-2}')/2$. За базові безрозмірні показники формозміни заготовки приймали наступні відношення: D_3/D_0, D_3'/D_0, D_3/D_3', D_4/D_0, D_4'/D_0, D_4/D_4', H_1/H_0, H_2/H_0, H_1/H_2, B/D_0. Експериментальні залежності деяких відносних показників формозміни циліндричних зразків з $H_0/D_0 = 1{,}0$ і $H_0/D_0 = 2{,}0$ від величини відносного радіусу осаджувальних бойків R/D_0 і ступеню деформації осаджування ε_h при фіксованій величині асиметрії e наведені на рис. 4.2–4.4. Серед показників формозміни, що вивчаються, можна виділити групу, що відповідає за зміну діаметральних розмірів (рис. 4.2), висотних розмірів (рис. 4.3) і вигину заготовки (рис. 4.4), характерного для заготовок з $H_0/D_0 = 2{,}0$ [177].

Аналізуючи ці графічні залежності (рис. 4.2–4.4), слід зазначити зростання показників зміни розмірів в діаметральній площині по ходу асиметричного осаджування, причому у напрямі упоперек горизонтальної осі осаджувальних вставок спостерігається інтенсивніший плин металу, в порівнянні з напрямом уздовж їх осі (див. рис. 4.2). Збільшення відносного радіусу R/D_0 призводить до зростання відносних показників формозміни на середині висоти профільованого напівфабрикату в поперечному напрямі (D_3/D_0), в той час як значення відносних показників в подовжньому напрямі (D_3/D_3') в цих перерізах знижуються. На інтенсивність набору металу в діаметральних приторцевих перерізах істотний вплив здійснює поява поздовжнього вигину, що виникає при збільшенні відносної висоти

заготовки. Так зростання значень відносного радіусу вставок при осаджуванні заготовок з $H_0 / D_0 = 1{,}0$ супроводжується зростанням значення поперечного показника D_4 / D_0, тоді як для заготовок з $H_0 / D_0 = 2{,}0$ спостерігається зниження значень показника D_4 / D_0 при збільшенні радіусу випуклих поздовжніх штампових вставок. У цих перерізах макропотік матеріалу в подовжньому напрямі також менше, ніж в поперечному напрямі. Крім того, в приторцевих перерізах у більш високих заготовках ($H_0 / D_0 = 2{,}0$) інтенсивність набору металу велика, оскільки у нижчих заготовках ($H_0 / D_0 = 1{,}0$) деформація зосереджується в серединній зоні напівфабрикату.

Наявність асиметрії проникнення штампових радіусних вставок в тіло циліндричної заготовки з боку торців призводить до несиметричної форми напівфабрикату відносно осі руху інструменту. При цьому у напівфабрикатів, отриманих з нижчих заготовок ($H_0 / D_0 = 1{,}0$), спостерігається зменшення відносної висоти мінімального відростка (H_1 / H_0) із зростанням відносного радіусу. А у зігнутих напівфабрикатів, отриманих із заготовок з ($H_0 / D_0 = 2{,}0$), збільшення значення характеристики R / D_0 супроводжується зростанням відносного показника H_1 / H_0 (див. рис. 4.3). Із зростанням ступеню деформації відносний показник H_1 / H_2 для заготовок обох типорозмірів знижується, що дозволяє орієнтувати спосіб на виробництво поковок з широким діапазоном (0,5…0,9) відношення мінімального і максимального відростків, у тому числі для виробів із зігнутою віссю.

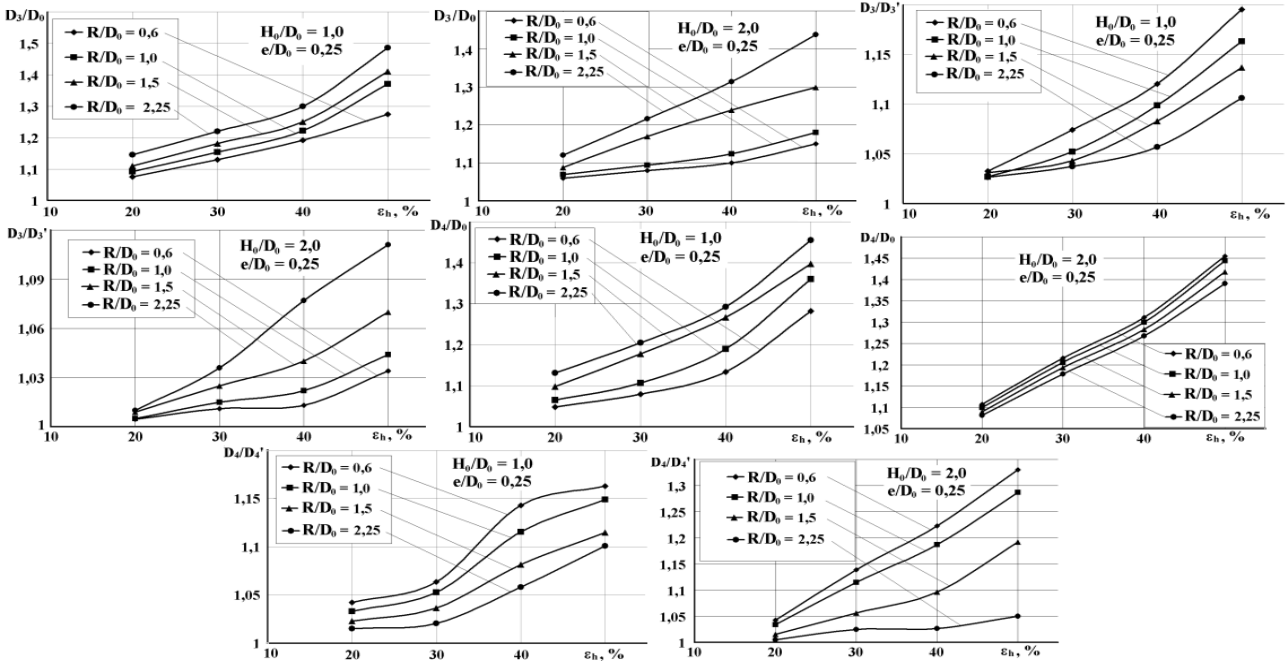


Рисунок 4.2 – Експериментальні залежності зміни діаметральних розмірів зразків від відносного радіусу (R/D_0) випуклих вставок при осаджуванні з фіксованим ексцентриситетом (e/D_0 = 0,25)

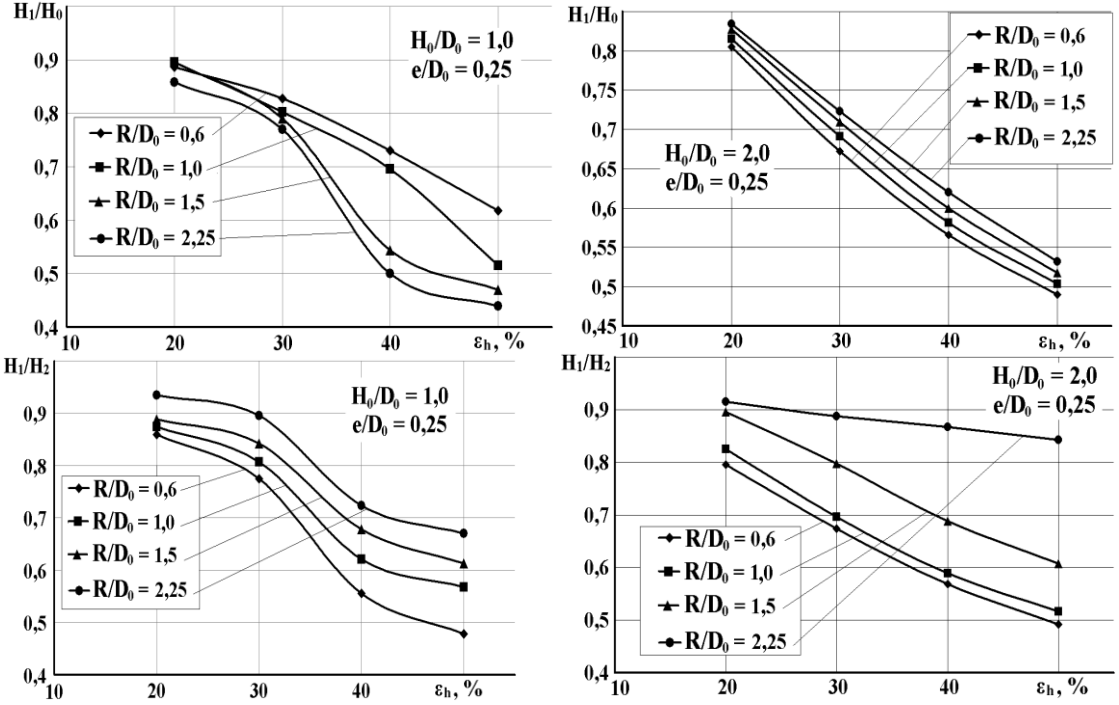


Рисунок 4.3 – Експериментальні залежності зміни висотних розмірів зразків від відносного радіусу (R/D_0) випуклих вставок при асиметричному осаджуванні (e/D_0 = 0,25)

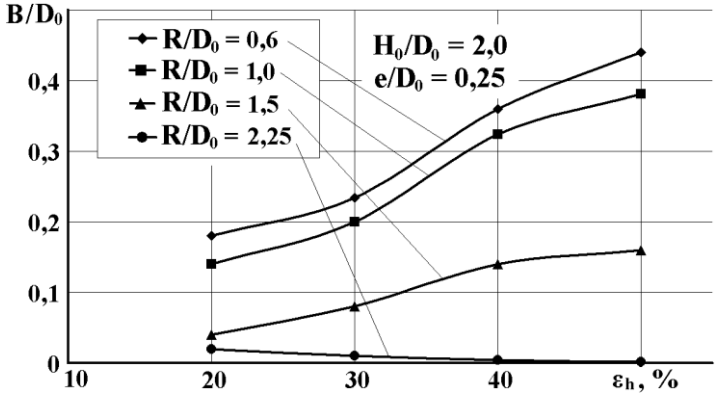


Рисунок 4.4 – Залежність відносного вигину зразків від відносного радіусу (R/D_0) випуклих вставок при асиметричному осаджуванні (e/D_0 = 0,25)

Зменшення величини відносного вигину для заготовок з H_0/D_0 = 2,0 при деформації радіусними вставками з R/D_0 = 2,25 (див. рис. 4.4) пов'язано зі зменшенням ефекту випуклості деформуючого інструменту і збільшенням набору металу в центральній зоні напівфабрикату. Зниження значення величини відносного радіусу випуклих бойків призводить до збільшення відносного прогину в процесі профілювання заготовок у такий спосіб.

4.2 Статистична обробка експериментальної інформації

З метою виконання статистичної обробки експериментальних даних для кожного режиму осаджування використовували 5 ідентичних зразків, тобто кількість паралельних дослідів (вимірів) приймали рівною п’яти.

Статистична обробка включала перевірку відтворюваності експерименту за критерієм Кохрена, одно фактор-

ний дисперсійний аналіз на основі критерію Фішера, а також визначення абсолютної і відносної похибки вимірів.

Перевірка відтворюваності експерименту за критерієм Кохрена. Відтворюваність дослідів визначали шляхом перевірки рівності генеральних дисперсій. Після проведення вимірів геометричних розмірів дослідних зразків розраховували середнє значення, тобто математичне очікування серії вимірювань:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_i \Big/ n, \tag{4.1}$$

де $i = 1, 2, \ldots, n$ – номер паралельного досліду (виміру);

x_i – значення i-го вимірювань.

Значення дисперсії для кожної серії вимірювань розраховували як:

$$D_x = S_x^2 = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \Big/ (n-1). \tag{4.2}$$

Середньоквадратичну похибку результатів серії вимірювань розраховуємо по формулі:

$$S_x = \sqrt{D_x}. \tag{4.3}$$

Однорідність ряду дисперсій $S_1^2, S_2^2, \ldots, S_i^2$ перевіряли за критерієм Кохрена. Перевірка відтворюваності експерименту за критерієм Кохрена ґрунтована на законі розподілу відношення максимальної оцінки дисперсії $\left(S_i^2\right)_{max}$ до суми всіх оцінок дисперсій:

$$G_p = \left(S_i^2\right)_{max} \Big/ \sum_{i=1}^{n} \left(S_i^2\right). \qquad (4.4)$$

Потім перевіряли однорідність ряду дисперсій $S_1^2, S_2^2, \ldots, S_i^2$, яка визначала достовірність врахування усіх сильнодіючих факторів кожного експерименту на одному рівні.

Якщо вичислене за даними експерименту (емпіричне) значення G_p менше критичного значення $G_{кр}$, яке визначено, наприклад, по джерелу [168], тобто якщо $G_p < G_{кр}$, то гіпотезу про однорідність вибіркових дисперсій S_i^2 можна вважати справедливою, у тому числі для оцінки генеральної дисперсії відтворюваності експерименту.

Однофакторний дисперсійний аналіз на основі критерію Фішера. Здійснювали перевірку однорідності усіх вибірок, тобто визначали приналежність усіх експериментальних значень одній генеральній сукупності. Для цього використали процедуру однофакторного дисперсійного аналізу, суть якого полягає в оцінці впливу рівня фактора на отримані експериментальні значення.

Однофакторний дисперсійний аналіз ґрунтується на перевірці значущості оцінок дисперсії за допомогою критерію Фішера (F), розрахункове значення якого визначається співвідношенням між факторною дисперсією $s_{факт}^2$ і залишковою дисперсією $s_{зал}^2$:

$$F = s_{факт}^2 \Big/ s_{зал}^2. \qquad (4.5)$$

Факторну дисперсію $s_{факт}^2$, що характеризує розсіювання по факторах, тобто зміну середнього значення величини при зміні рівня фактора, при числі ступенів свободи

$f = k - 1$ (тут k – кількість дослідів) розраховували по формулі:

$$s^2_{зал} = n\sum_{j=1}^{k}\left(\bar{x}_j - \bar{x}_c\right)^2 \Big/ f \cdot \tag{4.6}$$

де $\bar{x}_c$ – оцінка загального середнього, яку визначали так:

$$\bar{x}_c = \sum_{j=1}^{k} \bar{x}_j \Big/ k \cdot \tag{4.7}$$

Залишкову дисперсію $s^2_{зал}$, що характеризує розсіювання усередині партії, при числі ступенів свободи $f_1 = k(n-1)$ обчислювали як:

$$s^2_{зал} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{k}\left(x_{ij} - \bar{x}_j\right)^2 \Big/ f_1 \cdot \tag{4.8}$$

Повну (загальну) дисперсію s^2, що відображає загальне розсіяння як усередині партії, так і за рахунок рівня фактора, при числі ступенів свободи $f_0 = kn - 1$ визначали таким чином:

$$s^2 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{k}\left(x_{ij} - \bar{x}_c\right)^2 \Big/ f_0 \cdot \tag{4.9}$$

Отримані значення F порівнювали з табличними $F_{кр}$, наведеними в джерелі [168].

Якщо $F < F_{кр}$ при заданому рівні значущості λ, то немає підстав вважати, що незалежний фактор здійснює вплив на розкид середніх значень, тобто усі отримані результати експерименту належать до однієї генеральної сукупності, розподіленої нормально.

Якщо $F > F_{кр}$, то незалежний фактор робить істотний вплив на розкид середніх значень.

Визначення абсолютної і відносної похибки вимірювань. Знаючи коефіцієнт надійності $\alpha = 1 - \lambda$, знаходили коефіцієнт Ст'юдента $t_{\alpha;f}$ при кількості ступенів свободи $f = n - 1$ згідно з джерелом [168].

Абсолютну похибку вимірювань визначали як:

$$\Delta x = t_{\alpha;f} \cdot S_x . \tag{4.10}$$

Істинне значення величини, яку вимірювали, знаходили у межах довірчого інтервалу:

$$\bar{x} - \Delta x \le x \le \bar{x} + \Delta x . \tag{4.11}$$

Остаточний результат записували як:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x . \tag{4.12}$$

Точність вимірювань параметрів, які досліджували, залежить від ряду факторів, які вносять в результати вимірювань певну похибку.

Відносна похибка серії вимірювань:

$$\delta_{\bar{x}} = \pm \Delta x / \bar{x} \cdot 100\% . \tag{4.13}$$

Виконували статистичну обробку початкових даних, таких як початкові L_{0y} і кінцеві L_k довжини зразків, їх висоти h_i і маси M_{Te}, а також площі $F_k^{(e)}$ і периметри $\Pi_k^{(e)}$, отримані за допомогою експериментального методу з комп'ютерною обробкою.

Перевірка за критерієм Кохрена підтвердила відтворюваність усіх експериментів ($G_p < G_{кр}$), при цьому максимальна величина $G_p = 0, 0{,}53905$ зареєстрована для величини $R/D_0 = 1$ для $H_0/D_0 = 2$ при $G_{кр} = 0{,}54$ ($\alpha = 0{,}95$).

Перевірка за критерієм Фішера показала, що для усіх досліджуваних параметрів, які досліджували, фактор (ступінь деформації) робить істотний вплив на розкид середніх значень ($F_p > F_{кр}$), при цьому максимальна величина $F_p = 48717{,}54$ зареєстрована для величини $R/D_0 = 2{,}25$ для $H_0/D_0 = 2$ при $F_{кр} = 27{,}05$.

Величина відносної похибки вимірювань усіх величин не перевищувала 2,09 %.

Результати статистичної обробки макропоказників формозміни H_1, H_2, D_3, D'_3, D_4, D'_4 підтвердили відтворюваність усіх експериментів на основі перевірки за критерієм Кохрена. Дисперсійний аналіз показав істотність зміни параметрів, які досліджувались, залежно від відношення R/D_0 і H_0/D_0.

4.3 Аналіз схеми завантаження заготовки

Метою аналізу було теоретично визначити закономірність впливу умов асиметричного осаджування циліндричної заготовки випуклим радіусним інструментом на положення поверхні розділу плину металу, а, відповідно, на величину зміщення (x_e) максимуму епюри тиску на контакті від зони максимального обтискання.

При цьому необхідно вирішити такі завдання:

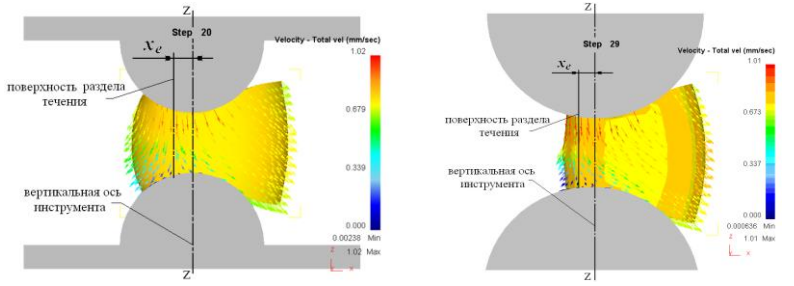
– заздалегідь визначити особливості плину металу заготовки в осередку деформації;

– розробити розрахункову схему процесу асиметричного осаджування радіусним інструментом з урахуванням несиметричності формозміни заготовки;

– при теоретичному рішенні врахувати вплив таких факторів, як початкові розміри заготовки (висота H_0, діаметр D_0), радіус випуклих бойків (R), ексцентриситет (e – асиметрія, див. рис. 2.1) проникнення по осі радіусних бойків відносно осі заготовки, ступінь деформації при осаджуванні (обтискання) $\varepsilon_h = (H_0 - h)/H_0$ (де h – кінцева відстань між бойками після осаджування, див. рис. 2), умови тертя (μ – коефіцієнт тертя) на контакті інструмента та заготовки.

