

Зміст

	Стр.
Вступ	5
Глава 1. Аналіз стану питання, уточнення цілей і завдань дослідження	11
1.1. Вимоги до якості поковок	11
1.2. Вплив волокнистої будови поковок на якість одержуваних деталей	12
1.3. Існуючі методики проектування поковок з спрямованою волокнистою будовою	19
1.4. Аналіз способів отримання поковок з спрямованою волокнистою будовою	28
1.5. Існуючі технології виробництва поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем	31
1.6. Способи оцінки волокнистої будови поковок	35
1.7. Висновки до розділу 1	38
Глава 2. Вибір схеми штампування і основних технологічних параметрів, що впливають на волокнисту структуру поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем на основі комп'ютерного моделювання	40
2.1. Вибір CAD-CAE системи для обчислювального експерименту	40
2.2. Створення моделі об'єкта дослідження для обчислювального експерименту	41
2.3. Моделювання схем висадки і вибір раціонального способу отримання поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем	49
2.4. Визначення кореляційної залежності між показниками орієнтації волокон поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем зі сплаву алюмінію АД0 і стали 45	53
2.5. Відбір факторів, що впливають на орієнтацію волокон в поковках типу стрижня з напівсферичним фланцем	59

	Стр.
2.6. Висновки до розділу 2	63
Глава 3. Дослідження процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем на основі чисельного і фізичного експериментів. Порівняння результатів чисельного і фізичного експериментів	65
3.1. Комп'ютерне моделювання процесу гарячої висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем на основі факторного експерименту	65
3.2. Розрахунок енергосилових параметрів при висадці	78
3.2.1. Визначення енергосилових параметрів за допомогою методу верхньої оцінки	79
3.2.2. Визначення енергосилових параметрів за допомогою методу скінченних елементів	87
3.2.3. Аналітичне визначення енергосилових параметрів (варіант №1)	88
3.2.4 Аналітичне визначення енергосилових параметрів (варіант №2)	89
3.2.5. Порівняння результатів розрахунку сили деформування по чотирьом розглянутим методикам	92
3.3. Фізичне моделювання процесу висадки	95
3.3.1. Висадка поковок з алюмінієвих заготовок	95
3.3.2. Висадка поковок із сталевих заготовок	102
3.4. Висновки до розділу 3	104
Глава 4. Розробка методики проектування технологічного процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою і приклади її застосування	106

4.1. Структура методики проектування технологічного процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою	106
4.2. Приклад розрахунку при проектуванні поковки кульової опори вантажного автомобіля УРАЛ	118
4.3. Висновки до розділу 4	124
загальні висновки	125
Список літератури	126
додаток	136

Вступ

Підвищення якості, надійності і терміну служби деталей машин є основним завданням при виробництві деталей, особливо схильних до тертя Ковальсько-штампувальне виробництво - один з основних методів отримання заготовок для виготовлення відповідальних деталей машин. Деталі, одержані шляхом оброблення металів тиском, визначають надійність і якість машини. Методами обробки металів тиском виготовляють ковани і штамповані поковки різної конфігурації. Перевагою такого виробництва, в порівнянні з литтям і обробкою різанням, є низькі трудовитрати, більш ефективний витрата металу і більш високі механічні властивості деталей. Найбільш ефективним є застосування обробки металів тиском при масовому і великосерійному виробництві. Високі вимоги, що пред'являються до якості поковок, призводять до того, що на сьогоднішній день це питання є одним з головних, що стоять перед машинобудівної галуззю. Питання якості поковок є багатоплановими і вирішуються в різних напрямках.