Попереднє визначення характеру плину металу заготовки виконували з використанням спеціалізованого комп'ютерного пакету Deform 3d для скінчено-елементного аналізу процесів обробки металів тиском. Схема асиметричного осаджування циліндричної заготовки випуклим радіусним інструментом наведена на рис. 2.1. Постановочне моделювання проводили для різних умов; приклади результатів моделювання асиметричного осаджування заготовок при μ = 0,3, з позначенням стрілками напряму і швидкості плину матеріалу (векторів переміщення матеріальних часток металу заготовки), наведені на рис. 4.5.

В результаті моделювання підтверджено, що при асиметричному осаджуванні радіусними бойками виникає поверхня розділу плину [178, 179], яка зміщена в область максимальних обтискань заготовки і така, що знаходиться на відстані x_e від вертикальної осі інструменту (див. рис. 4.5), причому $x_e \neq e$. Величина x_e залежить від умов асиметричного осаджування, тобто: $x_e = f(D_0, H_0, R, \varepsilon_h, e, \mu)$ або у відносних величинах $x_e = f(H_0/D_0, R/D_0, \varepsilon_h, e/D_0, \mu)$.



а б

а – асиметрія (по рис. 2.1) – e = 5 мм (e/D_0 = 0,1);
б – асиметрія (по рис. 2.1) – e = 12,5 мм (e/D_0 = 0,25)

Рисунок 4.5 – Результати постановочного моделювання асиметричного осаджування циліндричних заготовок (матеріал – Сталь 40) діаметром D_0 = 50 мм і заввишки H_0 = 50 мм опуклими бойками радіусом R = 30 мм при температурі деформації t = 1100 °С до ступеню обтискання ε_h = 0,5

При теоретичному аналізі осаджування циліндричної заготовки радіусними бойками з асиметрією проникнення в торець, зважаючи на симетричність процесу відносно горизонтальної осі $x'x$, розглядали 1/2 висоти заготовки – верхню половину (рис. 4.6). Деформація по двох сторонах заготовки відбувається несиметрично відносно вертикальній осі. Кут торкання бойка від меншої висоти h до висоти h_1 позначимо через α_1, відповідно кут торкання бойка від висоти h до висоти h_2 – через α_2. З двох сторін заготовки здійснюються абсолютні обтискання різної величини:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h_1 - h = 2\left(R - R\cos\alpha_1\right) = 2R\left(1 - \cos\alpha_1\right); \\ \Delta h_2 &= h_2 - h = 2\left(R - R\cos\alpha_2\right) = 2R\left(1 - \cos\alpha_2\right). \end{aligned} \qquad (4.14)$$

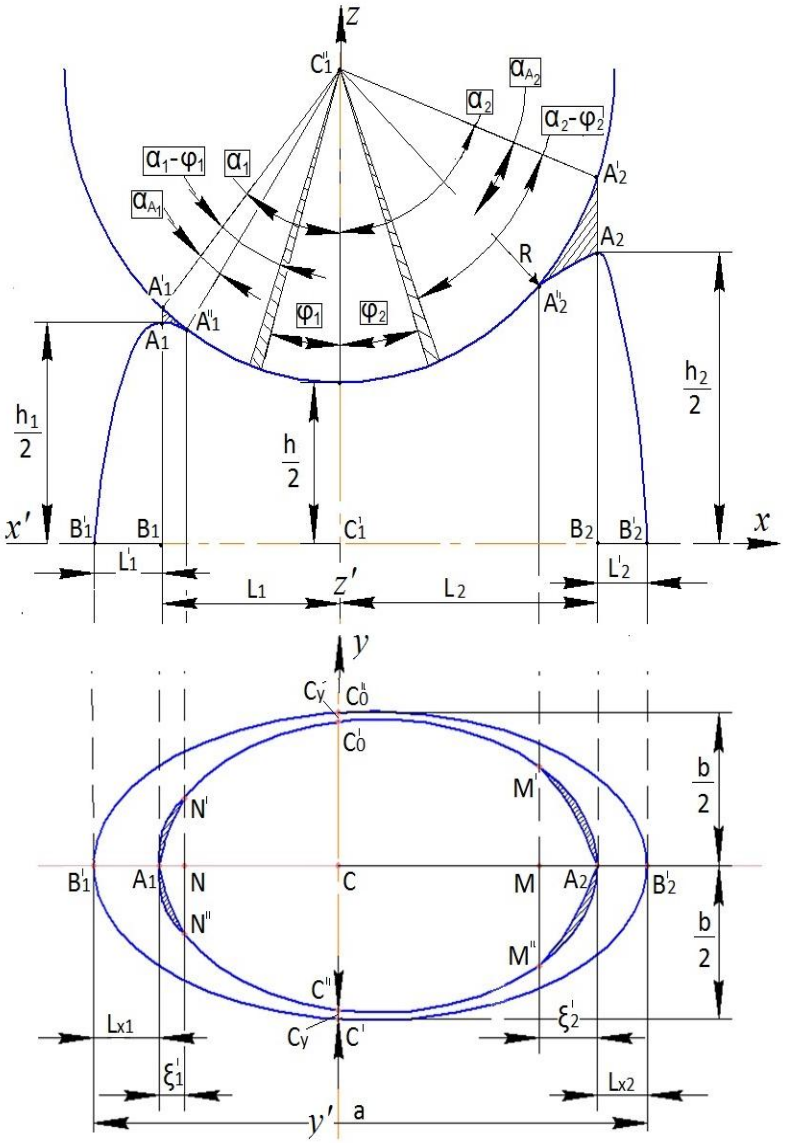


Рисунок 4.6 – Схема асиметричного осаджування циліндричної заготовки

Оскільки $\cos\alpha = \sqrt{1/\left(1+tg^2\alpha\right)}$, то в іншому виді запишемо:

$$\Delta h_1 = 2R\left(1-\sqrt{\frac{1}{1+tg^2\alpha_1}}\right); \quad \Delta h_2 = 2R\left(1-\sqrt{\frac{1}{1+tg^2\alpha_2}}\right). \qquad (4.15)$$

Крім того: $\frac{1}{2}\Delta h = 2R\sin\frac{\alpha}{2}\sin\frac{\alpha}{2}$, тобто в третьому варіанті обтискання можна записати як:

$$\Delta h_1 = 4R\sin^2\frac{\alpha_1}{2}; \qquad \Delta h_2 = 4R\sin^2\frac{\alpha_2}{2}. \qquad (4.16)$$

І, нарешті, враховуючи, що $\sin\frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$, в четвертому варіанті запишемо:

$$\Delta h_1 \approx R\alpha_1^2; \qquad \Delta h_2 \approx R\alpha_2^2. \qquad (4.17)$$

Формули (4.17) справедливі для малих значень кутів α_1 і α_2, тобто при малих обтисканнях заготовки.

Аналізуючи формули (4.14)–(4.17), помітили, що обтискання є тим більшим, чим більшим буде радіус випуклих бойків і кути α_1 і α_2, значення яких залежить від умов тертя і властивостей матеріалу, який деформується.

Зворотна залежність кута контакту від величини обтискання і радіусу профілю бойків для двох сторін заготовки:

$$\alpha_1 = \arccos\left(1-\frac{\Delta h_1}{2R}\right); \quad \alpha_2 = \arccos\left(1-\frac{\Delta h_2}{2R}\right). \qquad (4.18)$$

В іншому варіанті, з рівняння (4.18) отримуємо:

$$\alpha_1 = 2\,arcsin\sqrt{\frac{\Delta h_1}{4R}};\quad \alpha_2 = 2\,arcsin\sqrt{\frac{\Delta h_2}{4R}}\,. \quad (4.19)$$

Також, в третьому варіанті, з рівнянь (4.19) знаходимо:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\Delta h_1}{R}};\qquad \alpha_2 = \sqrt{\frac{\Delta h_2}{R}}\,. \quad (4.20)$$

Аналізуючи формули (4.18)–(4.20), бачимо, що кут торкання α збільшується зі збільшенням абсолютного обтискання Δh і зменшенням радіусу бойків.

Встановлені взаємозв'язки між обтисканнями з двох сторін, радіусом бойків і кутами торкання є чисто геометричними і не відображають повною мірою фізичний сенс процесу осаджування заготовки радіусними бойками з асиметрією навантаження.

При вирішенні теоретичних і технологічних завдань необхідно знати розміри довжин, висот і ширини деформованої заготовки після асиметричного осаджування радіусними бойками. При цьому висоти і ширина з двох сторін осадженої заготовки є клинами складної форми.

Довжини дуг контакту в зоні деформації:

$$l_{\partial 1} = R\alpha_1;\qquad l_{\partial 2} = R\alpha_2\,. \quad (4.21)$$

або

$$l_{\partial 1} = R\,arccos\left(1-\frac{\Delta h_1}{2R}\right);\quad l_{\partial 2} = R\,arccos\left(1-\frac{\Delta h_2}{2R}\right). \quad (4.22)$$

або

$$l_{\partial 1} = 2R\,arccos\left(\sqrt{\frac{\Delta h_1}{4R}}\right);\quad l_{\partial 2} = 2R\,arccos\left(\sqrt{\frac{\Delta h_2}{4R}}\right). \quad (4.23)$$

У виняткових (найбільш грубих) випадках можливе використання такого параметра, як хорда:

$$l_{hord1} = 2R\sin\frac{\alpha_1}{2}; \quad l_{hord2} = 2R\sin\frac{\alpha_2}{2}. \tag{4.24}$$

А оскільки $\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta h}{2l_{hord}}$, то:

$$l_{hord1} = \sqrt{R\Delta h_1}; \qquad l_{hord2} = \sqrt{R\Delta h_2}. \tag{4.25}$$

Довжини деформаційних клинів визначають як горизонтальні проекції хорди або дуг торкання з кожного боку заготовки:

$$l_{\partial x1} = R\sin\alpha_1; \;\; l_{\partial x2} = R\sin\alpha_2. \tag{4.26}$$

Або, з урахуванням (4.25) і при $l_{\partial x}^2 = l_{hord}^2 - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2$, маємо:

$$l_{\partial x1} = \sqrt{\Delta h_1\left(R - \frac{1}{4}\Delta h_1\right)}; l_{\partial x2} = \sqrt{\Delta h_2\left(R - \frac{1}{4}\Delta h_2\right)}. \tag{4.27}$$

Вертикальна проекція хорди або дуги контакту:

$$l_{\partial y1} = \frac{1}{2}\Delta h_1; \qquad l_{\partial y2} = \frac{1}{2}\Delta h_2. \tag{4.28}$$

З урахуванням рівнянь (4.14) і (4.16) отримаємо:

$$l_{\partial y1} = R(1-\cos\alpha_1); \quad l_{\partial y2} = R(1-\cos\alpha_2). \tag{4.29}$$

або

$$l_{\partial y1} = 2R\sin^2\frac{\alpha_1}{2};\quad l_{\partial y2} = 2R\sin^2\frac{\alpha_2}{2}. \qquad (4.30)$$

Висоти деформаційних клинів з двох сторін заготовки визначаються висотами h_1, h_2 і h. Зміна висоти заготовки в зоні деформації, яка визначається поточним кутом φ, з урахуванням рівнянь (4.14)–(4.17):

$$h_\varphi = h + 2R(1-\cos\varphi). \qquad (4.31)$$

або

$$h_\varphi = h + 4R\sin^2\frac{\varphi}{2}. \qquad (4.32)$$

або

$$h_\varphi \approx h + R\varphi^2. \qquad (4.33)$$

Середню висоту деформаційних клинів найточніше можна визначити як середньо інтегральну величину, використовуючи змінну висоту (4.31) або (4.32) і диференціал висоти:

$$dh_\varphi = 2R\sin\varphi d\varphi.$$

При цьому:

$$h_{cp1} = \frac{1}{R\sin\alpha_1}\int_0^{\alpha_1} h_\varphi\frac{dh_\varphi}{2tg\varphi} = \frac{1}{2R\sin\alpha_1}\int_0^{\alpha_1}[h+2R(1-\cos\varphi)]2R\cos\varphi d\varphi;$$

$$h_{cp2}=\frac{1}{R\sin\alpha_2}\int_0^{\alpha_2}h_\varphi\frac{dh_\varphi}{2tg\varphi}=\frac{1}{2R\sin\alpha_2}\int_0^{\alpha_2}\left[h+2R(1-\cos\varphi)\right]2R\cos\varphi d\varphi\cdot$$

Після інтегрування і підстановки меж:

$$h_{cp1}=\frac{1}{2}(h_1+h)-R\left(\frac{\alpha_1}{\sin\alpha_1}-1\right);\quad h_{cp2}=\frac{1}{2}(h_2+h)-R\left(\frac{\alpha_2}{\sin\alpha_2}-1\right) \qquad (4.34)$$

або

$$h_{cp1}=\frac{1}{2}(h_1+h)-\left[\frac{R\arccos\left(1-\frac{\Delta h_1}{2R}\right)}{\sqrt{\Delta h_1\left(R-\frac{1}{4}\Delta h_1\right)}}-1\right];\quad h_{cp2}=\frac{1}{2}(h_2+h)-\left[\frac{R\arccos\left(1-\frac{\Delta h_2}{2R}\right)}{\sqrt{\Delta h_1\left(R-\frac{1}{4}\Delta h_2\right)}}-1\right] \qquad (4.35)$$

Іноді допустимо користуватися наближеними формулами:

$$h_{cp1}\approx\frac{1}{2}(h_1+h);\qquad h_{cp2}\approx\frac{1}{2}(h_2+h). \qquad (4.36)$$

або

$$h_{cp1}\approx\sqrt{h_1h}\qquad \text{і}\qquad h_{cp2}\approx\sqrt{h_2h}\,. \quad (4.37)$$

Ширина деформаційних клинів на початку і в кінці дуги торкання бойка із заготовкою з кожного її боку визначається шириною заготовки *b* після деформації, а також шириною зони контакту заготовки з радіусним бойком. Ця ширина змінюється від величини $C_0'C''$ по центру заготовки до величини $N'N''$ і далі до точки A_1 з одного боку, а також до величини $M'M''$ і далі до точки A_2 з іншого боку заготовки (див. рис. 4.6). Ширина деформаційних клинів з

двох сторін заготовки залежить від величини ексцентриситету *e* при осаджуванні і зміщень, що реалізовуються, від ексцентриситету, ξ_1' і ξ_2' (див. рис. 4.6).

Тоді довжини проекцій на вісь *x′x* поверхонь контакту:

$$l_1 = l_{\partial x1} = CN + NA_1 = CN + \xi_1'; \; l_2 = l_{\partial x2} = CN + NA_2 = CN + \xi_2' \quad (4.38)$$

Відмітимо, що осаджена заготовка деформується з нерівномірним розширенням уздовж осі *x′x* і осі *y′y*. Тоді ширина поверхні контакту буде:

$$C_0'C' = C_0''C'' - 2C_y = b - 2C_y. \quad (4.39)$$

Довжина поверхні контакту від центру в ліву і праву сторону:

$$A_1A_2 = B_1'B_2' - l_1' - l_2'; \;\; A_1A_2 = a - C_{x1} - C_{x2}, \quad (4.40)$$

де

$$a = B_1'B_1 + B_1C' + C'B_2 + B_2B_2' = B_1'A_1 + A_1C + CA_2 + A_2B_2'.$$

Величини кінцевих розмірів по ширині і довжині можна вичислити залежно від початкових і кінцевих розмірів на даних ділянках заготовки по відомих формулах для розрахунку розширення [180, 181] (Л. Жеза, Е. Зібеля, С. І. Губкіна, О. П. Чекмарьова, Б. Л. Бахтинова, О. І. Целікова та ін.). Проте первинна циліндрична форма заготовки призводить до істотних погрішностей в розрахунках по формулах для розширення, справедливих для процесів обтискання штаби прямокутного поперечного перерізу валками (прокатки). Це вимагає використання формул

для обчислення значень стріл діжкоутворення $B_1'B_1 = B_1'A_1 = C_{x1}$, $B_2B_2' = A_2B_2' = C_{x2}$ і $C_0C' = CC' = C_y$ (див. рис. 4.6), запропонованих Я. М. Охрименко (наведені в роботах [182, 183]), які для умов несиметричного осаджування запишуться таким чином:

$$C_{x1} = \frac{3}{4} 2l_1 \left(\sqrt{1 + \frac{\lambda_{x1}'}{1 - \lambda_{x1}'}} - 1 \right); \; C_{x2} = \frac{3}{4} 2l_2 \left(\sqrt{1 + \frac{\lambda_{x2}'}{1 - \lambda_{x2}'}} - 1 \right); \quad (4.41)$$

$$C_y = \frac{3}{4} 2C_0'C \left(\sqrt{1 + \frac{\lambda_y'}{1 - \lambda_y'}} - 1 \right). \quad (4.42)$$

Тут

$$\lambda_{x1}' = 0{,}01\lambda_{x1}; \quad \lambda_{x2}' = 0{,}01\lambda_{x2}; \quad \lambda_y = 0{,}01\lambda_{y1}' \quad (4.43)$$

Параметри λ_{x1}', λ_{x2}', λ_y залежать від початкових і кінцевих розмірів заготовки на даній ділянці, при цьому:

$$\lambda = \frac{5a_l \left(15 - \frac{D_0}{H_0} \right) \left[\left(1 - 0{,}1 \frac{D_0}{H_0} \right) + 0{,}06 \frac{D_0}{H_0} a_l \right]}{\sqrt{\frac{D_0}{H_0}} (a_l + 1)^2}, \quad (4.44)$$

де D_0 і H_0 – діаметр і висота початкової циліндричної заготовки.

Для обчислення величини λ_{x1} і λ_{x2} у формулу (4.44) замість a_l необхідно підставити відповідно:

$$a_1 = \frac{D_0\sqrt{\frac{H_0}{h_1}}}{h_1} - \frac{D_0}{H_0} \quad \text{і} \quad a_2 = \frac{D_0\sqrt{\frac{H_0}{h_2}}}{h_2} - \frac{D_0}{H_0}. \qquad (4.45)$$

Аналогічно, для обчислення величини λ_y у формулу (4.44) необхідно підставити:

$$a = \frac{D_0\sqrt{\frac{H_0}{h}}}{h} - \frac{D_0}{H_0}.$$

Якщо відомі матеріал і умови деформації заготовки, величину λ можна визначити точніше, використовуючи результати робіт [184–186].