В даний час традиційні способи виготовлення поковок методами обробки металів тиском не завжди забезпечують необхідну якість, що задовольняє сучасним вимогам машинобудування. Особливо це можна віднести до поковки, з яких виготовляють високонавантажені відповідальні деталі типу підшипників, кульових пальців, деталей типу стрижня з фланцем і ін. Численні дослідження показали, що одним з основних чинників, що визначає підвищення експлуатаційної стійкості і довговічності деталей, одержуваних методами обробки металів тиском, є волокниста будова цих деталей, а саме розташування волокон деталей щодо робочої контактної поверхні [1]. Таким чином, отримання сприятливого, для даної схеми навантаження деталі, волокнистої будови поковки або штампування, з якої згодом отримують деталь, є важливим завданням при проектуванні технологічних процесів виготовлення цих деталей. При цьому, слід зазначити, що в даний час, при проектуванні технологічних процесів кування і об'ємного штампування, існує можливість прогнозування і оптимізації волокнистої будови поковок методами математичного моделювання.

1. Аналіз стану питання, уточнення цілей і завдань дослідження

1.1. Вимоги до якості поковок

Вимоги до якості поковок в машинобудуванні пов'язані з необхідністю забезпечення міцності металу, довговічності та експлуатаційної надійності. Необхідні базові дані для прогнозування надійності і довговічності можуть бути отримані на основі аналізу величин статичних, динамічних або циклічних навантажень, що діють при експлуатації штампованих деталей. Інший блок вихідних даних при розробці конструкції деталі стосується виду ушкоджень, видів зносів, поломок, дефектів, втомної витривалості, довговічності, переважного зносу при експлуатації подібних виробів.

Одним з джерел підвищення якості поковок є використання резерву механічних властивостей металу при проектуванні технологічного процесу штампування з спрямованим волокнистою будовою. Сучасні методи розрахунку дозволяють враховувати анізотропію механічних властивостей металу, а отже, повніше використовувати ресурс механічних характеристик штампованих виробів, збільшуючи, зокрема, їх довговічність при експлуатації. Довговічність, наприклад, для втомної витривалості характеризують коефіцієнтом втомної довговічності:

$$K_{ув} = \sigma_{-1} / \sigma_{\text{екв}}, \quad (1.1)$$

де σ_{-1} межа витривалості при симетричному циклі навантажень, $\sigma_{\text{екв}}$

– еквівалентне напруження, яке залежить від схеми напруженого стану.

В теорії втоми і довговічності деталей машин граничні напруги визначають за результатами механічних випробувань на

однорічне розтягнення з подальшим визначенням максимального напруження циклу σ_{max} , амплітуди циклу σ_a , або середнього напруження $\sigma_{пор}$. В роботі [8] показано, що керуючи потоками макротечення при куванні валів, можливо створити необхідну мікро і макроструктуру і в результаті підвищити довговічність кованих виробів на 40-70%. Крім того, аналіз результатів багатьох дослідників дозволяє рекомендувати включати в нормативні документи щодо якості поковок вимоги по орієнтованій макроструктурі і анізотропії властивостей. Зв'язок між показниками якості поковок з характеристиками макро- і мікроструктури можна представити у вигляді схеми [7] на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 - Схема зв'язку якості поковок з характеристиками макро- і мікроструктури

Рис. 1.6. Фактори, що визначають довговічність підшипника і класифікація показателів якості поковок

1.2 Вплив волокнистої будови поковок на якість одержуваних деталей

В даний час перед вітчизняним машинобудуванням поставлені важливі та актуальні завдання, однією з яких є збільшення надійності і довговічності штампованих виробів без зміни способу виплавки і обробки рідкого металу при отриманні вихідної заготовки. Таке завдання можна вирішити шляхом створення таких технологічних процесів штампування і таких схем течії

металу, які забезпечать в поковках задану макро і мікроструктуру і узгоджену з умовами експлуатації виробів анізотропію фізико-механічних властивостей.

Іншими словами завдання полягає в підвищенні робочих напруг при експлуатації деталей машин, зроблених з тих же марок сталей і сплавів. Ефект повинен досягатися за рахунок більш повного використання ресурсу фізико-механічних властивостей матеріалу поковок.

У даній роботі використані заготовки (об'єкти деформування), отримані деформацією литої структури в процесі пресування і прокатки. Як відомо, зазначені способи деформування призводять до дроблення кристалітів і неметалевих включень, витягування їх у напрямку прокатки і, незважаючи на процеси рекристалізації при гарячій обробці тиском, до появи так званої волокнистості макроструктури. Отримана в результаті прокатки початкова орієнтація волокон у вихідній заготовці володіє анізотропією (первинної) властивостей і зберігається при наступних термічних обробках.

Якщо макроструктура є результатом переміщення частинок заготовки, то управляти напрямком волокон в кінцевому виробі можливо тільки наступною деформацією, наприклад, в процесах кування або штампування шляхом створення необхідного спрямованого пластичного макротечення металу заготовки. В результаті, поковки набувають вторинну або остаточну макроструктуру, що характеризується кутами виходу волокон на контактні поверхні з деформуючим інструментом. За рахунок управління пластичним перебігом в процесах штампування волокна первинної макроструктури (заготовки) перетворюються в волокна вторинної макроструктури, з необхідною орієнтацією до робочих поверхонь готового виробу. Це явище викликає вторинну анізотропію властивостей в поковках. Процес штампування повинен бути побудований таким чином, щоб в поковках волокна макроструктури були перпендикулярні стискає або

розтягують напруг, що виникають в деталях при роботі під навантаженням. Напрямок дотичних напружень при цьому повинні бути в ідеальному випадку паралельні волокнам макроструктури деталі [1,9-12].

В результаті пластичної деформації в процесах прокатки, волочіння, кування і штампування рівноосні зерна і неметалеві включення, а також домішки на кордонах зерен, витягуються в напрямку основної деформації з утворенням волокнистої структури [13]. Зерна і домішки зазвичай витягуються уздовж ліній пластичного течії металу, які повторюють контури кувальних штампів (рис. 1.2) Встановлено [13], що опір руйнуванню кованих виробів може бути підвищено, якщо лінії пластичної течії паралельні траєкторіях головних дотичних напружень і відповідно перпендикулярні напрямку можливої тріщини (перпендикулярні нормальними напруженням).

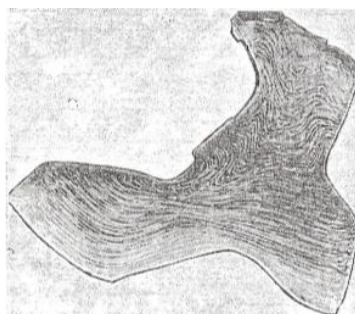


Рисунок 1.2 - Лінії пластичної течії в поковки

Таким чином, поковки мають перевагу перед литими деталями, в тому числі, завдяки макроструктурній анізотропії, створеної деформацією. Тут важливо те, що лінії пластичної течії в структурі виробу повинні бути правильно орієнтовані до напруженого стану навантажується деталі. В іншому випадку, при неправильному використанні кованої деталі, лінії пластичної течії сприяють легкому поширенню тріщин. Якщо розглянути показники міцності і в'язкості руйнування, то простежується наступна тенденція: зі збільшенням міцності знижується пластичність, в'язкість руйнування (Кіс). Іншими словами при збільшенні міцності стали збільшується схильність до крихкого руйнування. Однак сучасна наука термічної

обробки дозволяє підвищувати в'язкість руйнування за рахунок фрагментації (подрібнення) мікроструктури. Інший шлях збільшення в'язкості руйнування - це видалення або нейтралізація елементів домішок, неметалічних включень, що знижують в'язкість руйнування [14-16]. В умовах плоскої деформації анізотропія властивостей може бути кількісно охарактеризована наступним показником анізотропії $K_{ан}$:

$$K_{ан} = 1 - \left(\frac{\sigma_{T,0}}{\sigma_{T,45}} \right)^2, \quad (1.2)$$

де $\sigma_{T,0}$ і $\sigma_{T,45}$ - межі плинності матеріалу призматичних зразків, вирізаних відповідно під кутами 0 та 45 градусів щодо направлення деформації, при випробуванні на стиснення в умовах плоскої деформації. Для більшості матеріалів $K_{ан} = 0,2 - 2,7$ [17].