Змінна площа поперечного перерізу деформаційного клину по дузі контакту з лівого і правого боку заготовки відповідно:

$$q_{\varphi 1} = h_{\varphi 1} l_{\varphi 1} \qquad \text{і} \quad q_{\varphi 2} = h_{\varphi 2} l_{\varphi 2}. \qquad (4.46)$$

Площу контактної поверхні деформаційних клинів з радіусним бойком можна виразити через середню ширину клину і дугу контакту:

$$S_1 = b_{cp1} R\alpha_1 \quad \text{і} \quad S_2 = b_{cp2} R\alpha_2. \qquad (4.47)$$

Тут $b_{\text{ср1}}$ і $b_{\text{ср2}}$ можна розраховувати як середню ширину площ проекцій на вісь *x* лівої і правої частини поверхні контакту заготовки з діжкою, тобто:

$$b_{cp1} = \frac{S_{x1}}{A_1 C} \quad \text{і} \quad b_{cp2} = \frac{S_{x2}}{A_2 C}, \tag{4.48}$$

де

$$S_{x1} = \frac{\pi}{8} A_1 C \cdot C_0' C \quad \text{і} \quad S_{x2} = \frac{\pi}{8} A_2 C \cdot C C_0'.$$

Тоді:

$$b_{cp1} = \frac{\pi}{8} C_0' C \quad \text{і} \quad b_{cp2} = \frac{\pi}{8} C C_0'. \tag{4.49}$$

Отже:

$$S_1 = \frac{\pi}{8} C_0' C \cdot R\alpha_1 \quad \text{і} \quad S_2 = \frac{\pi}{8} C C_0' \cdot R\alpha_2. \tag{4.50}$$

Тут $C_0' C = C_0' C' / 2$, де $C_0' C'$ обчислюють за виразом (4.40). Щоб визначити силу тиску металу на бойки, важливо знати проекцію цих поверхонь на напрям хорди дуги контакту:

$$S'_1 = 2 b_{cp1} R \sin\frac{\alpha_1}{2} \quad \text{і} \quad S'_2 = 2 b_{cp2} R \sin\frac{\alpha_2}{2}. \tag{4.51}$$

або

$$S'_1 = b_{cp1}\sqrt{R(h_1 - h)} \quad \text{і} \quad S'_2 = b_{cp2}\sqrt{R(h_2 - h)}. \tag{4.52}$$

Горизонтальні проекції контактних поверхонь:

$$S_{x1} = b_{cp1} R \sin\alpha_1 \quad \text{і} \quad S_{x2} = b_{cp2} R \sin\alpha_2. \tag{4.53}$$

або

$$S_{x1} = b_{cp1}\sqrt{(h_1 - h)\left[R - \frac{1}{4}(h_1 - h)\right]}; \; S_{x2} = b_{cp2}\sqrt{(h_2 - h)\left[R - \frac{1}{4}(h_2 - h)\right]}. \tag{4.54}$$

Вертикальні проекції:

$$S_{y1} = \frac{1}{2} b_{cp1}(h_1 - h) \quad \text{і} \quad S_{y2} = \frac{1}{2} b_{cp2}(h_2 - h), \quad (4.55)$$

або

$$S_{y1} = b_{cp1} R(1 - \cos\alpha_1) \quad \text{і} \quad S_{y2} = b_{cp2} R(1 - \cos\alpha_2), \quad (4.56)$$

або

$$S_{y1} = b_{cp1} 2R \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} \quad \text{і} \quad S_{y2} = b_{cp2} 2R \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}. \quad (4.57)$$

При осаджуванні циліндричної заготовки з асиметрією навантаження плин металу під тиском випуклого (радіусного) бойка відбувається нерівномірно і несиметрично. Розглянемо схему асиметричного осаджування циліндричної заготовки радіусними бойками, причому, зважаючи на симетричність відносно горизонтальної осі *x*-*x*, розглядатимемо тільки верхню половину профілю (рис. 4.7).

Нерівномірне витікання металу з проміжку між радіусних бойків призводить до несиметричного переміщення його об'ємів до правої і лівої частини профілю. Тоді очевидно, що виникає деякий нейтральний переріз, що характеризує лінію розділу плину. Цей переріз не знаходитиметься в області найкоротшої відстані між опуклостями бойків (висота перерізу відповідає величині *h* профільованої заготовки), а буде зміщений в область більших швидкостей витікання.

Положення цього критичного перерізу визначається кутом γ (рис. 4.7). Величина цього кута, як і значення x_e, залежить від ступеню обтискання заготовки ε_h, початкових відносних розмірів заготовки H_0 / D_0, величини ексцентри-

ситету (асиметрії) e, відносного радіусу бойків R/D_0, коефіцієнта тертя на контакті заготовки f_t, тобто $\gamma = f(H_0/D_0, R/D_0, \varepsilon_h, e/D_0, f_t)$. Положення цього кута γ впливає на розподіл нормальних і дотичних сил на контактній поверхні. Відповідно, область максимального тиску може знаходитися не в місці перерізу z_0–z_0 (див. рис. 4.7), а в перерізі, який визначається кутом γ. Цей нейтральний кут знаходили аналогічно рішенню Екелунда-Павлова [180, 181] для подовжньої прокатки за умови рівноваги сил, які діють в правій і лівій частині профілю заготовки відносно кута γ при несиметричному витіканні металу.

Для цього в зоні торкання виділимо елементарний кут $d\varphi$, при цьому елементарна дуга торкання рівна $Rd\varphi$. А елементарна площа торкання $b_\varphi Rd\varphi$, де b_φ – ширина перерізу в області, яка визначається кутом $d\varphi$.

У загальному вигляді запишемо значення радіальної сили:

$$dP = p_\varphi b_\varphi R d\varphi.$$

А значення неправильної по дотичній до контактної поверхні елементарної сили тертя буде:

$$dT = f \cdot dP = f \cdot p_\varphi b_\varphi R d\varphi,$$

де p_φ – контактне нормальне напруження, тобто тиск на контакті.

Для визначення умов рівноваги горизонтальних складових і дотичних сил в зоні деформації в інтегральній формі, з урахуванням різного напряму сил тертя в лівій і правій зонах витікання металу, необхідно визначити площі контактних поверхонь на ділянках № 1, 2, 3, 4 і 5 (рис. 4.7).

Вважаємо, що вертикальні проекції профілю заготовки мають форму піввісей еліпса.

Площа еліпса:

$$S_{ellips} = \pi ab\,, \tag{4.58}$$

тут a і b – піввісі еліпсу.

Площа ділянки еліпса:

$$S = \int_a^b (y_2 - y_1)dx\,. \tag{4.59}$$

Параметричне рівняння еліпса має вигляд:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \tag{4.60}$$

де для наших умов (див. рис. 4.7):

$$y_1 \cong y_2 \approx \frac{b}{2}\,. \tag{4.61}$$

Площу контакту на першій ділянці вичислимо як:

$$S_1 = 2\int_{x_2}^{x_1} \frac{y_2}{x_1}\sqrt{x_1^2 - x^2}\,dx\,. \tag{4.62}$$

При спрощеному розгляді елементарна ділянка $y_1 y_1' y_2' y_2$ може бути розглянута як прямокутник або трапеція, тоді визначимо площу на другій ділянці:

а) $S_2 = b \cdot a$ – площа прямокутника (враховуючи припущення (4.61));

б) $S_2 = x_2(y_2 + y_1)$ – площа трапеції (точніше).

Площа контакту на третій ділянці:

$$S_3 = 2\int_{x_0}^{x_3} \frac{y_1}{x_3 - x_0}\sqrt{(x_3 - x_0)^2 - x^2}\,dx\,. \qquad (4.63)$$

При вирішенні контактного завдання вводимо спрощення, що область контакту поширюється в лівій і правій частині профілю до вертикальних проекцій точок профілю x_4 і x_5 на радіус опуклого бойка (див. рис. 4.7 – 4.9).

Тоді віртуальні площі контакту S_4 і S_5 вичислимо так:

$$S_4 = 2\left[\frac{y_2}{x_4 - x_2}\int_{x_4 - x_2}^{x_2}\sqrt{(x_4 - x_2)^2 - x^2}\,dx - \frac{y_2}{x_1 - x_2}\int_{x_1 - x_2}^{x_2}\sqrt{(x_1 - x_2)^2 - x^2}\,dx\right]; \qquad (4.64)$$

$$S_5 = 2\left[\frac{y_1}{x_5 - x_0}\int_{x_0}^{x_5}\sqrt{(x_5 - x_0)^2 - x^2}\,dx - \frac{y_1}{x_3 - x_0}\int_{x_0}^{x_3}\sqrt{(x_3 - x_0)^2 - x^2}\,dx\right]. \qquad (4.65)$$

Ширину даних ділянок розраховуємо як:

$$b_1 = \frac{S_1}{x_1 - x_2}\quad b_2 = \frac{S_2}{x_0 - x_2} \approx \frac{S_2}{R\gamma}\quad b_3 = \frac{S_3}{x_3 - x_0}\,. \qquad (4.66)$$

Для спрощення слід прийняти: $\overset{\cup}{AB} = AB$.

Тоді площа вертикального контакту на ділянці 4:

$$S_c = \frac{1}{2}ab = \frac{1}{2}c\left(h_1^{'} - h\right) = \frac{1}{2}ch_{1c}\,. \qquad (4.67)$$

Крім цього:

$$S_c = \int_{x_4}^{x_1}\left(\sqrt{R^2 - x^2} - h_1\right)dx\,, \qquad (4.68)$$

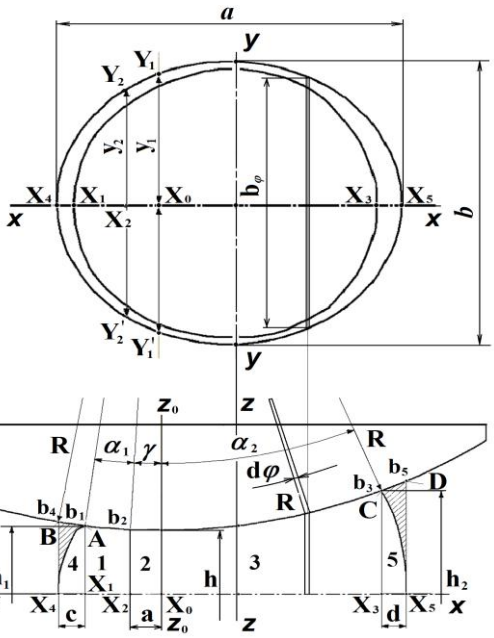


Рисунок 4.7 – Схема розподілу на зони деформації при асиметричному осаджуванні радіусними бойками

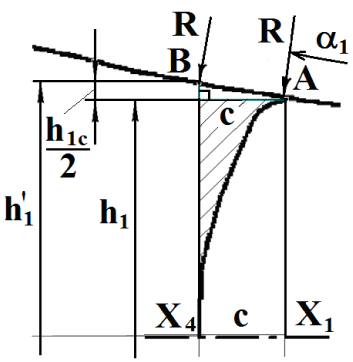


Рисунок 4.8 – Схема вертикального контакту правої сторони напівфабрикату з бойком

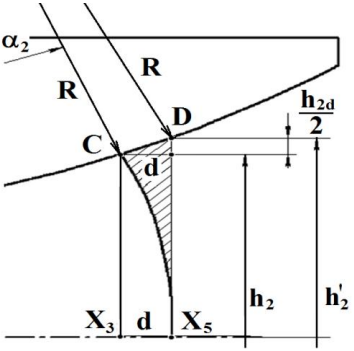


Рисунок 4.9 – Схема вертикального контакту лівої сторони напівфабрикату з бойком

Тоді:

$$h_{1c} = \left(h_1^{'} - h\right) = \frac{2S_c}{c}. \qquad (4.69)$$

Звідки маємо:

$$h_1^{'} = \frac{2S_c}{c} + h_1. \qquad (4.70)$$

Аналогічним чином для ділянки 5 приймаємо: $\overset{\cup}{CD} = CD$. Тоді отримаємо, що

$$S_d = \int_{x_3}^{x_5} \left(\sqrt{R^2 - x^2} - h_2\right) dx; \quad S_d = \frac{1}{2} dh_{2d}; \qquad (4.71)$$

$$h_{2d} = \frac{2S_d}{d}; \quad h_2^{'} = \frac{2S_d}{d} + h_2. \qquad (4.72)$$

Елементарні сили на поверхні контакту:

$$dP = p_\varphi (b_1 + b_2 + b_3) R d\varphi. \qquad (4.73)$$

Тоді запишемо умову рівноваги горизонтальних складових радіальних і дотичних сил в зоні деформації:

$$\begin{aligned} &-\int_{\alpha_1}^{\gamma} P_{\varphi 1} b_1 R \sin\varphi d\varphi + \int_{\alpha_1}^{\gamma} f P_{\varphi 1} b_1 R \cos\varphi d\varphi - \int_{\gamma}^{0} P_{\varphi 2} b_2 R \sin\varphi d\varphi + \\ &+ \int_{\gamma}^{0} f P_{\varphi 2} b_2 R \cos\varphi d\varphi + \int_{0}^{\alpha_2} P_{\varphi 2} b_3 R \sin\varphi d\varphi - \int_{0}^{\alpha_2} f P_{\varphi 3} b_3 R \cos\varphi d\varphi = 0. \end{aligned} \qquad (4.74)$$

Після рішення цього інтеграла і перетворень запишемо:

$$\begin{aligned}
&\left(\left(fP_{\varphi 2}b_2R - fP_{\varphi 1}b_1R\right)^2 + \left(P_{\varphi 2}b_2R - P_{\varphi 1}b_1R\right)^2\right)\sin^2\gamma + \\
&+2\left[\begin{pmatrix}\cos\alpha_1 P_{\varphi 1}b_1R + \sin\alpha_1 fP_{\varphi 1}b_1R - P_{\varphi 2}b_2R + \\ +\cos\alpha_2 P_{\varphi 3}b_3R - P_{\varphi 3}b_3R + \sin\alpha_2 fP_{\varphi 3}b_3R\end{pmatrix}\left(fP_{\varphi 2}b_2R - fP_{\varphi 1}b_1R\right)\right]\sin\gamma + \\
&+\left[\begin{pmatrix}P_{\varphi 2}b_2R - \cos\alpha_1 P_{\varphi 1}b_1R - \sin\alpha_1 fP_{\varphi 1}b_1R - \\ \cos\alpha_2 P_{\varphi 3}b_3R + P_{\varphi 3}b_3R - \sin\alpha_2 fP_{\varphi 3}b_3R\end{pmatrix}^2 - \left(fP_{\varphi 2}b_2R - fP_{\varphi 1}b_1R\right)^2\right] = 0
\end{aligned} \tag{4.75}$$

Розглядаючи рівняння (4.76) запишемо:

$$A = \left(fP_{\varphi 2}b_2R - fP_{\varphi 1}b_1R\right)^2 + \left(P_{\varphi 2}b_2R - P_{\varphi 1}b_1R\right)^2;$$

$$B = 2\left[\begin{pmatrix}\cos\alpha_1 P_{\varphi 1}b_1R + \sin\alpha_1 fP_{\varphi 1}b_1R - P_{\varphi 2}b_2R + \\ +\cos\alpha_2 P_{\varphi 3}b_3R - P_{\varphi 3}b_3R + \sin\alpha_2 fP_{\varphi 3}b_3R\end{pmatrix}\left(fP_{\varphi 2}b_2R - fP_{\varphi 1}b_1R\right)\right];$$

$$C = \begin{pmatrix}P_{\varphi 2}b_2R - \cos\alpha_1 P_{\varphi 1}b_1R - \sin\alpha_1 fP_{\varphi 1}b_1R - \\ \cos\alpha_2 P_{\varphi 3}b_3R + P_{\varphi 3}b_3R - \sin\alpha_2 fP_{\varphi 3}b_3R\end{pmatrix}^2 - \left(fP_{\varphi 2}b_2R - fP_{\varphi 1}b_1R\right)^2.$$

Тоді вираз (4.75) представимо у вигляді квадратного рівняння:

$$A\sin^2\gamma - B\sin\gamma + C = 0. \tag{4.76}$$

Приймаючи $\sin\gamma \approx \gamma$, як при розгляді обтискання штаби радіусним інструментом [180, 181], з деяким допущенням запишемо:

$$A\gamma^2 - B\gamma + C = 0. \tag{4.77}$$

Рівняння (4.77) вирішуємо через дискримінант D, тобто запишемо:

$$\gamma_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{D}}{2C}; \quad D = B^2 - 4AC. \tag{4.78}$$

Для підстановки у вирази (4.75), (4.77), (4.78) необхідних даних можна скористатися результатами робіт по

експериментальному і скінченно-елементному аналізу формозміни і силових режимів при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками циліндричних заготовок [162, 165, 166, 169, 177]. Після використання таких даних для вибіркових випадків були побудовані графічні залежності зміни нейтрального кута γ при осаджуванні циліндричних заготовок випуклими радіусними вставками з асиметрією навантаження, приклади яких наведені на рис. 4.10.

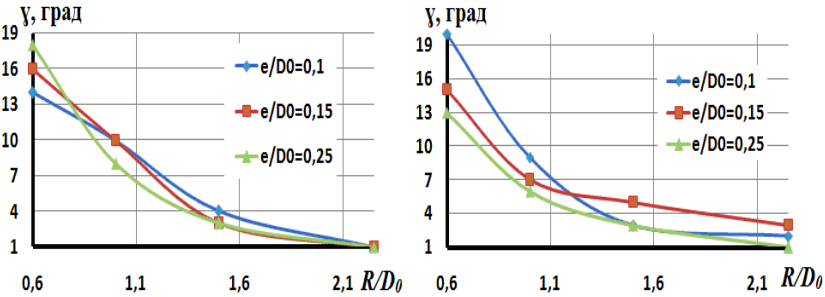


Рисунок 4.10 – Графік зміни нейтрального кута γ при асиметричному осаджуванні циліндричних заготовок з $H0/D_0$ = 1,0 (а) і H_0/D_0 = 1,3 (б) випуклими радіусними вставками до ε_h = 50 % при e/D_0 = 0,1; 0,15; 0,25 і R/D_0 = 0,6;1,0; 1,5; 2,25

Таким чином, залежність величини нейтрального кута γ від умов асиметричного осаджування не є однозначною. У загальному випадку можна зазначити, що зі збільшенням значень обтискання ε_h і параметра асиметрії e/D_0, зниженням відносного радіусу інструменту R/D_0, зменшенням відносної висоти заготовки H_0/D_0 величина нейтрального кута γ зростає.

Висновки по розділу 4

1. Розроблений і досліджений спосіб отримання профільованих напівфабрикатів асиметричним осаджуванням циліндричних заготовок штамповими радіусними вставками, застосований до умов виробництва поковок на кривошипних пресах. Встановлені закономірності формозміни заготовок при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками, на підставі яких доцільна розробка нових енерго- і ресурсозберігаючих процесів об'ємного штампування, що дозволять понизити навантаження на чимтові штампувальні рівчаки пресових штампів.

2. Перевірка за критерієм Фішера показала, що для усіх параметрів, які досліджували, фактор (ступінь деформації) робить істотний вплив на розкид середніх значень ($F_р > F_{кр}$), при цьому максимальна величина $F_р = 48717{,}54$ зареєстрована для величини $R/D_0 = 2{,}25$, для $H_0/D_0 = 2$ при $F_{кр} = 27{,}05$.

Величина відносної похибки вимірювань усіх величин не перевищувала 2,09 %.

Результати статистичної обробки макропоказників формозміни H_1, H_2, D_3, D'_3, D_4, D'_4 підтвердили відтворюваність усіх експериментів перевіркою за критерієм Кохрена. Дисперсійний аналіз показав істотність зміни параметрів, що досліджувались, залежно від відношень R/D_0 і H_0/D_0.

3. Встановлено, що при осаджуванні випуклими радіусними бойками нейтральний переріз, що визначає поверхню розділу плину металу заготовки в протилежні сторони, не знаходиться в поперечному перерізі, що відповідає мінімальній відстані між верхнім і нижнім бойком. На основі складання і вирішення рівняння рівноваги проекцій сил на горизонтальну вісь відносно нейтрального кута (аналогічно рішенню Екелунда-Павлова) виявлена його аналітична

залежність від умов асиметричного осаджування циліндричної заготовки радіусними бойками. Показано, що нейтральний переріз зміщений від вертикальної осі інструменту в бік зміщення асиметрії навантаження. Встановлено, що нейтральний кут, що визначає нейтральний переріз, збільшується зі збільшенням значень обтискання ε_h і параметра асиметрії e/D_0, зниженням відносного радіусу інструменту R/D_0 і зменшенням відносної висоти заготовки H_0/D_0. Отримані результати дозволяють прогнозувати нерівномірність деформації осаджування випуклими радіусними вставками і є необхідними для врахування при проектуванні технологічних процесів штампування на основі профілюючого асиметричного осаджування заготовок радіусним інструментом. Врахування зміщення нейтрального перерізу при проектуванні технологій штампування з попереднім асиметричним осаджуванням радіусними бойками на кривошипних пресах дозволяє контролювати перекіс повзуна на профілюючій операції і знижувати його значення шляхом раціонального розташування заготовки в штамповому просторі.