В роботі [18] досліджувалася контактна витривалість шарікоподшипникових кілець зі сталі ШХ15СГ з різною орієнтацією волокон, показаних на рисунку 1.3. Ці експерименти показали збільшення контактної витривалості кілець з поперечної орієнтуванням волокна в порівнянні з контактною витривалістю кілець з торцевої орієнтуванням волокна в 1,5-2 рази. На рисунку 1.4 приведена залежність довговічності підшипника від кута виходу волокна до нормалі контактної площадки в зоні максимального навантаження. Максимальна довговічність виходить в тому випадку, коли цей кут близький до 90°, зменшення кута виходу волокон до нормалі робочої поверхні призводить до різкого зниження довговічності.

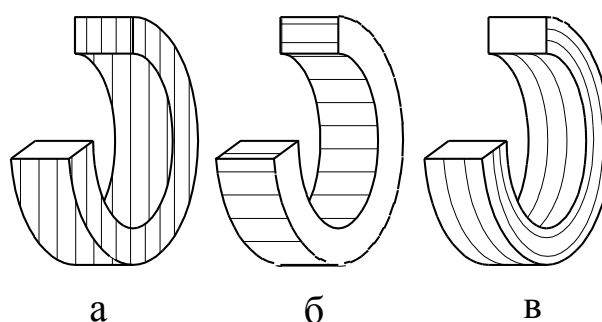


Рисунок 1.3 - Види орієнтації волокон в поковках кілець підшипників: а - торцевая; б - поперечна; в - по периметру кільця



Рисунок 1.4 - Залежність довговічності підшипника від кута нахилу волокон до нормалі контактної площадки

В роботі [9] проведено дослідження стійкості на стирання зразків з трьох різних сталей: 40Х, 45 і 38ХГНМ з різними кутами виходу волокон на контактну поверхню: 0° , 45° і 90° і з різними режимами термічної обробки. Випробування проводили на стандартній випробувальній машині тертя «ШкодаСавін». Схеми, що ілюструють розташування волокон в зразках, показані на рисунку 1.5. Таблиці 1 представлені значення відносної зносостійкості зразків виходом волокон на контактну поверхню під кутами: 0° при впровадженні ролика в двох взаємно перпендикулярних напрямках; 45° і 90° .

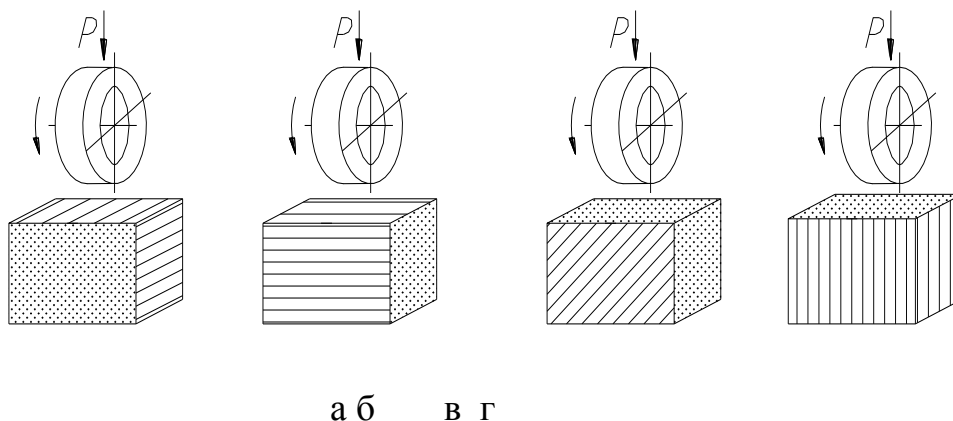


Рисунок 1.5 - Розташування волокон щодо контактної поверхні в зразках: а) кут виходу волокон 0° , випробування паралельно волокнам; б) кут виходу волокон 0° , випробування перпендикулярно волокнам; в) кут виходу волокон 45° ; г) кут виходу волокон 90°

Таблиця 1.1 - Відносна зносостійкість ϵ зразків з різними кутами виходу волокон на контактну поверхню

Кут виходу волокон на контактну поверхню	Матеріал			
	Сталь 40Х	Сталь 45	Сталь 38ХГНМ	
0°	Паралельно	1.291 / 1.723	1.224 / 1.641	1.147 / 1.307
	Перпендикулярно	1.169 / 1.604	1.210 / 1.641	1.067 / 1.244
45°		1.122 / 1.543	0.964 / 1.469	0.941 / 1.280
90°		1.079 / 1.428	0.761 / 1.422	0.764 / 1.244

Примітка: в чисельнику наведені значення зносостійкості для зразків після відпалу; в знаменнику - після гарту і відпустки

Аналіз результатів випробувань на стирання показав, що відносна зносостійкість має максимальні значення у зразків з виходом волокон на контактну поверхню під кутом 0 °, а мінімальні значення - у зразків з виходом волокон на контактну поверхню під кутом 90 °. На рисунку 1.6 дані Таблиці 1 представлені у вигляді графіка.

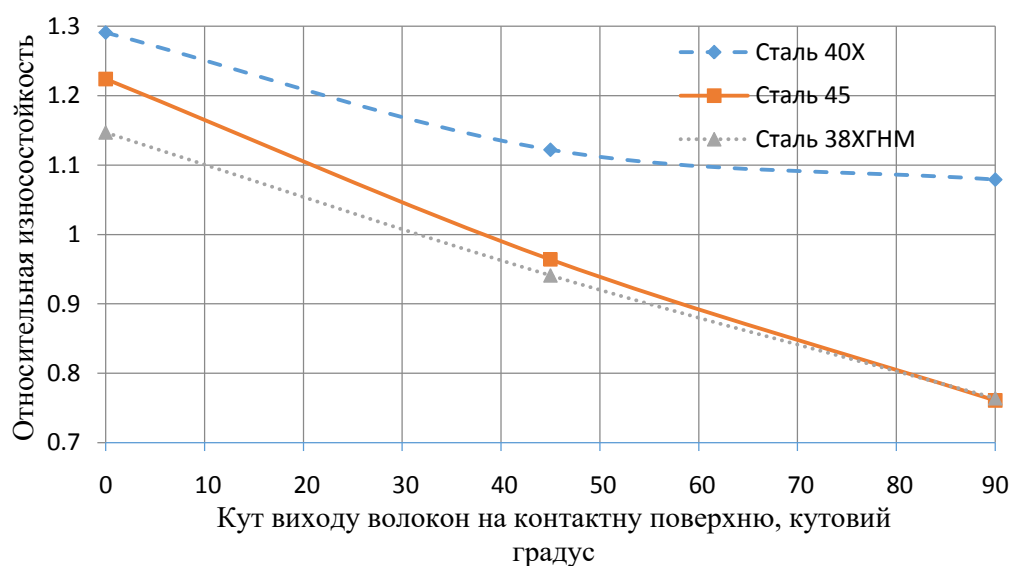


Рисунок 1.6 - Відносна зносостійкість зразків після відпалу в залежності від кута виходу волокон на контактну поверхню

Необхідно так само відзначити, що в роботах В.А. Тюріна [19, 8] детально вивчалось питання впливу волокнистої будови на механічні властивості металу після кування. Аналіз результатів механічних випробувань зразків, вирізаних під різними кутами до осі симетрії поковок, так само показав різні величини як міцності, так і пластичних характеристик металу в обсязі поковок після деформації.

В роботі [20] досліджувався вплив способу виробництва (штампування, точіння або клинова прокатка) корпусу різця гірського комбайна на характер волокнистої будови і, як наслідок, на механічні властивості. Було встановлено, що розташування волокон корпусу різця, отриманого клиновий прокаткою, найкращим чином задовольняє умовам експлуатації, що дозволяє досягти значно вищою його міцності в порівнянні з розташуванням волокон, отриманим гострінням і штампуванням за розглянутою в цій роботі технології. В результаті випробувань було встановлено, що зносостійкість корпусу, отриманого клиновий прокаткою, вище в середньому на 30%, ніж зносостійкість корпусів отриманих гострінням і штампуванням.