Розділ 5
ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ГАРЯЧОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ПОКОВОК ПЛИТ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

5.1 Розробка класифікації поковок, для яких застосовується спосіб профілювання заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками

Особливості формозміни заготовок при підготовчій операції осаджування випуклими радіусними вставками зумовлюють напрями її використання в технологіях виробництва широкої номенклатури поковок.

Управління конфігурацією профільованого напівфабрикату, отриманого асиметричним осаджуванням циліндричної заготовки радіусними штамповими вставками, здійснюють шляхом вибору необхідного ступеню деформації осаджування (ε_h) і радіусу випуклості вставки (R/D_0). Крім того, на форму заготовки після осаджування впливатиме відношення початкової висоти (H_0) до діаметру (D_0) заготовки і значення асиметрії (e) [187].

Як встановлено в процесі комплексних досліджень, асиметричне осаджування заготовок з $H_0/D_0 \approx 2{,}0$ ("відносно високих") супроводжується формуванням прогину напівфабрикату на середині висоти [171, 172]. Таким чином, бічний профіль заготовки виходить зігнутим.

При асиметричному осаджуванні заготовок з $H_0/D_0 \approx 1{,}0$ ("відносно низьких") бічний профіль профільованого напівфабрикату є нерівномірно випуклим (нерівномірна діжка) [171, 172]. Втискування випуклих радіусних вставок в торцеві поверхні циліндричних заготовок формує висотну нерівномірність деформації у вигляді виступів. Тобто торцевий профіль "відносно високих" заготовок і

"відносно низьких" після запропонованого варіанту осаджування є увігнутим.

На рис. 5.1 наведені основні варіанти профілювання заготовок осаджуванням і систематизація типових виробів, при цьому виділені три стадії проходження напівпродукту: А – заготовок, що профілюються асиметричним осаджуванням випуклими радіусними штамповими вставками; Б – профільованих заготовок (напівфабрикатів); В – готових поковок.

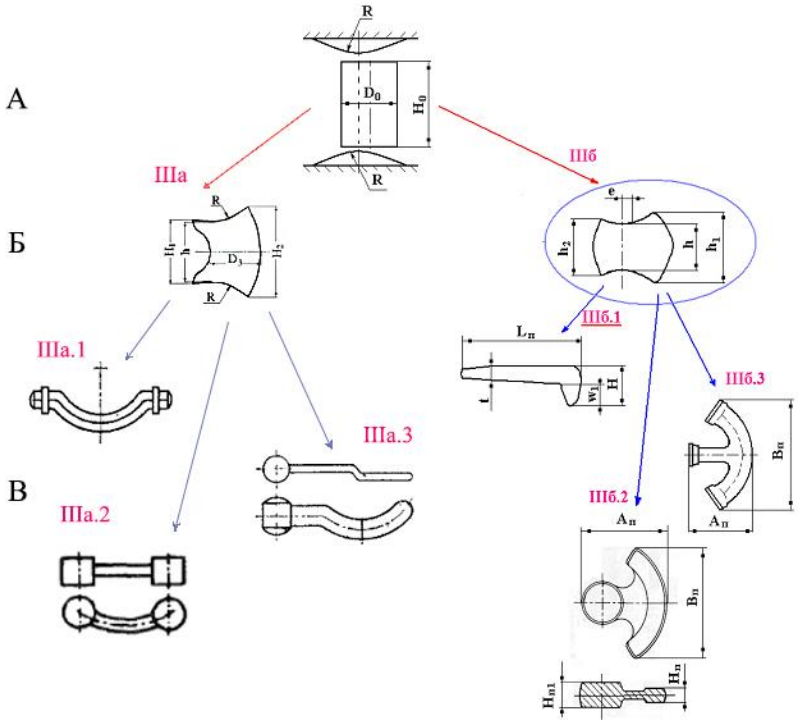


Рисунок 5.1 – Профілювання заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставкам в технологіях ковальсько-штампувального виробництва

Прогнозування і управління формозміною напівфабрикатів при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками (див. рис. 5.1) дозволяє досягати їх найкращого наближення до конфігурації поковок.

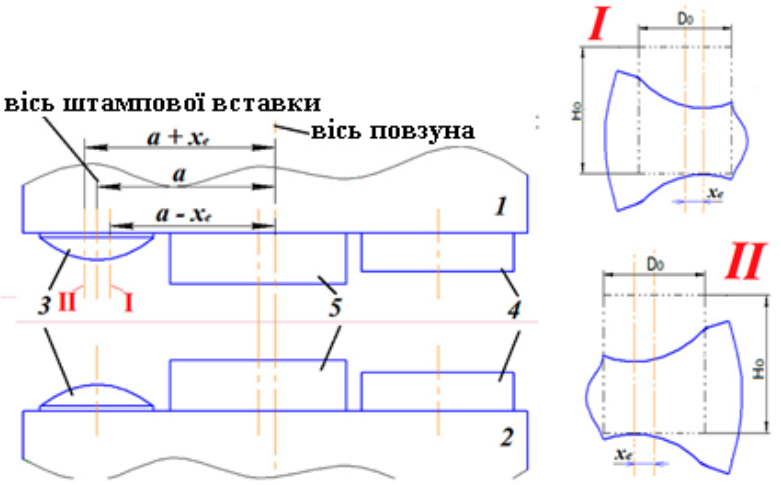
Асиметричне осаджування радіусними штамповими вставками призводить до формування напівфабрикатів (IIIб), на основі яких раціонально штампувати поковки подовжено-зігнутої форми, що вимагає рівчака з криволінійним роз'ємом або згинального рівчака (IIIа.1, IIIа.3), з вигином (IIIб.2), з тонким полотном і наявністю вертикальних відростків (IIIб.1), поковки із зігнутою віссю і наявністю центрального потовщення (IIIб.2) або відростка (IIIб.3). Обтискання радіусними вставками з шириною меншою, ніж діаметр заготовки, сприяє інтенсифікації радіального плину і відповідає початковим умовам втискування деформуючого інструменту в торець заготовки, що показано в роботах [188–190].

5.2 Силові режими і вплив збільшення асиметрії проникнення штампових вставок в торці заготовки на перекоси повзуна пресу

В процесі асиметричного осаджування циліндричної заготовки радіусними штамповими вставками на КГШП виникає додатковий перекіс повзуна пресу, який за рахунок асиметричного розташування заготовки в робочому просторі штампових вставок можна або збільшити (рис. 5.2, б II), або зменшити (рис. 5.2, б I).

Багатокривошипні преси призначені для сприйняття позацентрового прикладання сили деформації на повзуні (рис. 5.3). Напрямні повзуна кривошипної машини повинні забезпечувати необхідну точність його переміщення при дотриманні заданих умов навантаження і проміжків. При взаємодії повзуна з напрямними на поверхнях останніх

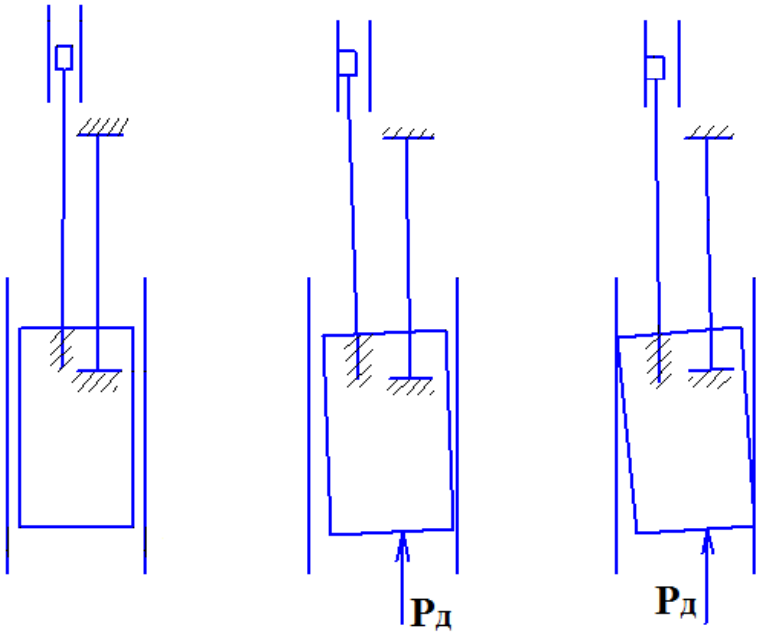
виникають нормальні контактні напруження – питомі зусилля, що обумовлені реактивними силами в напрямних Для забезпечення довговічності повзуна, що направляє, і збереження впродовж тривалого часу початкових точних характеристик машини максимальні розрахункові питомі зусилля q^{max} не повинні перевищувати тих, що допускаються [191].



а б

а – штамповий простір КГШП;
б – варіанти розташування напівфабрикату в штамповому просторі

Рисунок 5.2 – Схема розташування заготовки в штамповому просторі КГШП



а б в

а – в початковому положенні;
б – на початку роботи; в – під навантаженням

Рисунок 5.3 – Перекіс повзуна з додатковими напрямними [191]

Як відомо [191], для розрахунку q^{max} необхідно знати реактивну силу R, характер розподілу питомих сил по довжині контакту, проміжки і податливість опорних поверхонь напрямних та ін.

Виконаємо розрахунок рівноваги повзуна з хоботом вертикального пресу в напрямних, розташованих в площині ГВМ (рис. 5.4). Після нескладних перетворень отримуємо вираз для визначення реакцій в нижній R_H і верхній R_B

точках прикладання напрямних повзуна з урахуванням асиметричного осаджування.

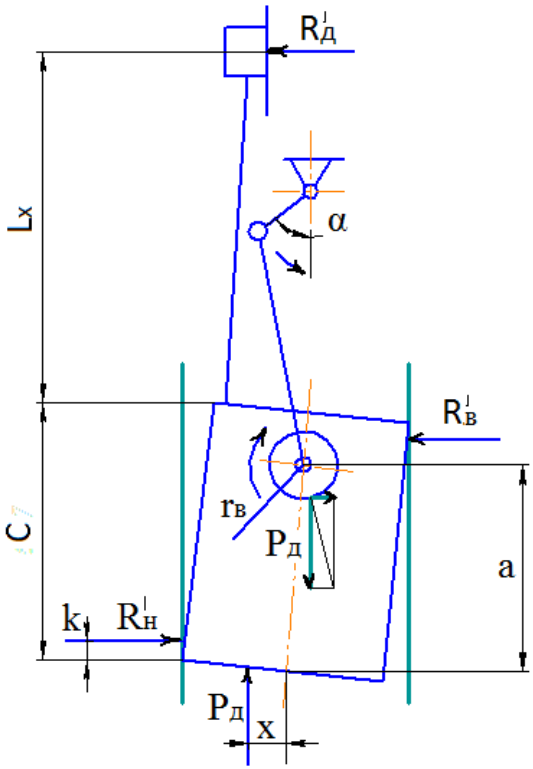


Рисунок 5.4 – Схема для визначення реакцій напрямних, розташованих в площинах ГВМ [191]

$$R_{\text{н}} = \frac{P_{\text{д}}((x+\mu r_B)+\lambda sin\alpha_H(c-a-k))}{c-2k}; \qquad (5.1)$$

$$R_B = \frac{P_{\text{д}}((x+\mu r_B)+\lambda sin\alpha_H(a-k))}{c-2k}, \qquad (5.2)$$

де $P_д$ – сила деформації;

x – зміщення точки прикладення сили;

μ – коефіцієнт тертя в шарнірах механізму;

$r_В$ – радіус цапфи малої головки шатуна;

λ – коефіцієнт шатуна;

$\alpha_Н$ – кут повороту кривошипа;

c – довжина основних напрямних;

a – відстань від центру муфти до краю основних напрямних;

k – ширина напрямних.

Тоді максимальні питомі зусилля в напрямних:

$$q_{max} = \frac{R}{1.2km_0}, \tag{5.3}$$

де R – реакція в нижній і верхній точках прикладання напрямних повзуна;

1.2 – коефіцієнт, що враховує перехід від параболічного закону до трикутного;

m_0 – сумарна ширина основних напрямних;

k – зміщення реакції.

Причому k розраховується так:

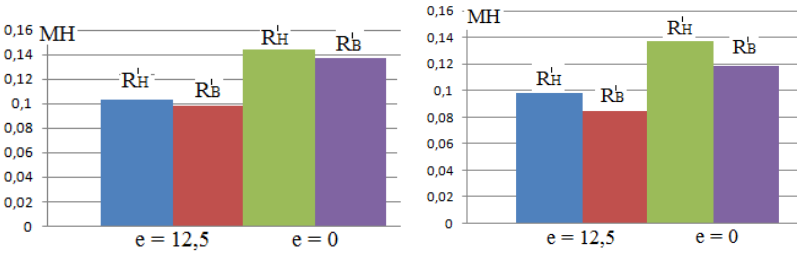
$$k = \frac{0.01c}{\Delta c + \Delta_{уп}}, \tag{5.4}$$

де Δc – сумарна складова кінематичного проміжку і теплового розширення;

$\Delta_{уп}$ – пружна податливість нормальних реакцій напрямних при притисненні повзуна по площині і при місцевому проникненні тіла повзуна в напрямні.

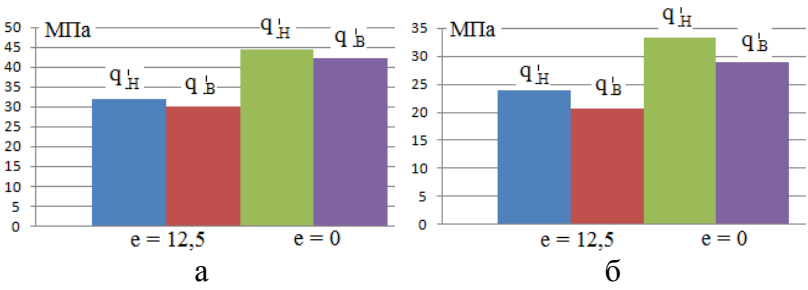
Дані для розрахунку беремо, виходячи з параметрів пресу (16 МН і 40 МН) при асиметричному осаджуванні радіусними штамповими вставками.

Виходячи з отриманих результатів розрахунку, побудуємо порівняльні діаграми для значення реакцій в нижній і верхній точках проникнення напрямних повзуна і максимальних питомих зусиль в нижній і верхній точках основних напрямних (рис. 5.5 і рис. 5.6).



а – прес 16 МН; б – прес 40 МН

Рисунок 5.5 – Діаграма значення реакцій в нижній і верхній точках прикладання напрямних повзуна



а – прес 16 МН; б – прес 40 МН

Рисунок 5.6 – Діаграма значення максимальних питомих сил в нижній і верхній точках основних напрямних

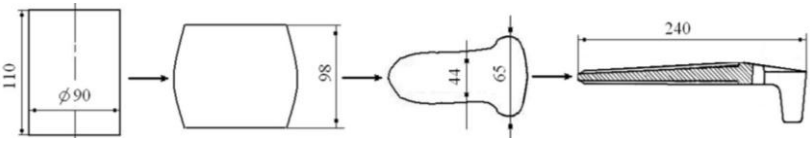
5.3 Порівняльний аналіз варіантів технології штампування поковки «Плита рухома»

Поковку "Плита рухома" (рис. 5.7), що є складовою частиною поглинаючого апарату типу Т2 для зчеплення залізничних вагонів і цистерн, штампують в умовах ЗАТ "Азовелектросталь" (м. Маріуполь) на кривошипному гарячештампувальному пресі (КГШП) номінальною силою 40 МН.

Рисунок 5.7 – Поковка «Плита рухома»

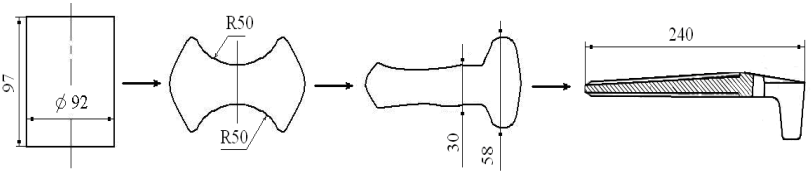
Базова технологія (рис. 5.8, а) виробництва поковки "Плита" (матеріал – Сталь 38ХС ДСТУ 4543-71, маса поковки без облоя – 3,77 кг) включає відрізок від прутка циліндричної заготовки з розмірами ∅90×110 мм (маса 5,49 кг), її індукційний нагрів до 1100 °С, вертикальну

установку і осаджування плоскими плитами на 10 % для видалення окалини, попереднє і кінцеве штампування у відкритих рівчаках з подальшим обрізанням облоя в гарячому стані на кривошипному пресі обріза зусилля 4,0 МН [192]. Подання поковки з облоєм від КГШП до пресу обріза робиться транспортером.



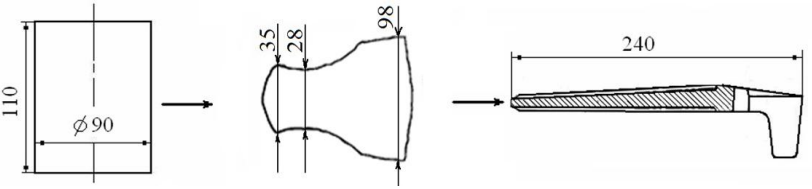
а

а – за базовою заводською технологією



б

б – із застосуванням осаджування випуклими плитами без ексцентриситету



в

в – за новою запропонованою технологією із застосуванням осаджування випуклими плитами з ексцентриситетом навантаження

Рисунок 5.8 – Ескізи переходів штампування поковки "Плита рухома" [194]

Технологічний процес супроводжувався нестабільними кінцевими розмірами поковки в області відростка через недоштампування до необхідних розмірів. Це пояснюється тим, що низькі поковки типу "Плита" з тонким полотном вимагають великих питомих зусиль (тисків) на гравюрі для повного фінішного оформлення розмірів виробу, а відсутність проміжного наближення форми заготовки до конфігурації поковки призводить до несприятливого розподілу тисків по площі її проекції. Великі ступені обтискання і швидке охолодження полотна плоскої поковки на штампі приводить до значного зростання опору деформації металу, що збільшує долю пружної деформації станини пресу і призводить до недоштампування і завищеної товщини облою.

В якості профілюючої операції для наближення заготовки до геометрії гравюри чорнового штампу автором [193] було запропоновано провести осаджування випуклими плитами (рис. 5.8, б). Це дозволило понизити масу заготовки з 5,49 кг до 5,09 кг, тобто досягти економії металу 400 г на кожній поковці, що складає 7,45 % від маси заготовки або 11 % від маси поковки. При цьому частково виключено недоштампування відростка і забезпечено повне оформлення полотна поковки при зниженні товщини облою до нормованої величини, також відмічено підвищення стійкості остаточних гравюр штампу на 14 %.

Для локалізації тисків в області оформлення відростка, зниження пружної деформації станини пресу, поліпшення заповнення гравюри штампу запропоновано виконувати замість операції осаджування заготовки плоскими і випуклими бойками операцію асиметричного осаджування радіусними штамповими вставками (рис. 5.8, в). Подібне профілювання заготовки дозволяє здійснити витягування напівфабрикату у напрямі максимального габаритного ро-

зміру, забезпечити розподіл об'ємів металу між областями формування відростка і подовження полотна поковки.

Для перевірки і підтвердження результатів було проведено скінчено-елементне моделювання процесу штампування деталі типу "Плита рухома" [193, 194]. Моделювання проводили в пакеті скінчено-елементного аналізу Deform 3d (тимчасова ліцензія №8145).

Матеріал заготовки – Сталь 40, при цьому модель зміцнення, також як і граничні умови, брали відповідно до умов, запропонованих програмою. Температурні умови приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С. Задана кількість скінчених елементів складала 50000 шт., але в процесі моделювання це значення змінювалося з поправкою на мінімальний розмір зерна елементу, рівний 2 мм, і перебудовою сітки в місцях локальної деформації. Коефіцієнт контактного тертя при деформації, згідно з рекомендаціями джерела [160], приймали f = 0,3. Моделі інструменту були побудовані в програмному пакеті КОМПАС–3d [195].