В роботі [21] наведені результати випробувань на вигин загартованих зразків зі сталі ШХ15 з розмірами 4x20x60 мм, що мають різний розподіл волокон по відношенню до прикладається навантаження (Малюнок 1.7). Результати випробувань наведені в таблиці 2.

Таблиця 1.1 - Межа міцності при різній орієнтації волокон при випробуваннях на вигин

Схема розташування волокон щодо прикладеного навантаження		
рисунок 1.7, а	рисунок 1.7, б	рисунок 1.7, в
211.9 МПа	152.7 МПа	120.2 МПа

З таблиці видно, що паралельно прикладаємому навантаженню

розташування волокон значно знижує межу міцності. Різна міцність зразків рис. 1.7, а і рис. 1.7, б пояснюється автором роботи [7] різним ступенем неоднорідності напруженого стану на поверхні зразка внаслідок того, що при торцевої орієнтуванні волокон (рис. 1.7, а) значно збільшується ефективна величина (глибина) і кількість дефектів, що виходять на поверхню.

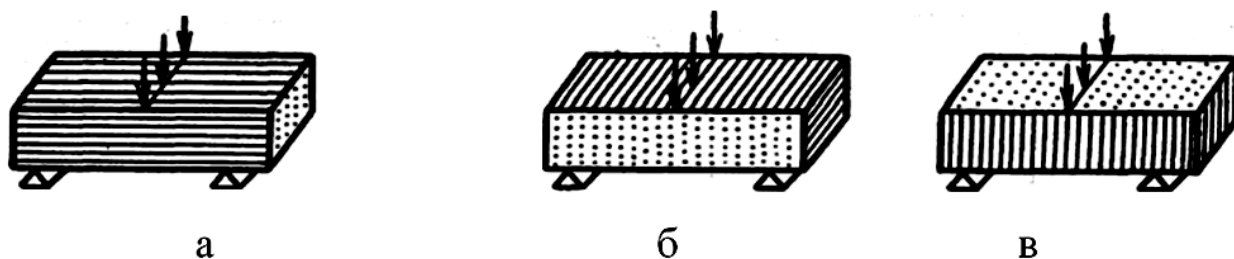


Рисунок 1.7 - Схема випробувань зразків на вигин: а - волокна перпендикулярні прикладається навантаженні і спрямовані перпендикулярно лінії її застосування; б - волокна перпендикулярні прикладається навантаженні і спрямовані паралельно лінії її застосування; в - волокна паралельні прикладається навантаженні

Можна так само відзначити, що загальні вимоги до волокнистому будовою в поковках були раніше сформульовані в роботі [10]:

- симетричність розташування волокон макроструктури;
- плавність волокон макроструктури;
- повторення волокнами макроструктури робочого контуру деталі

(вихід волокна на робочу поверхню деталі повинен бути меншим 45° , а в ідеалі близьким к 0°).

1.3. Існуючі методики проектування поковок з спрямованною волокнистою будовою.

Розглянемо типову схему розробки проекту технології ковальсько-штампувального виробництва (КШП) і підготовки виробництва нового

виробу (заготовки, поковки, деталі). За основу візьмемо схему основних етапів технологічної розробки для процесів КШП [5]. Завдання технологічної розробки виходять з форми, розмірів деталі за кресленням, відповідних вимог ТУ і, в загальному випадку, зводяться до визначення наступних параметрів: обсяг, форма і розміри заготовки; обсяг, форма і розміри поковки; спосіб, температура і продуктивність нагрівання заготовок; спосіб штампування поковок; кількість і форма переходів; тип, конструкція і розміри оснащення; тип і характеристики ковальсько-пресового устаткування (КПО); вид оздоблювальних операцій; техніко-економічні показники прийнятого технологічного рішення. Основні етапи технологічної підготовки операції штампування можна представити у вигляді схеми [22] показаної на рисунку 1.8.