Поковка має загальну довжину 240 мм, містить широке полотно (ширина 150 мм) і відросток шириною 60 мм. Скінчено-елементна модель поковки плити на фінішній стадії штампування з схемою вимірювання розподілу інтенсивностей напружено-деформованого стану (НДС) в подовжньому і поперечному перерізі наведена на рис. 5.9.

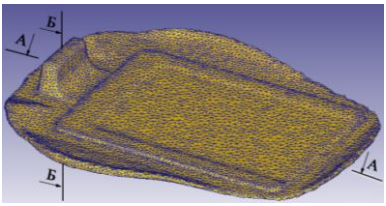
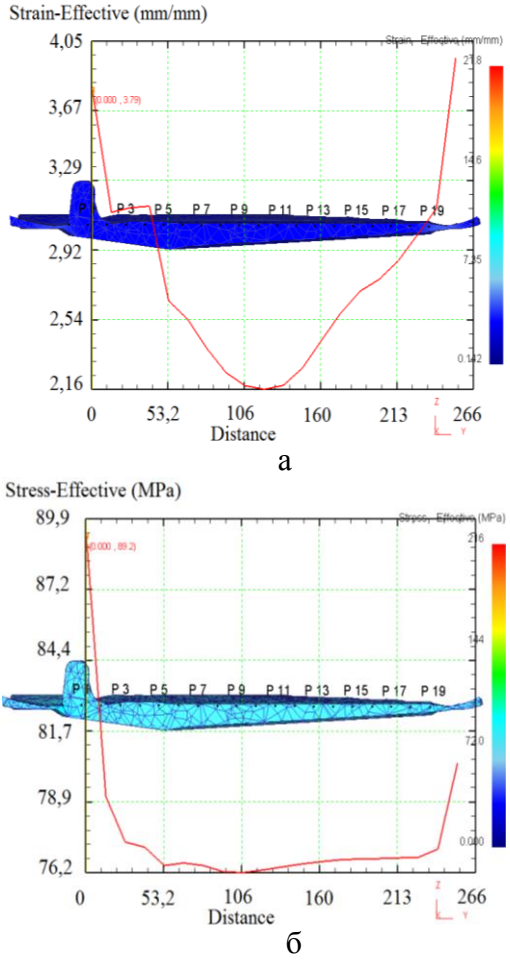


Рисунок 5.9 – Схема вимірювання розподілу інтенсивностей НДС поковки плити в остаточному рівчаку

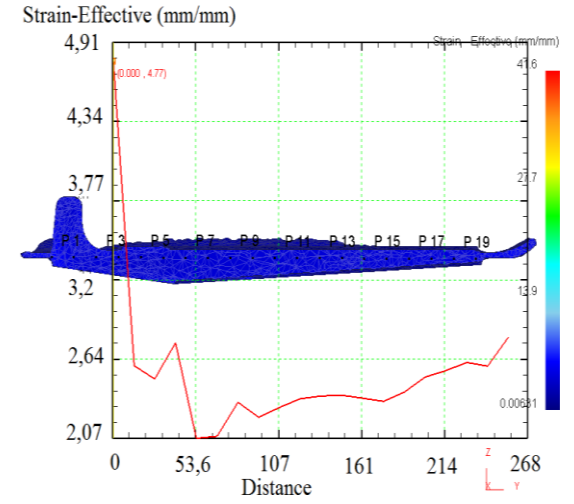
За результатами моделювання побудовані графіки розподілу інтенсивностей напружень і інтенсивностей деформацій в подовжньому і поперечному напрямах (рис 5.10–5.15).



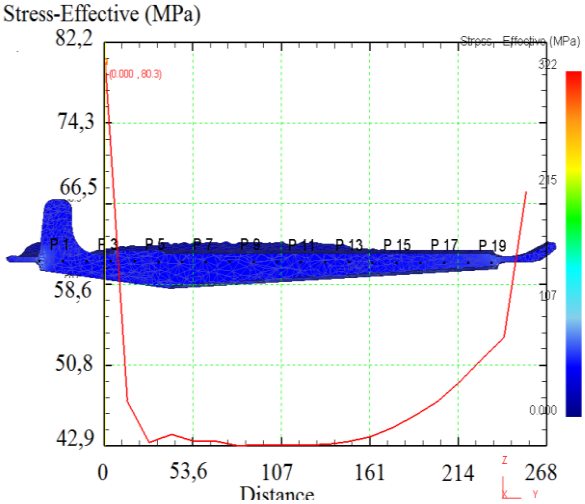
а

б

Рисунок 5.10 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) в подовжньому перерізі (А-А) після штампування за базовою заводською технологією

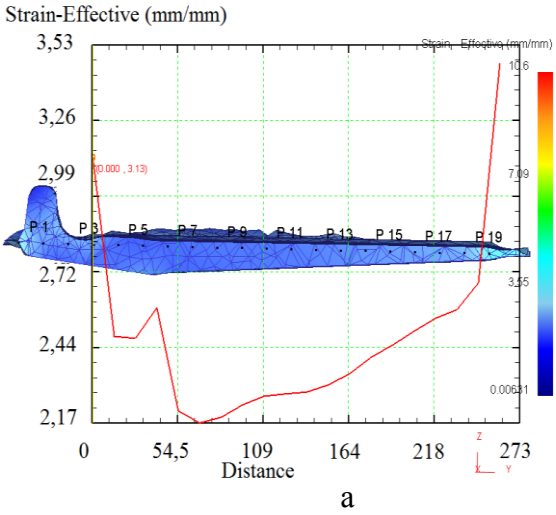


а

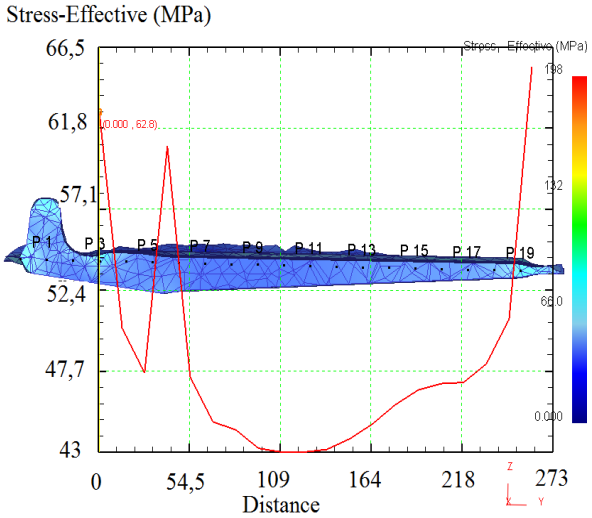


б

Рисунок 5.11 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) в подовжньому перерізі (А-А) після штампування із застосуванням осаджування штамповими радіусними вставками

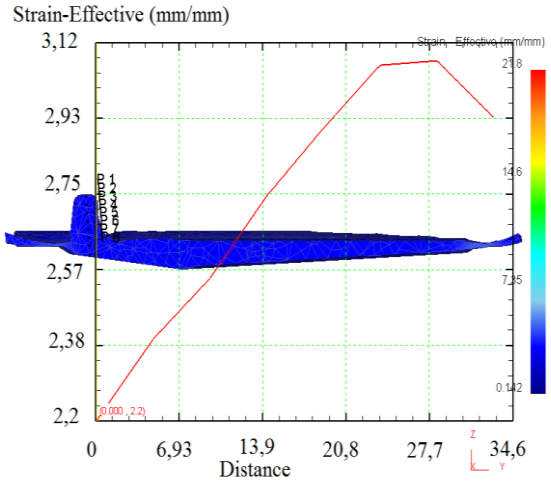


а

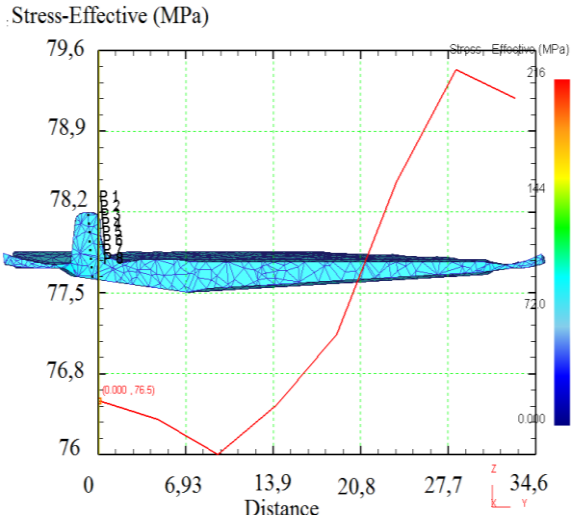


б

Рисунок 5.12 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) в подовжньому перерізі (А-А) після штампування із застосуванням асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками

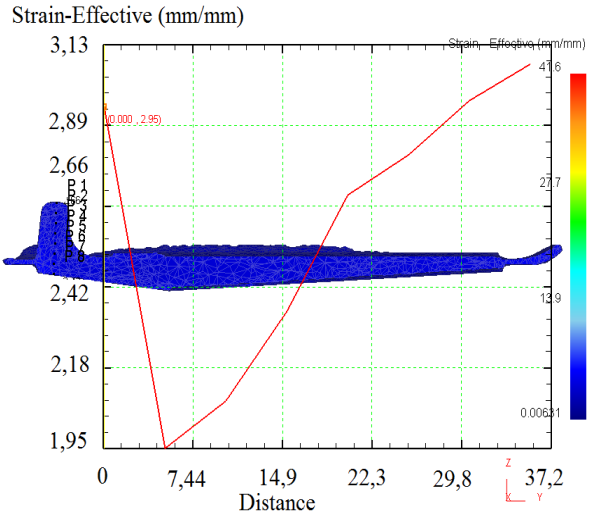


а

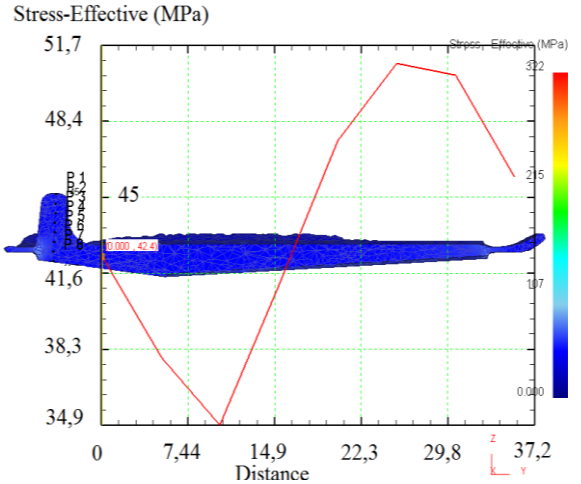


б

Рисунок 5.13 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) в поперечному перерізі (Б-Б) після штампування за базовою заводською технологією

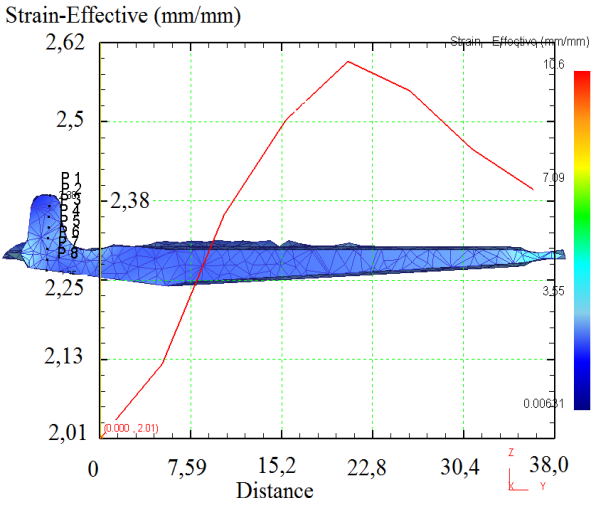


а

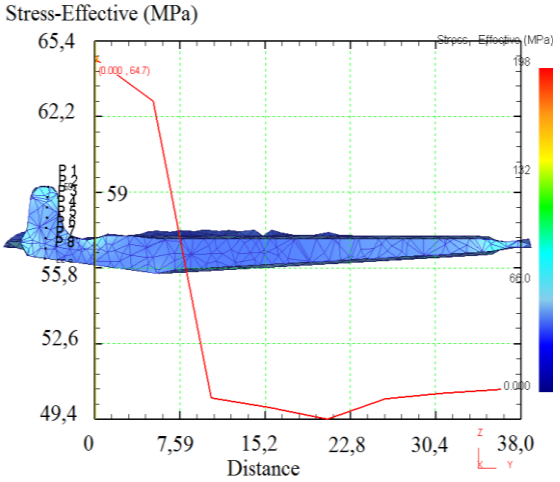


б

Рисунок 5.14 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) в поперечному перерізі (Б-Б) після штампування із застосуванням осаджування випуклими плитами без асиметрії



а



б

Рисунок 5.15 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) в поперечному перерізі (Б-Б) після штампування із застосуванням асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками

На рис. 5.10–5.12 наведені графіки розподілу інтенсивностей напружень і інтенсивностей деформацій в подовжньому перерізі заготовки. Графіки показують значне падіння показників НДС на подовжній ділянці зони формування відростка у разі штампування в чистовому рівчаку із застосуванням асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками в якості профілюючої операції.

На рис. 5.13–5.15 показані графіки розподілу інтенсивностей напружень і інтенсивностей деформацій в поперечному перерізі в зоні формування відростка. З графіків видно зростання показників НДС в напрямі виступу відростка при штампуванні з використанням асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками в якості профілюючої операції, що говорить про повне заповнення металом рівчакового простору.

Відзначається зниження інтенсивності напружень в чистовомуу рівчаку на 36 % порівняно з штампуванням за базовою технологією без профілювання і на 16 % порівняно з технологією з симетричним профілюванням радіусним інструментом.

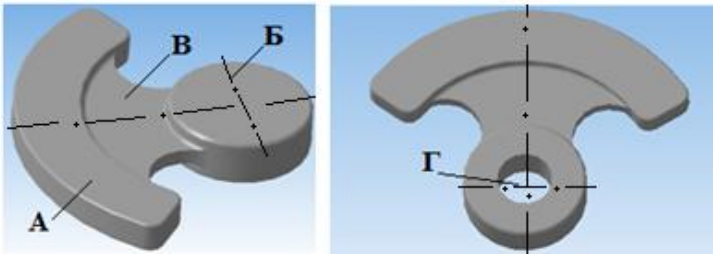
5.4 Порівняльний аналіз технології штампування поковки "Супорт"

Вказана поковка використовується в машинобудівних конструкціях, сприймає деформації вигину і розтягування. Матеріал – Сталь 40 (ДСТУ 1050-88), маса деталі – 3,188 кг, маса поковки (з призначеними по ДСТУ 7505 припусками і напуском на отвір) – 3,4 кг.

Штампування такої поковки може бути здійснене на пароповітряному штампувальному молоті (ПШМ) і кривошипному гарячештампувальному пресі (КГШП).

Залежно від варіантів виготовлення і обладнання, яке використовується, можливе застосування способів багато-

рівчакового штампування [196]. Варіанти штампування на ПШМ не розглядали як менш раціональні як з точки зору матеріаломісткості, так і з точки зору орієнтування на цехи, обладнані КГШП.



а б

а – опорна частина; б – сполучна (кріпильна) частина;
в – перехідна частина; г – отвір в деталі [197]

Рисунок 5.16 – Поковка "Супорт" (а) і деталь з отвором (б)

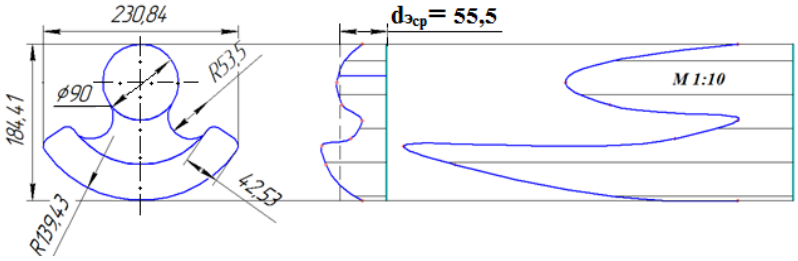
Аналізували три варіанти штампування поковки "Супорт" [198]:

1. Штампування із заготовки без попереднього профілювання.

2. Штампування із заготовки, профільованої асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками.

3. Багаторівчакове штампування з однієї заготовки з радіальним розташуванням чотирьох поковок.

Для розробки технологічних процесів для даної поковки була побудована її епюра діаметрів і епюра перерізів (рис. 5.17).



а б в

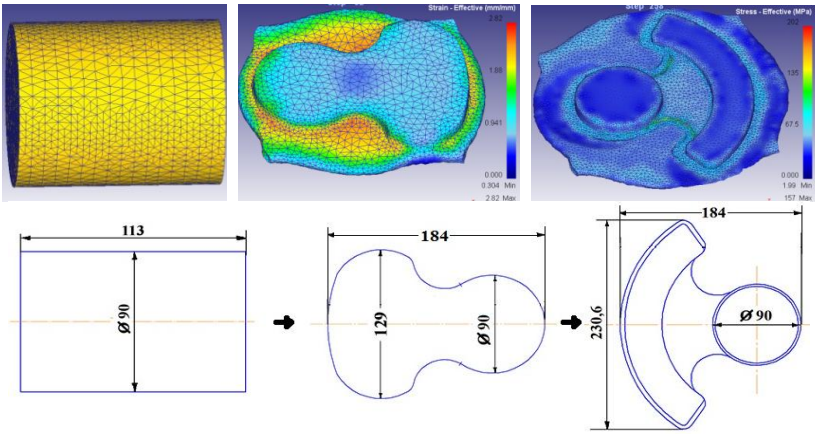
Рисунок 5.17 – Поковка "Супорт" (а), епюра перерізів (б) і епюра діаметрів (в)

Для усіх варіантів моделювання здійснювали в пакеті скінчено-елементного аналізу Deform 3d (ліцензія №8145). Модель зміцнення, також як і граничні умови, узяті відповідно до умов, запропонованих в програмі. Температурні умови приймали ізотермічними, температура деформації 1100 °С (індукційний нагрів). Моделі інструменту були побудовані в програмному пакеті КОМПАС-3d.

Перший варіант виробництва поковки "Супорт" (рис. 5.18) включає відрізку від прутка циліндричної заготовки з розмірами ∅90×113 мм (маса 5,38 кг), нагрів, горизонтальну установку в чорновий рівчак, попереднє і остаточне штампування у відкритих рівчаках з подальшим обрізанням облою в гарячому стані на кривошипному пресі зусиллям 6,3 МН. Подання поковки з облоєм від КГШП до пресу для обрізання облою здійснюється транспортером.

Технологічний процес супроводжувався нестабільними остаточними розмірами поковки в крайових зонах опорної частини через недоштампування до необхідних розмірів. Це пояснюється тим, що поковки "Супорт" з тонким полотном і перепадами поперечного перерізу вимагають великих питомих сил (тисків) на гравюрі для повного кінцевого оформлення розмірів виробу, а відсутність про-

міжного наближення форми заготовки до конфігурації поковки призводить до несприятливого розподілу тисків по гравюрі. Великі ступені обтискання і швидке охолодження полотна плоскої поковки на штампі приводить до значного зростання опору деформації металу, що збільшує долю пружної деформації станини пресу і призводить до недоштампування і завищеної товщини облою.