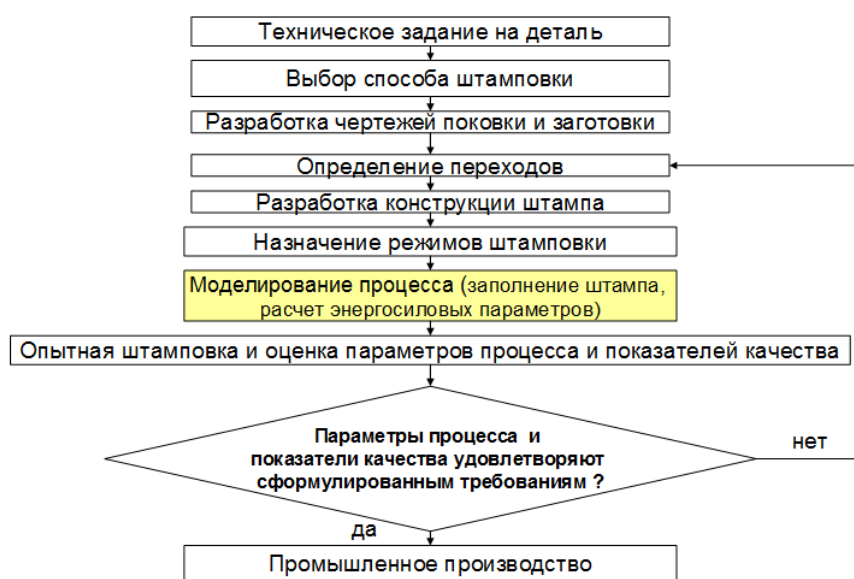


Рисунок 1.8 - Типова схема технологічної підготовки операції гарячого штампування

При технологічній підготовці виробництва одними з найбільш важливих етапів є вибір способу штампування і обладнання для його здійснення. При цьому використовують такі критерії як витрата енергії, продуктивність, коефіцієнт використання металу, забезпечення заданої якості поковок, в тому числі за структурою металу і властивостями.

В процесі проектування і освоєння технологічних процесів гарячого об'ємного штампування виробили деяку загальну

послідовність виконання процедур проектування [23]. Однак, розробку технологічних процесів штампування поковок, в справжніх умовах, проводять часто без урахування волокнистої будови виготовленої деталі [7], що може значно знизити її ресурс роботи, в той час як сучасні методи обробки тиском дозволяють отримати заданий напрямок волокон щодо контактних поверхонь.

Процедури проектування техпроцесу штампування, пропонувані в роботі [7] представлені у вигляді структурної схеми на рисунку 1.9, з урахуванням моделювання технологічного процесу гарячого об'ємного штампування.