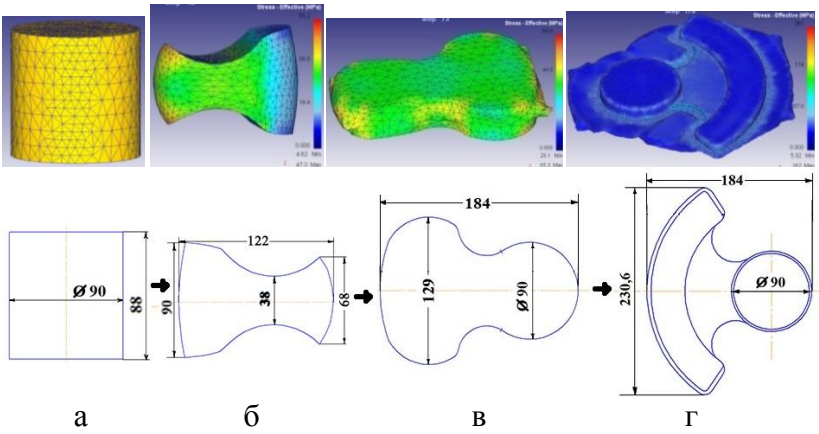
а б в

а – заготовка; б – попереднє штампування;
в – фінішне штампування

Рисунок 5.18 – Технологія штампування без попереднього профілювання

Другий варіант включав профілюючу операцію асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками для наближення форми заготовки до геометрії гравюри чорнового рівчака (рис. 5.19). Це дозволило понизити масу заготовки з 5,38 кг до 4,277 кг, тобто досягти економії металу на 1,103 кг на кожній поковці (на 20 %). При цьому

виключено часткове недоштампування і забезпечено повне оформлення полотна поковки.



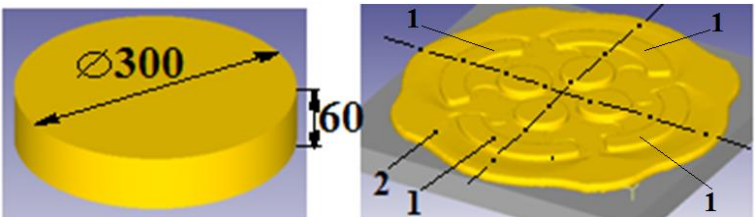
а – заготовка; б – профілювання;
в – попереднє штампування; г – фінішне штампування

Рисунок 5.19 – Технологія з попереднім профілюванням асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками

Для локалізації тисків в області "А" (див. рис. 5.16), зниження пружної деформації станини пресу, поліпшення заповнення гравюри штампу запропоновано виконувати операцію асиметричним осаджуванням заготовки штамповими радіусними вставками (рис. 5.19). Подібне профілювання дозволяє перерозподілити об'єм металу по довжині розрахункової заготовки (епюра діаметрів) і забезпечити розподіл об'ємів металу між границями формування областей "А", "Б" і "В" (див. рис. 5.16).

У третьому варіанті представлений процес багатоштучного штампування поковки із заготовки діаметром

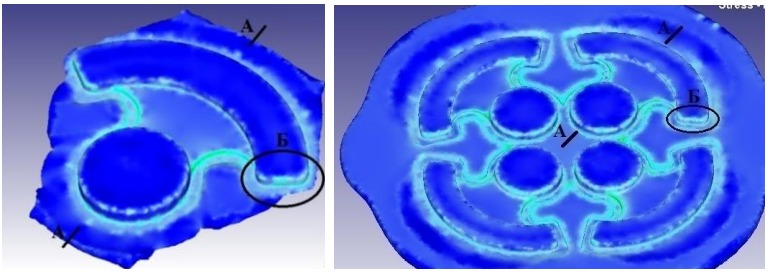
300 мм і заввишки 60 мм в штампі при хрестоподібному розташуванні рівчаків (див. рис. 5.20).



1 – поковка; 2 – облой

Рисунок 5.20 – Багатоштучне штампування

Скінчено-елементна модель поковки плити на кінцевій стадії штампування з схемою вимірювання розподілу інтенсивностей напружено-деформованого стану (НДС) в подовжньому і поперечному перерізі приведена на рис. 5.21.



а б

а – в звичайному штампі; б – багатоштучне штампування

Рисунок 5.21 – Скінчено-елементна модель відштампованої поковки і подовжній переріз А-А і переріз Б-Б, в яких проводили аналіз НДС [199]

Для побудови графіків розподілу НДС в перерізі А-А поковки в чистовому рівчаку було вибрано 20 контрольних точок (рис. 5.22, а) для вимірювань, а в перерізі Б-Б – 10 контрольних точок (рис. 5.22, б) для визначення інтенсивностей напружень і інтенсивностей деформацій.

а б

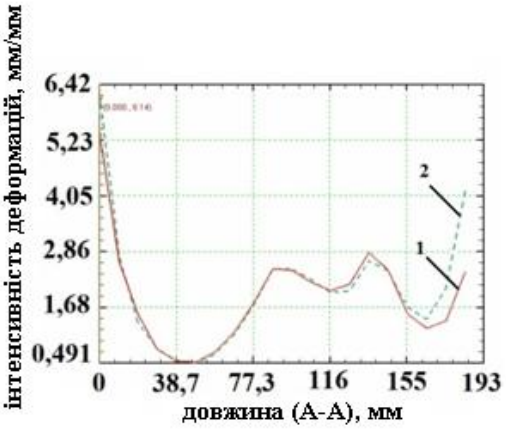
а – переріз А; б – переріз Б

Рисунок 5.22 – Схема для вимірювання показників НДС у вказаних перерізах

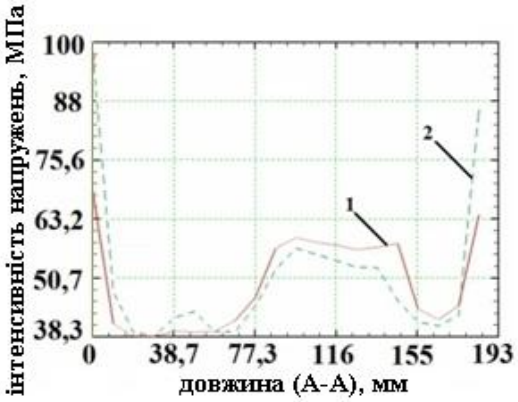
За результатами моделювання побудовані графіки розподілу інтенсивностей напружень і інтенсивностей деформацій в подовжньому напрямі (А) і в перерізі (Б) по трьох технологіях (рис. 5.23–5.26).

Графіки показують падіння значень інтенсивностей напружень і інтенсивностей деформацій в перехідній частині поковки (переріз А-А) на 8 % після закінчення штампування із застосуванням асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками в якості профілюючої операції. У перерізі Б-Б видно підвищення інтенсивності напружень на 5 % і інтенсивності деформацій на 25 % в місці утворення облою у разі штампування поковки із застосуванням попереднього профілювання асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками, що говорить про краще заповнення порожнини рівчака металом. У разі багатоштучного штампування найбільша інтенсивність деформації на остаточній стадії штампування спосте-

рігається в кріпильній частині поковки (26 мм/мм), а інтенсивність напружень в опорній частині дорівнює 74 МПа.

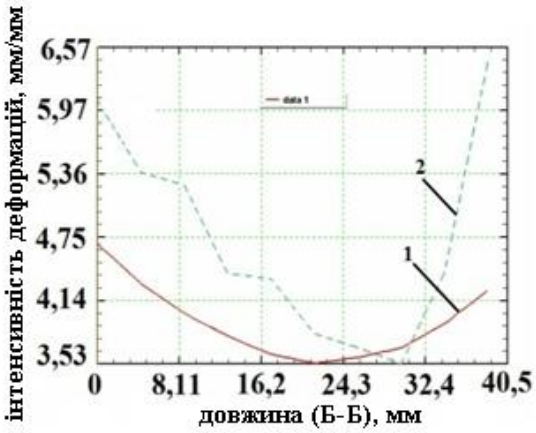


а

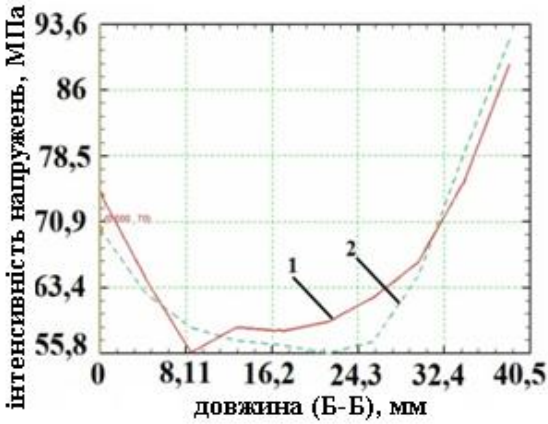


б

Рисунок 5.23 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) без попереднього профілювання (1) і з попереднім профілюванням асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками (2) в перерізі (А-А) після штампування

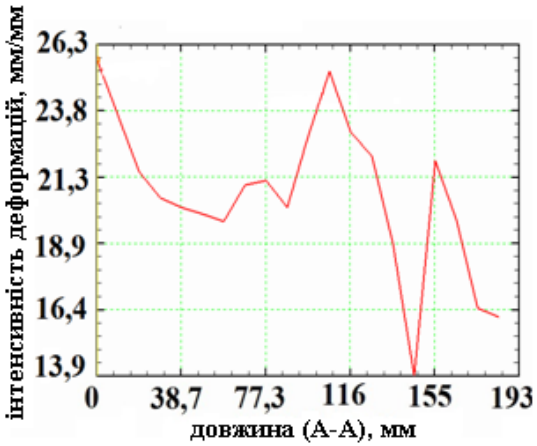


а

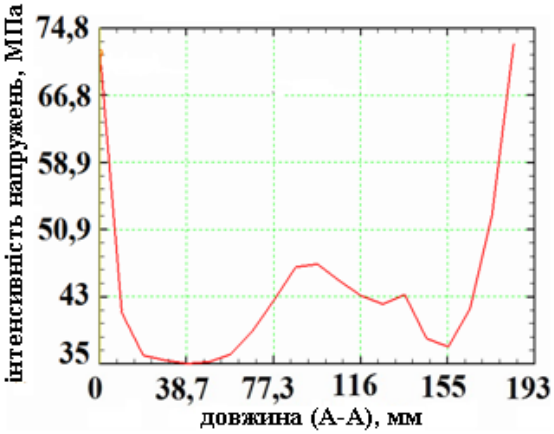


б

Рисунок 5.24 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) без попереднього профілювання (1) і з попереднім профілюванням асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками (2) в перерізі (Б-Б) після штампування

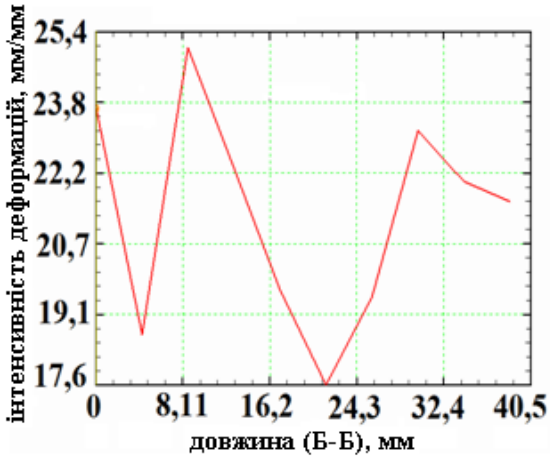


а

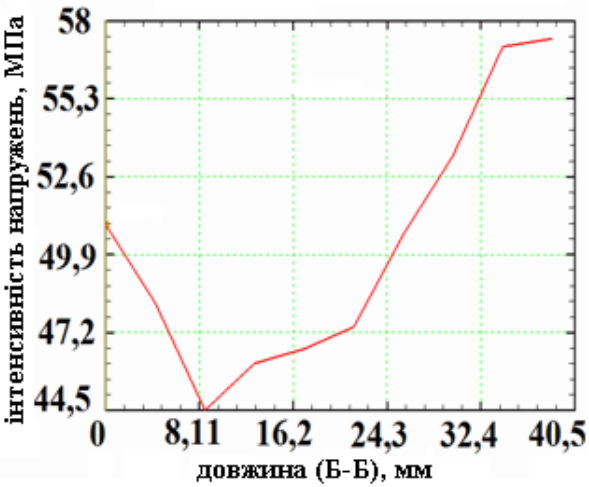


б

Рисунок 5.25 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) при багатоштучному штампуванні в перерізі (А-А) після штампування



а



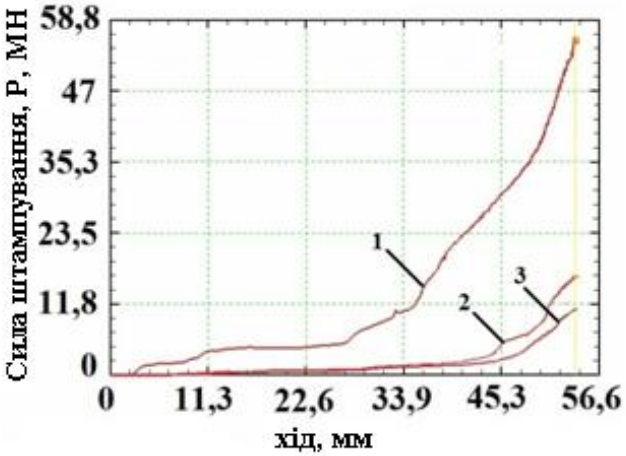
б

Рисунок 5.26 – Розподіл інтенсивності деформацій (а) і інтенсивності напружень (б) при багатоштучному штампуванні в перерізі (Б-Б) після штампування

Відмічено загальне зниження інтенсивності напружень в кінцевому рівчаку на 20 % в порівнянні з штампу-

ванням за базовою технологією без профілювання і на 7 % в порівнянні з технологією багатоштучного штампування.

За результатами моделювання побудований графік необхідної сили для штампування поковки "Супорт" по трьох варіантах (рис. 5.27) [199].



1 – багатоштучне штампування; 2 – штампування без профілювання; 3 – штампування із застосуванням профілювання осаджуванням випуклими бойками

Рисунок 5.27 – Графік розподілу сили, необхідної для фінішного штампування поковки "Супорт" [200]

Аналіз графічної залежності на рис. 5.27 показує, що необхідна сила фінішного штампування поковки типу "Супорт" при використанні несиметричного напівфабрикату, отриманого асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками, менше на 17 % порівняно з силою, яка необхідна для штампування поковки за базовою технологією без попереднього профілювання.

За отриманими результатами була складена таблиця техніко-економічних показників штампування поковки "Супорт" (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Витратні коефіцієнти і сила штампування поковок "Супорт"

Показники	Варіант технології штампування				
	штампування без профілювання (базове)	штампування з профілюванням	% від базового	багатоштучне штампування	% від базового
Маса заготовки ($M_з$), кг	5,49	4,277	77,9	32,39	590
Кількість операцій (n)	3	4	133	2	66,6
Кількість відштампованих поковок в кінцевому рівчаку (m), шт	1	1	100	4	400
Необхідна сила (P), МН	13,7	11,5	83,9	57	416

Таким чином, штампування з попереднім профілюванням має переваги як з точки зору економії металу поковки, так і з точки зору використання менш потужного і енергоекономічного штампувального обладнання [201–203].

Висновки по розділу 5

1. За результатами моделювання виявлено, що вдавлювання попереднього профілювання асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками перед операцією штампування призводить до зниження інтенсивності напружень в гравюрі кінцевого рівчака, поліпшення заповнення гравюри штампу і дозволяє скоротити відходи металу в облой, а також кількість переходів штампування.

2. Проведено аналіз технологічних переходів і техніко-економічних показників трьох варіантів штампування плоскої поковки "Супорт" з наявністю перепадів поперечного перерізу (матеріал – Сталь 40, ДСТУ 1050-88) в пакеті Deform 3d без попереднього профілювання, з застосуванням попереднього профілювання асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками, а також із застосуванням багатоштучного штампування.

3. У порівнянні з симетричним осаджуванням, використання асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками на КГШП дозволяє зменшити значення реакцій в нижній і верхній точках прикладання напрямних повзуна на 27 %, а значення максимальних питомих зусиль в нижній і верхній точках основних напрямних – на 29 %.

4. За результатами моделювання виявлено, що впровадження попереднього профілювання асиметричним осаджуванням штамповими радіусними вставками перед операцією штампування призводить до зниження інтенсивності напружень на 5 % і інтенсивності деформацій на 25 % в гравюрі остаточного рівчака, поліпшення заповнення гравюри штампу і дозволяє скоротити відходи металу в облой до 20 %.

5. Застосування асиметричного осаджування штамповими радіусними вставками в якості профілюючої опе-

рації перед подальшим об'ємним штампуванням дозволило понизити необхідну силу штампування на 17 %.

6. Економія металу при використанні профілювання склала 20 % від базової технології, витрати сили знижені на 16 % від базової технології, а кількість операцій збільшена на одну одиницю. Багатоштучне штампування вимагає більшої сили на відміну від штампування із застосуванням профілювання, у зв'язку з цим підвищується вартість обладнання, але в кінцевому рівчаку отримуємо в 4 рази більше відштампованих поковок, чим при базовій технології.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У монографії представлено вирішення важливої нової науково-практичної задачі підвищення ефективності процесів багатоперехідного об'ємного штампування складнопрофільних плит на кривошипних пресах за рахунок розвитку способів профілювання заготовок асиметричним осаджуванням випуклими штамповими вставками, що дозволило підвищити коефіцієнти використання металу, знизити енергосилові параметри штампування і розширити номенклатуру штампованих виробів.

1. В результаті аналізу існуючих технологій штампування на КГШП поковок складнопрофільних плит встановлено відсутність раціональних способів профілювання заготовок у штампах, через що штампування ведуть з підвищеним утворенням облою. Обґрунтовано доцільність профілювання заготовок асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками в штамповому просторі КГШП під поковки складнопрофільних плит, в результаті чого відбувається несиметричний перерозподіл металу, наближений до конфігурації поковки, що сприяє повному заповненню гравюр штампа при фінішному штампуванні та зниженні відходів металу в облой.

2. Із залученням МСЕ й експериментальним шляхом вперше встановлені закономірності формозміни і зміни напруженого стану металу при профілюванні циліндричної заготовки асиметричним осаджуванням радіусними штамповими вставками від ступеня деформації, радіусності випуклих штампових вставок, геометричних розмірів заготовки й асиметрії навантаження. Це дозволило розробити математичні моделі для прогнозування нерівномірності деформації та оцінки напруженого стану в поздовжньому, висотному та поперечному напрямках, що сприяє максимальному наближенню форми напівфабрикату до форми

готової поковки на даній профілюючій операції. Встановлено напрямки подальшого формоутворення поковок з профільованих заготовок, отриманих асиметричним осадженням випуклим радіусним інструментом.

3. Уточнено величини ступенів обтискання при асиметричному осаджуванні випуклим радіусним інструментом при яких виникає поздовжній вигин циліндричної заготовки в залежності від таких параметрів, як геометричні розміри циліндричної заготовки, радіус випуклості інструменту й асиметрії при осаджуванні. Отримані результати дозволили встановити, що явище поздовжнього вигину при асиметричному осаджуванні випуклим радіусним інструментом характерно для заготовок із співвідношенням $H_0/D_0 > 1{,}5$, а також розмежувати напрямки технологічних розробок з проектування процесів штампування складнопрофільних пластин і поковок із зігнутою віссю.

4. Вперше встановлені умови початку вислизання заготовки з випуклого радіусного інструменту при асиметричному осаджуванні. Це дозволило визначити критичні ступені деформації, при яких заготовка починає вислизати в напрямку, протилежному прикладеній асиметрії навантаження, в залежності від фактора тертя, геометричних розмірів циліндричної заготовки, радіусу випуклості інструменту й асиметрії при осаджуванні. Зі збільшенням відносної висоти вихідної заготовки до $H_0/D_0 = 2$ при малих значеннях коефіцієнта тертя $f = 0{,}1 \div 0{,}3$ та $R/D_0 = 1$ спостерігається вислизання заготовки з робочих бойків. Показано, що процес асиметричного осаджування є стійким при значеннях $R/D_0 = 1{,}5$ та коефіцієнтах контактного тертя $f = 0{,}3 \div 0{,}5$

5. Виявлено закономірність зміщення поверхні розділу плину металу в зазорі між радіусним інструментом в залежності від факторів: геометричних розмірів заготовки, радіусності випуклих штампових вставок, асиметрії навант-

таження, коефіцієнта контактного тертя. На основі отриманих результатів розроблені практичні рекомендації по розташуванню заготовки на переході АОРШВ для зменшення тиску повзуна на напрямні КГШП при його перекосі. Отримані результати дозволяють знизити тиск на напрямні КГШП з силою 16 МН в нижній точці дотику повзуна і напрямні на 27 % і у верхній на 28 %; для КГШП з силою 40 МН – в нижній точці дотику повзуна і напрямні на 27% і верхній – на 31 %, крім того зменшити значення реакцій для КГШП з силою 16 МН в нижній точці дотику повзуна і напрямних на 27 % і верхній – на 32 %; для КГШП з силою 40 МН – в нижній точці дотику повзуна і напрямних на 34 % і верхній на 29 %.

6. Перевірка за критерієм Кохрена підтвердила відтворюваність експериментів ($G_p = 0{,}3042…0{,}53905 < G_{кр}$), перевірка за критерієм Фішера показала, що для всіх досліджуваних параметрів фактор ступеня обтиснення має максимальний вплив на розкид середніх значень макропоказників формозміни ($F_p = 51{,}2…48717{,}54 > F_{кр}$).

7. Встановлено зміни силових режимів на профілюючій і наступних штампувальних операціях, особливості плину та закономірності зміни напружено-деформованого стану металу заготовки при виробництві поковок складнопрофільних плит. Визначено, що сила деформування при використанні напівфабрикату, отриманого асиметричним осаджуванням радіусним інструментом, зменшена на 24 %, в порівнянні з базовою технологією штампування поковки «Плита рухома» і на 17 % для поковки «Супорт».

8. Отримані результати використані при розробці конструкторської та технологічної документації в умовах ПрАТ «Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут» і ПрАТ «АзовЕлектроСталь». При штампуванні поковки «Плита рухома» (3,77 кг, 38ХС) до-

сягнута економія металу за рахунок впровадження асеметричного саджкування радіусними штамповими вставками (Пат. 85071UA), із зниженням маси заготовки з 5,49 кг до 5,09 кг, що становить 7,45 % від маси заготовки або 11 % від маси поковки. При цьому досягнуто зниження інтенсивностей напружень у гравюрі штампового рівчака на 36 % у порівнянні із варіантом штампування без профілювання. При виробництві поковок «Супорт» досягнуто зниження маси заготовки з 5,49 кг до 4,277 кг, тобто економія металу склала 22%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ипатов М. И. Рентабельность машиностроительной продукции при изменении объёма продаж / М. И. Ипатов // Вестник машиностроения. – 1993. – № 2. – С. 59 – 61.
2. Охрименко Я. М. Технология кузнечно–штамповочного производства / Я. М. Охрименко. – М. : Машиностроение, 1966. – 599 с.
3. Акаро И. Л. Классификация поковок и технологических переходов горячей штамповки / И. Л. Акаро // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1980. – № 1. – С. 8–11.
4. Каржан В. В. Прогрессивная технология и оборудование для обработки давлением / В. В. Каржан // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1985. – № 8. – С. 10–13.
5. Овчинников А. Г. Штамповка выдавливанием поковок с боковыми отростками и фланцами / А. Г. Овчинников, О. Ф. Дрель, И. С. Поляков // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1979. – № 4. – С. 10–13.
6. Базык А. С. О классификации деталей, получаемых холодной объемной штамповкой / А. С. Базык, В. А. Головин // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1985. – № 3. – С. 12–14.
7. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1986. – 592 с.
8. Иванюк А. В. Классификация поковок, штампуемых на кривошипных горячештамповочных прессах / А. В. Иванюк // Вестник машиностроения. – 1988. – № 1. – С. 45–48.
9. Бойцов Б. В. Повышение качества в кузнечно–штамповочном производстве / Б. В. Бойцов // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 2000. – № 7. – С. 6–9.
10. Возможность повышения качества поковок ответственного назначения / В. А. Тюрин [и др.] // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1993.– № 12. – С. 2–4.

11. Эдуардов М. С. Штамповка в закрытых штампах / М. С. Эдуардов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 240 с.

12. Журавлёв А. З. Основы теории штамповки в закрытых штампах / А. З. Журавлёв. – М. : Машиностроение, 1973. – 224 с.

13. Гликин Н. М. Технология горячей обработки металлов / Н. М. Гликин, М. Н. Сосенко. – М. : Машгиз, 1961. – 280 с.

14. Безручко И. И. Обработка металлов давлением / И. И. Безручко, М. Е. Зубцов, Л. Н. Балакина. – Л. : Машиностроение, 1967. – 311 с.

15. AutoForge combined casting and forging process // Metal Forming. – 1969. – № 7 (July). – P.196–198.

16. Быков П. А. Жидкая штамповка металлов при изготовлении инструмента для опытного и мелкосерийного производства / П. А. Быков // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1971. – № 4. – С. 41–42.

17. Черновол Н. А. Штамповка заготовок из жидкого металла на гидравлическом прессе / Н. А. Черновол // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1964. – № 1. – С. 13–16.

18. Черный Ю. Ф. Штамповка деталей из жидкого металла / Ю. Ф. Черный, Л. А. Зубов // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1965. – № 1. – С. 21–25.

19. Бутузов Е. А. Специализированные виды штамповки / Е. А. Бутузов. – М. : Высшая школа, 1963. – 207 с.

20. Обработка металлов давлением в машиностроении / П. И. Полухин [и др.]. – М. : Машиностроение; София: Техника, 1983. – 279 с.

21. Скобло С. Я. Слитки для крупных поковок / С. Я. Скобло, Е. А. Казачков. – М. : Металлургия, 1973. – 247 с.

22. Семенов Е. И. Ковка и объемная штамповка / Е. И. Семенов. – М. : Высшая школа, 1972.– 352 с.

23. Шапошников Д. Е. Изготовление поковок на горячештамповочных прессах / Д. Е. Шапошников. – М. : Машгиз, 1962. – 179 с.

24. Охрименко Я. М. Основы технологии горячей штамповки / Я. М. Охрименко. – М. : Машгиз, 1957. – 328 с.

25. Добровлянский С. Н. Исследование процесса профилирования заготовок под штамповку вальцовкой в валках с калибрами постоянного сечения : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Добровлянский Сергей Николаевич. – Киев, 1980. – 173 с.

26. Атрошенко А. П. Технология горячей вальцовки / А. П. Атрошенко. – Л. : Машиностроение, 1964. – 210 с.

27. Смирнов В. К. Вальцовка заготовок под штамповку / В. К. Смирнов. – М. : Машиностроение, 1964. – 214 с.

28. Смирнов В. К. Горячая вальцовка заготовок / В. К. Смирнов, К. И. Литвинов, С. В. Харитонин. – М. : Машиностроение, 1980. – 150 с.

29. Атрошенко А. П. Определение областей эффективного применения вальцовки заготовок под последующую штамповку / А. П. Атрошенко, Ю. С. Прокофьев // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1970. – № 2. – С. 37–39.

30. Омельченко П. П. Исследование удельных давлений и крутящего момента при прокатке полос в гладких валках с переменным обжатием: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Омельченко Петр Платонович. – Киев, 1966. – 192 с.

31. Морозов Л. В. Некоторые особенности продольной периодической прокатки в валках постоянного радиуса с переменным обжатием за пропуск : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Морозов Л. В. – Киев, 1968. – 168 с.

32. Коваленко С. С. Разработка и внедрение процесса продольно–копировального профилирования клиновых полос : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Коваленко Сергей Станиславович. – Киев, 1987. – 210 с.

33. Крымский И. И. Горячая штамповка / И. И. Крымский. – М. : Трудрезервиздат, 1958. – 255 с.

34. Мансуров А. М. Технология горячей штамповки / А. М. Мансуров. – М. : Машиностроение, 1971. – 415 с.

35. Брюханов А. Н. Ковка и объемная штамповка / А. Н. Брюханов. – М. : Машиностроение, 1975. – 408 с.

36. Хмара С. М. Определение области рационального применения КГШП и ПШМ / С. М. Хмара, Н. Н. Марюта, В. А. Алеев // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1970. – № 1. – С. 35–37.

37. Winch R. E. Hot forging processes / R. E. Winch // Metal forming. – 1970. – № 7 (July). – P. 190–196.

38. P/M forging preforms // Metal Forming. – 1969. – № 11 (December). – P. 352.

39. Стоянов А. А. О Влиянии технологии производства на свойства заготовок из порошковых низколегированных сталей / А. А. Стоянов // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ: вид–во СНУ ім. В. Даля, 2002. – С. 248–253.

40. Кухарь В. В. Исследование особенностей формоизменения цилиндрических заготовок при осадке выпуклыми продолговатыми плитами / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // Металлургическая и горнорудная пром–сть. – 2009. – № 1.– С. 66–68.

41. Кондратенко В. Г. Классификация деталей, получаемых осадкой / В. Г. Кондратенко, В. Н. Гречищев // Вестник машиностроения. – 1988. – № 5. – С. 54–58.

42. Изготовление горячих штампованных заготовок деталей тракторов и сельскохозяйственных машин из порошковых материалов / Г. Е. Скороход [и др.] // Кузнечно–штамповочное пр-во. – 1989. – № 4. – С. 7–8.

43. Краев Л. Ф. Построение классификатора кованных и штампованных поковок / Л. Ф. Краев // Кузнечно–штамповочное пр-во. – 1975. – № 8. – С. 20–22.

44. Алиев И. С. Анализ процессов деформирования с несколькими степенями свободы истечения металла / И. С. Алиев, К. Крюгер // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2000. – № 8–9. – С. 68–69.

45. Алиев И. С. Генерирование и кодирование технологических схем холодного выдавливания / И. С. Алиев,

К. Крюгер, К. Д. Махмудов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 1999.– С. 52–57.

46. Норицын И. А. Проектирование кузнечных и холодноштамповочных цехов и заводов / И. А. Норицын, В. Я. Шехтер, А. М. Мансуров. – М. : Высшая школа, 1977. – 424 с.

47. Тетерин Г. П. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объёмной штамповки / Г. П. Тетерин, П. И. Полухин. – М. : Машиностроение, 1979. – 289 с.

48. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Машгиз, 1957. – 324 с.

49. Брюханов А. Н. Горячая штамповка. Конструирование и расчет штампов / А. Н. Брюханов, А. В. Ребельский. – М. : Машгиз, 1952. – 666 с.

50. Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объёмной штамповки / А. В. Ребельский. – М. : Машиностроение, 1965. – 248 с.

51. Євстратов В. О. Аналіз виготовлення низьких заготовок для процесу видавлювання / В. О. Євстратов, В. О. Підгірна // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – 2008. – № 1(19). – С. 183 – 185.

52. Володин И. М. Развитие основ проектирования ресурсосберегающих технологий горячей объемной штамповки / И. М. Володин // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2007.– С. 208–210.

53. Володин И. М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки и созданные на её основе технологии / И. М. Володин, А. А. Ромашев // Кузнечно–штамповочное пр–во: перспективы и развитие: сб. науч. тр. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2005. – С. 242–250.

54. Шестаков Н. А. Задачи оптимизации в штамповочном производстве / Н. А. Шестаков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2008.– С. 104–109.

55. Артес А. Э. На пути совершенствования технологии производства поковок / А. Э. Артес // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2007.– С. 202–207.

56. Биба Н. В. Применение программы моделирования процессов ОМД QFORM для обучения и исследовательской работы в университетах / Н. В. Биба, Ю. А. Гладков, О. А. Белокуров // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – С. 9–14.

57. Голенков В. А. Методы математического моделирования и новые задачи ОМД / В. А. Голенков, П. Г. Морев, С. Ю. Радченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – С. 15–19.

58. Василевский О. В. Исследование деформированного состояния поковок типа валов при ковке в комбинированных бойках / О. В. Василевский, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28). – С. 78–82.

59. Данченко В. Н. Исследование влияния формы инструмента на неравномерность деформации при свободной осадке заготовок железнодорожных колес / В. Н. Данченко, В. Л. Чухлеб, А. В. Ашкелянец, Х. Дыя, А. В. Шрамко // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2011. – № 3. – С. 41–43.

60. Биба Н. В. Применение программы QFORM 2D/3D для разработки малоотходной технологии штамповки / Н. В. Биба, С. А. Стебунов // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті: зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: Системні тех-

нології, 2002. – Т. 5. Пластична деформація металів. – С. 221–226.

61. Борисов А. В. Построение модели качества процесса при математическом моделировании горячей объемной штамповки детали «шестерня венечная» / А. В. Борисов // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – 2008.– № 1(19). – С. 5–11.

62. Шрамко А. В. Исследование течения металла при формовке железнодорожных колес / А. В. Шрамко [и др.] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 307–311.

63. Штамповка двурогих крюков горячим выдавливанием / Б. Е. Михайленко [и др.] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ; Хмельницький, 2002. – С. 122–124.

64. Атрошенко А. П. Штамповка сложных поковок из специальных сталей и сплавов / А. П. Атрошенко, Р. П. Колесников // Кузнечно–штамповочное пр–во. – № 10. – 1975. – С. 13–16.

65. Точная объемная штамповка поковок из труднодеформируемых и легких сплавов малыми сериями / А. С. Подольский [и др.] // Кузнечно–штамповочное пр-во. – 1989. – № 4. – С. 12–13.

66. Шнейберг В. М. Кузнечно–штамповочное производство Волжского автомобильного завода / В. М. Шнейберг, И. Л. Акаро. – М. : Машиностроение, 1977. – 304 с.

67. Шнейберг В. М. Технологические процессы штамповки поковок на кривошипных горячештамповочных и фрикционных прессах в кузнечном цехе ВАЗа / В. М. Шнейберг, И. Л. Акаро, Б. А. Ирсецкий // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1975. – № 3. – С. 23–27.

68. Опыт применения вальцовки заготовок для штамповки турбинных лопаток / В. К. Смирнов [и др.] // Кузнечно–штамповочное пр-во. –1975. – № 7. – С. 9–11.

69. Изготовление турбинных лопаток из сплава ЖС6–КП / А. И. Колпашников [и др.] // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1975. – № 1. – С. 27–29.

70. Экспериментальное исследование вальцовки заготовок под штамповку турбинных и компрессорных лопаток / В. К. Смирнов [и др.] // Кузнечно-штамповочное пр–во. – 1975. – № 4. – С. 8–11.

71. Салюков В. А. Опыт работы кузнечных цехов по экономии металлопроката в сельскохозяйственном и тракторном машиностроении / В. А. Салюков, Л. А. Атопова // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1989. – № 4. – С. 3–4.

72. Ковка и штамповка цветных металлов: справочник / Н. И. Корнеев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972. – 229 с.

73. Скрябин С. А. Изготовление поковок из алюминиевых сплавов горячим деформированием / С. А. Скрябин. – К. : КВІЦ, 2004. – 346 с.

74. Тарновский И. Я. Свободная ковка на прессах./ И. Я. Тарновский, В. Н. Трубин, М. Г. Златкин – М. : Машиностроение, 1967. – 328 с.

75. Дзугутов М. Я. Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением / М. Я. Дзугутов. – М. : Металлургия, 1974.– 280 с.

76. Камнев П. В. Групповой метод производства поковок / П. В. Камнев. – Л. : Лениздат, 1961. – 207 с.

77. Охрименко Я. М. Теория процессов ковки / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин. – М. : Высш. школа, 1977. – 295 с.

78. Теория и технология ковки / Л. Н. Соколов [и др.]. – К.: Выща школа, 1989. – 317 с.

79. Катков И. С. Ковка крупногабаритных прямоугольных поковок с непрямолинейным фронтом подачи / И. С. Катков // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1983. – № 6. – С. 30.

80. Способ ковки поковок типа плит: а.с. 1761364 СССР, МКИ В 21 J 5/00, 1/04 / П. П. Кальченко [и др.]. –

№ 4797745/27; заявл. 05.03.90; опубл. 15.09.92, Бюл. № 34. – 4с. : ил.

81. Шелаев И. П. Снижение торцевых отходов при изготовлении прямоугольных поковок / И. П. Шелаев // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1985. – № 2. – С. 27–28.

82. Способ изготовления поковок прямоугольного сечения: а.с. 347108 СССР, МКИ В 21 J 1/04 / И. С. Катков [и др.]. – № 1348091/25–27; заявл. 07.07.69; опубл. 10.08.72, Бюл. № 24. – 2с. : ил.

83. Совершенствование технологии ковки крупных плит / А. И. Мохов [и др.] // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1996. – № 9. – С. 39–40.

84. Способ ковки плиты: а.с. 1306632 СССР, МКИ В 21 J 5/00 / Э. В. Веретенников [и др.]. – № 3886897/25–27; заявл. 26.04.85; опубл. 30.04.87, Бюл. № 16. – 3с. : ил.

85. Способ ковки поковок типа плит: а.с. 889248 СССР, МКИ В 21 J 1/04 / П. П. Кальченко [и др.]. – № 2889491/25–27; заявл. 04.03.80; опубл. 15.12.81, Бюл. № 46. – 3с. : ил.

86. Способ ковки поковок типа плит: а.с. 380385 СССР, МКИ В 21 J 1/04 / И. С. Катков [и др.]. – № 1348092/25–27; заявл. 07.07.69; опубл. 15.05.73, Бюл. № 21. – 2с. : ил.

87. Кузнечный боек: а.с. 837530 СССР, МКИ В 21 J 5/00, J 13/02 / А. А. Мишулин [и др.]. – № 2828916/25–27; заявл. 09.10.79; опубл. 15.06.81, Бюл. № 22. – 2с. : ил.

88. Кириллов П. Г. Теория обработки металлов давлением / П. Г. Кириллов. – М. : Высшая школа, 1965. – 296 с.

89. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М. : Металлургия. 1967. – 340 с.

90. Марков О. Е. Распределение деформаций при ковке плит / О. Е. Марков, Л. Н. Соколов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ; Слов'янськ, 2000. – С. 276–278.

91. Соколов Л. Н. Уширение при ковке плит / Л. Н. Соколов, О. Е. Марков, С. А. Близнюк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2000. – С. 168–170.

92. Соколов Л. Н. Распределение деформаций при ковке поковок прямоугольного сечения для схемы протяжки круг–уголок–плита / Л. Н. Соколов и др. // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2001 – С. 341–346.

93. Марков О. Є. Удосконалення ресурсозберігаючих технологічних процесів кування плит : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.05 / Марков Олег Євгенійович. – Краматорськ, 2003. – 19 с.

94. Ковка слитков на прессах / Л. Н. Соколов [и др.]; под ред. Л. Н. Соколова. – К. : Техніка, 1984. – 127 с.

95. Машеков С. А. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при осадке в инструменте с криволинейно-выпуклой рабочей формой / С. А. Машеков, Н. Т. Биякаева, А. Е. Нуртазаев // Алматы: Вестник КазНТУ, 2007. – № (40). – С. 59-64.

96. Антощенков Ю. М. Расчет процессов ковки. – М. : Машиностроение, 2001, 240 с.

97. Кухарь В. В. К определению степени деформации при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми плитами / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // Тез. докл. Международной научно–технической конференции «Университетская наука – 2008». – Мариуполь : ПГТУ, 2008. – С. 206.

98. Кухарь В. В. Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитами / В. В. Кухарь, С. А. Короткий, В. А. Бурко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницьк: ХНУ, 2008. – №5. – С. 204-208.

99. Кухарь В. В. Моделирование формоизменения цилиндрических заготовок при осадке коническими плитами / В. В. Кухарь, Р. В. Суглобов, Т. Г. Данилова, Е. А. Мкртчян,

Р. С. Николенко // Обработка металлов давленим: Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2013. – №2(35). – С.9-13.

100. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.

101. Теория обработки металлов давлением / Тарновский И. Я. и др.; под ред. И. Я. Тарновского. – М. : Металлургиздат, 1963 г. – 672 с.

102. Иванушкин П. Ф. Рациональные методы ковки толстых плит / П. Ф. Иванушкин, Н. Т. Костюченко // Обработка металлов давлением: сб. науч. тр. – М. : Металлургия, 1969. – Вып. XVIII. – С. 178 – 183.

103. Алиев И. С. Закономерности формоизменения заготовок при поперечном выдавливании / И. С. Алиев, А. М. Калинов, К. Крюгер // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2000.– С. 66–70.

104. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов: в 3 т. Т. 1. Физико–механические основы пластической деформации. – М. : Металлургиздат, 1960. – 376 с.

105. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла / В. Джонсон, Х. Кудо. – М. : Металлургия, 1965. – 174 с.

106. Ренне И. П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах ОМД / И. П. Ренне. – Тула, 1979. – 96 с.

107. Томсен Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов: пер. с англ. / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1968. – 504 с.

108. Унксов Е. П. Инженерные методы расчёта усилий при обработке металлов давлением / Е. П. Унксов. – М. : Машгиз, 1955. – 280 с.

109. Березкин В. Г. Формоизменение металлов при обработке давлением / В. Г. Березкин. – М. : Машиностроение, 1973. – 152 с.

110. Рябичева Л. А. Математическое моделирование свободной осадки медной заготовки методом конечных элементов / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // Металл и литье Украины. – 2004. - №11. – С.35-38.

111. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.

112. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке металлов давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 175 с.

113. Тарновский И. Я. Деформация и усилия при обработке металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго. – М. : Машгиз, 1959. – 303 с.

114. Головин А. Ф. Прокатка: в 2 ч. Ч. 1. – Свердловск; М.; Л. : Металлургиздат, 1933. – 135 с.

115. Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.

116. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М. : Металлургия, 1972. – 408 с.

117. Кухар В. В. Основи експериментальних методів дослідження процесів обробки металів тиском : навчальний посібник / В. В. Кухар, О. С. Аніщенко, А. Г. Присяжний. – Маріуполь : ПДТУ, 2019. – 234 с.

117. Гринкевич В. А. Компьютерное моделирование процесса осадки при помощи модифицированного дискретного метода прямой вязкости / В. А. Гринкевич // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2001. – С.351–353.

118. Гринкевич В. А. О дискретном методе переменной вязкости для решения задач пластического деформирования металлов / В. А. Гринкевич // Металлургическая и горнорудная пром–сть. – 2001. – № 1. – С. 64–67.

119. Гринкевич В. А. Применение дискретного метода переменной вязкости для моделирования пластической де-

формации металлов со сложной реологией / В. А. Гринкевич // Теория и практика металлургии. – 2001. – № 5. – С. 25–29.

120. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М.: Изд–во АН СССР, 1963. – 272 с.

121. Миленин А. А. Моделирование процессов трехмерной деформации неоднородных материалов с помощью метода конечних элементов / А. А. Миленин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2000. – С. 21–23.

122. Василевский О. В. Исследование влияния величины обжатия на кинематические и энергосиловые характеристики при ковке цилиндрических заготовок в комбинированных бойках / О. В. Василевский, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением : сбор. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 44–48.

123. Исследование различных схеи осадки на прессе заготовки сплава ЭИ698-ВД путем математического моделирования / В. А. Гринкевич, В. Л. Чухлеб, А. С. Сальников, А. Н. Тумко, А. В. Ашкелянец, Г. Банашек // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – 2013. – № 4. – С. 3–7.

124. Огородников В. А. Исследование напряженно-деформированного состояния при осесимметричной осадке / В. А. Огородников, Г. Д. Дель // Кузнечно-штамповочное производство. - № 5. – 1970. – С. 3–5.

125. Огородников В. А. Исследование напряженно–деформированного состояния при холодной высадке шаровых утолщений на стержневых заготовках / В. А. Огородников, И. К. Букин–Батырев // Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1971. – № 8. – С. 4–6.

126. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.

127. Грушко А. В. Карты материалов в холодной обработке давлением : монография / А. В. Грушко. – Винница: ВНТУ, 2015. – 348 с.

128. Либин А. М. Разработка и внедрение рациональных режимов горячего неизотермического деформирования при обработке металлов давлением: дис. … канд. техн. наук : 05.03.05 / Либин Александр Маркович. – Краматорск, 1985. – 215 с.

129. Пашков П. О. Пластичность и разрушение металлов / П. О. Пашков. – Л. : Судпромгиз, 1950. – 259 с.

130. Ренне И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки / И. П. Рене. – Тула : НТО Машпром, 1970. – 164 с.

131. Теоретические основы ковки и горячей штамповки / Е. М. Макушок [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1968.– 408 с.

132. Черниченко В. П. Кинематика подкатки заготовок в открытых ручьях / В. П. Черниченко / Кузнечно–штамповочное пр–во. – 1969. – № 12. – С. 8–10.

133. Методика проведения измерений деформированного состояния образца при ковке по методу ОЧП / В. К. Воронцов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 9. – С. 19–20.

134. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Справочник / Н. И. Пригоровский. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.

135. Чижиков Ю. М. Теория подобия и моделирования процессов обработки металлов давлением / Ю. М. Чижиков. – М.: Металлургия, 1970. – 296 с.

136. Северденко В. П. Теория обработки металлов давлением / В. П. Северденко. – Минск : Высшая школа, 1966. – 224 с.

137. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища школа, 1981. – 248 с.

138. Алиев И. С. Анализ процессов деформирования с несколькими степенями свободы истечения металла /

И. С. Алиев, К. Крюгер // Металлургическая и горнорудная пром–сть. – 2000. – № 8–9. – С.68–69.

139. Алиев И. С. Моделирование силового режима кинематических вариантов радиального выдавливания / И. С. Алиев, К. Крюгер // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 1999.– С. 16–21.

140. Грідасов В. М. Удосконалення ресурсозберігаючих процесів штампування порожніх деталей з фланцем на базі використання технологічних способів комбінованого видавлювання : автореф. дис…канд. техн. наук : 05.03.05 / Грідасов Вадим Михайлович. – Краматорськ, 1999. – 18 с.

141. Носаков А. А. Прогнозирование дефектов типа утяжин при точной штамповке выдавливанием / А. А. Носаков, Е. М. Солодун, Л. И. Алиева // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ; Хмельницький, 2002.– С. 105–110.

142. Огородников В. А. Определение напряженно-деформированного состояния и деформируемости заготовок при обратном выдавливании / В. А. Огородников [и др.] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ, 2005.– С. 152–158.

143. Галлагер Р. Метод конечных элементов / Р. Галлагер. − М. : Мир, 1984. − 428 с.

144. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / В. И. Мяченков [и др.]; под общ. ред. В. И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.

145. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

146. Тарновский И. Я. Деформации и усилия при обработке металлов давлением / И. Я. Тарновский,

А. А. Поздеев, О. А. Ганаго. – М.– Свердловск: Машгиз, 1959. – 304 с.

147. Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объёмной штамповки / А. В. Ребельский. – М. : Машиностроение, 1965. – 248 С.

148. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности) / Г. Я. Гун; под ред. П. И. Полухина. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.

149. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

150. Lee C. H. New solution to rigrid plastic deformation problems using a matrix method / C. H. Lee, S. Kobayashi // Transactions of the ASME. Journal of Engineering Industry. – 1973. – № 95. – P. 865.

151. Cornfield G. C. Theoretical prediction of plastic flow in hot rolling including the effect of various temperature distribution / G. C. Cornfield, R. H. Johnson // J. Iron Steel Inst. – 1973. – № 211. – P. 567.

152. Sebastian M. A. A method of discretization and an approach to tree–dimensional deformation analysis of extrusion by the finite element method / M. A. Sebastian, P. Rodriges, A. M. Sanchez // Numerical methods in industrial forming processes: proc. International Conf. – Swansea (UK): Pineridge Press, 1982. – P. 227–236.

153. Mori K. Simulation of three dimensional rolling by the rigid–plastic finite element method / K. Mori, K. Osakada // Numerical methods in industrial forming processes: proc. International Conf. – Swansea (UK): Pineridge Press, 1982. – P. 747–756.

154. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В. Н. Данченко [и др.]. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.

155. Wagoner R. H. Metal forming analysis / R. H. Wagoner, J. L. Chenot. – Cambridge University Press. – 2001. – 376 p.

156. Омельченко П. П. Планирование и обработка результатов экспериментов / П. П. Омельченко. – К. : УМК ВО, 1991. – 84 с.

157. Лунев В. А. Математическое моделирование и планирование эксперимента : учеб. пособие / В. А. Лунев. – СПб. : Изд–во Политехн. ун–та, 2006. – 164 с.

158. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

159. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением : справочник / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.

160. Кухарь В. В. Исследование напряженно-деформирован-ного состояния заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом загрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Проблеми трибології. – 2012. – № 3. – С. 132–136.

161. Кухарь В. В. Исследование формоизменения заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Б. С. Каргин, Р. С. Николенко // Вісник Нац. техн. ун–ту «ХПІ»: Темат. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 46. – С. 71–76.

162. Кухарь В. В. Формоизменение высоких заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво. Міжнар. конф., м. Дніпропетровськ, 28-29 квітня 2015 р. – Дніпропетровськ: Герда. 2015. – С. 73–74.

163. Кухарь В. В. Моделирование формоизменения относительно высоких заготовок при осадке выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 2 (37). – С. 57–61.

164. Николенко Р. С. Влияние геометрических характеристик выпуклых осадочных вставок на энергосиловые режимы при эксцентричной осадке заготовок различной высоты // Вісник Нац. техн. ун–ту «ХПІ»: Темат. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ». 2014. – № 43 (1086). – С. 122-127.

165. Николенко Р. С. Моделирование формоизменения заготовки при осадке выпуклыми бойками с использованием методики планирования эксперимента / Р. С. Николенко, Е. А. Фролов, В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением: Сб. науч. Тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – № 2(39). – С. 46-53

166. Омельченко П. П. Планирование и обработка результатов экспериментов / П. П. Омельченко. – К. : УМК ВО, 1991. –84 с.

167. Лунев В. А. Математическое моделирование и планирование эксперимента: учеб. пособие / В. А. Лунев. – СПб. : Изд–во Политехн. ун–та, 2006. –164 с.

168. Кухарь В. В. Формоизменение заготовок при эксцентричной осадке выпуклыми вставками с различной высотой профиля / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Вип. 2 (41). – С. 326–332.

169. Кухарь В. В. Применение методики планирования полного факторного эксперимента для оценки формоизменения при моделировании осадки выпуклыми бойками / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Университетская наука – 2014 : Междунар. науч.–техн. конф., г. Мариуполь, 20-21 мая 2014 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ». 2014. – Т. 1. – С. 217–218.

170. Николенко Р. С. Исследование условий появления продольного изгиба при осадке высоких заготовок вы-

пуклыми радиусными бойками с эксцентриситетом нагрузки в Deform 3D / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь, А. А. Сидоров // Инженерные системы – 2015 : Труды Международного форума: Москва, 6–7 апреля 2015 г. / Инжиниринговая компанія «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2015. – С. 221–228.

171. Кухарь В. В. Влияние технологических факторов на появление продольного изгиба пи осадке высоких заготовок выпуклыми бойками с эксцентриситетом нагрузки в пакете Deform 3D / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Университетская наука – 2015 : Междунар. науч.–техн. конф., г. Мариуполь, 20-21 мая 2015 г. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ». 2015. – Т. 1. – С. 102–103.

172. Кухарь В. В. Влияние фактора трения на выскальзывание заготовки из выпуклых бойков при эксцентричной осадке / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Проблеми трибології : Науковий журнал. – 2015. – № 1. – С. 86–92.

173. Николенко Р. С. Прогнозирование скольжения заготовки в выпуклых бойках при эксцентричной осадке выпуклыми бойками / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь // Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства : Междунар. наук. – практ. конф., м. Кременчук, 16–17 квітня 2015 р. – Кременчук: КрНУ, 2015. – 63 с.

174. Николенко Р. С. Выявление эффекта скольжения заготовки в выпуклых бойках при эксцентричной осадке / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь // Университетская наука – 2015 : Междунар. науч.–техн. конф., г. Мариуполь, 20-21 мая 2015 г. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ». 2015. – Т. 1. – С. 101–102.

175. Пат. 100486 Україна, МПК (2015.01) B21K 1/00, B21J 5/00. Бойки для профілювання заготовок / В. В. Кухар, Р. С. Ніколенко. – № u201501389; заявл. 19.02.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. – 4 с.: іл.

176. Кухарь В. В. Экспериментальные исследования формоизменения заготовок под объемную штамповку при эксцентричной пластической осадке радиусными вставками /

В. В. Кухарь, Е. А. Фролов, Р. С. Николенко, Р В. Суглобов // Проблеми трибології. – 2013. – № 3. – С. 44–50.

177. Кухарь В. В. Анализ схемы нагружения выпуклыми радиусными вставками с эксцентриситетом нагрузки / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Университетская наука – 2016 : междунар. науч.–техн. конф., г. Мариуполь. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ». 2016. – Т. 1. – С. 107–109.

178. Кухарь В. В. Определение Границы раздела течения материала при эксцентричной осадке цилиндрических заготовок выпуклыми радиусными вставками / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Системи розробки та постановки продукції на виробництво : Міжнар. Наук. –практ. конф., м.Суми, 17-20 травня 2016 р. – Суми: Сумський державний університет. 2016. – С. 146–148.

179. Василев Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : УНіТЕХ, 2009. – 488 с.

180. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 239 с.

181. Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объёмной штамповки / А. В. Ребельский. – М. : Машиностроение, 1965. – 248 с.

182. Охрименко Я. М. теория процессов ковки / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин. – М. : Высшая школа, 1977. – 295 с.

183. Новые подходы к исследованию бочкообразования при осадке / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, О. П. Павлова, В. Н. Возненко, А. В. Ефременко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. / ДДМА. – Краматорськ, 2005. – С. 241–246.

184. Кухарь В. В. Неравномерность деформации при свободном формоизменении заготовок из цветных металлов и сплавов / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2006. – Вип. 16. – С. 123–127.

185. Кухарь В. В. Бочкообразование при осадке черных и цветных металлов и сплавов / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов : тр. междунар. науч.–техн. конф., посвящ. 100–летию основания кафедры “Пластическая обработка металлов” / СПбГТУ. – СПб, 2007. – С. 347–351.

186. Пат. 85071 Україна, МПК(2013.01) B21K 1/00, B21J 5/00. Спосіб штампування поковок / В. В. Кухар, Б. С. Каргін, Р. С. Ніколенко, Р. В. Суглобов, С. Б. Каргін. – № u201305672; заявл. 30.04.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. – 5 с.: іл..

187. Пристрій для одержання дискових поковок : пат. 9285 Україна, МПК7, B 21 J 5/05 / Волошин В. С., Діамантопуло К. К., Чепурний А. Д., Сердюк І. О., Кухар В. В. (Україна); заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № u200502144; заявл. 09.03.2005; опубл. 15.09.2005, Бюл. № 9. – 3 с. ; іл.

188. Пристрій для прокатування дискових поковок [Текст]: пат. 9687 Україна, МПК7, B 21 J 5/05 / Кухар В. В., Діамантопуло К. К., Сердюк І. О. (Україна); заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № u200502108; заявл. 09.03.2005; опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10. – 4 с.; іл.

189. Спосіб одержання дискових поковок [Текст]: пат. 10436 Україна, МПК7, B 21 J 5/05 / Волошин В. С., Діамантопуло К. К., Чепурний А. Д., Сердюк І. О., Кухар В. В. (Україна); заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – №u200504046; заявл. 26.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. – 3 с.

190. Власов В. И. Кривошипные кузнечно-прессовые машины / В. И. Власов, А. Я. Борзыкин, И. К. Букин-Батырев и др. Под ред. В. И. Власова. – М. : Машиностроение, 1982. – 424 с.

191. Кухарь В. В. Расширение технологических возможностей и преимущества предварительного профилирова-

ния выпуклыми вставками в процессе горячей объемной штамповки поковок пластин / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко, Р. В. Суглобов // Известия МГТУ «МАМИ» : Научный рецензируемый журнал. Серия 2. Технология машиностроения и материалы. – М. : ФГБОУ ВПО Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), 2013. – № 2(16), Т. 2. – С. 71 – 76.

192. Николенко Р. С. Преимущества предварительного профилирования заготовок выпуклыми плитами в процессах горячей объёмной штамповки поковок пластин / Р. С. Николенко // VII Регіональна студентська науково-технічна конференція: Тези доповідей учасників конференції. г. Маріуполь, 22-26 квітня 2013 р. – Маіуполь : ПДТУ, 2013. – Т.І. – С. 118-119.

193. Николенко Р. С. Анализ вариантов штамповки поковки типа «пластина» с применением пакета для конечно-элементного анализа Deform 3D / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь // Конструкторское бюро: Научный журнал. – г. Москва, 2014. – № 7. – С. 30–35.

194. Николенко Р. С. Применение пакета Deform 3D для анализа вариантов штамповки поковок типа «пластина с отростком» / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганск, 2014. – № 1(15). – С. 45–53.

195. Die-Forging of Copper Forgings with Preliminary Forming of Work-Piece Barrel Profile / V. V. Kukhar, V. A. Burko, O. V. Vasylevskyi, R. S. Nikolenko // HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR). – April 2015. – Volume 14. – eISSN: 2321-1814, ISBN (Print): 978-1-62951-946-3

196. Кухарь В. В. Применение пакета Deform 3D для анализа вариантов технологий штамповки поковок «Суппорт» / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко, В. А. Бурко // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». – г. Киев, 2015. – №2 (74). – С. 77-83.

197. Кухарь В. В. Анализ технологических вариантов горячей объёмной штамповки плоских сложнопрофильных поковок / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко // Обработка материалов давлением: Сб. науч. Тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2(41). – С. 155–161.

198. Кухарь В. В. Применение пакета Deform 3D для анализа вариантов технологий штамповки поковок «Суппорт» / В. В. Кухарь, Р. С. Николенко, В. А. Бурко // Міжнародна науково-технічна конференція "Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта", м. Одеса, 22–25 червня 2015 р.: Матеріали конференції – Одеса-Київ : 2015. – 263с.

199. Nikolenko R. S. Analysis of die-forging variants of geometrically complex forgings in Deform 3D package / R. S. Nikolenko, V. V. Kukhar, V. A. Burko // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 1. – С. 18–24.

200. Николенко Р. С. Совершенствование технологий объёмной штамповки сложнопрофильных пластин профилированием заготовок эксцентричной осадкой радиусными вставками / Р. С. Николенко, В. В. Кухарь // Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту : Всеукр. наук. –техн. конф., м. Кременчук, 2–11 листопада 2016 р. – Кременчук: КрНУ, 2016. – С. 8–10.

201. Кухарь В. В. Сравнительный анализ энергетической эффективности безручьевого профилирования заготовок перед штамповкой / В. В. Кухарь, Р. В. Суглобов, Р. С. Николенко // Университетская наука – 2013 : Междунар. науч.–техн. конф., г. Мариуполь, 14–17 мая 2013 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2013. – Т. 1. – С. 177–178.