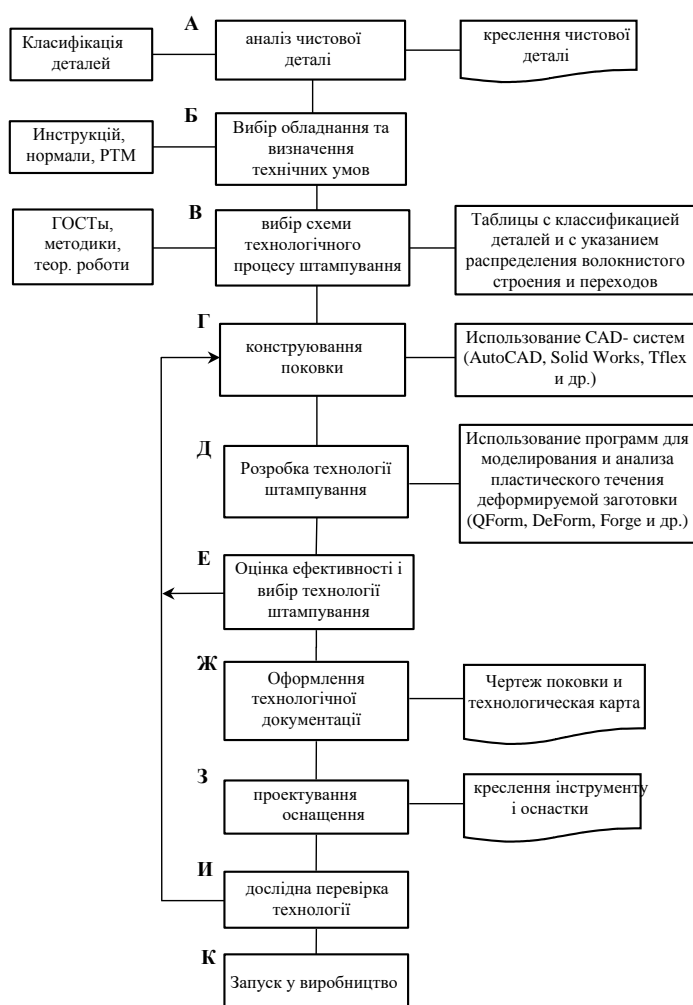


Рисунок 1.9 - Структурна схема проектування технологічного процесу об'ємного штампування

Вхідну інформацію поділяють на оперативну і умовно-постійну. Оперативна інформація (блок А) включає відомості про об'єкт розробляється техпроцесу, вимоги замовника та обмеження

виробництва. Її формують на базі вихідного креслення деталі. Вона включає в себе: номер деталі; матеріал деталі із зазначенням ГОСТу або технічних умов; геометричний образ і характерні ознаки деталі, які відносять її до групи і підгрупи по класифікатору; дані про якість поверхонь; режимі термічної обробки і твердості, а також про обсяг виробництва, ступеня автоматизації технологічних процесів штампування і подальшої обробки різанням.

Умовно-постійна інформація включає нормативні та довідкові дані для розглянутого класу впровадження нових технологічних процесів, рекомендації керівних технічних матеріалів, науково-обґрунтованих методик і експериментальних досліджень. Цю інформацію оновлюють в міру зміни нормативних документів, отримання нових результатів в області теорії і практики гарячого об'ємного штампування і ускладнення розв'язуваних технологічних завдань. Її об'єднують в базу даних, включаючи таблиці припусків і допусків на поковки; нормальні ряди штампувальних ухилів і радіусів заокруглень; допустимі величини зсуву штампів і ексцентричності отворів; класифікатори поковок і рекомендовані технологічні операції для їх виготовлення; параметри якості вихідних заготовок; марки матеріалів поковок із зазначенням параметрів технологічних процесів різання, нагрівання, штампування, охолодження, обрізки, калібрування, редагування, термічної обробки; криві зміцнення застосовуваних матеріалів, діаграми граничних деформацій, діаграми рекристалізації; теплофізичні властивості матеріалів поковок, штампів та прикордонних шарів; сортамент вихідних матеріалів; допустимі відхилення геометричної (масової) точності відрізуваних заготовок; сортамент технологічних мастил з рекомендаціями щодо їх застосування; технічні характеристики основного і допоміжного технологічного обладнання; таблиці норм часу на виконання основних і допоміжних операцій; норм витрати матеріалів, а також розрядів і тарифних ставок операторів.

Наведена на рисунку 1.9 схема методики проектування розроблена для виробництва способом гарячої висадки на ГКР поковок підшипникових кілець [7]. Вона розроблена з урахуванням розподілу волокон макроструктури щодо контактних поверхонь, що дозволяє створювати спрямоване волокнистої будова в підшипникових кільцях і збільшувати контактну витривалість кілець і довговічність підшипників.

Аналогічні структурні схеми методик автоматизованого проектування процесів висадки поковок типу стрижня з кульової голівкою і стрижня з фланцем з спрямованим волокнистою будовою наведені в роботах [22,25]. При цьому, як і в роботі [7], в схемах методики проектування передбачено обчислювальний блок для моделювання процесів висадки на основі САД / САЕ систем для визначення характеру волокнистої будови і енергосилових параметрів при висадці. У сучасних публікаціях, присвячених моделюванню процесів ОМД, переважно використовують комерційні програмні продукти, засновані на методі скінченних елементів (МСЕ). МСЕ дозволяє знайти переміщення, деформації та напруги у всіх вузлах елементів, на які розбита розглянута середа. Широта використання даного методу пов'язана з тим, що він володіє універсальністю і дозволяє вирішувати досить складні завдання [26-31]. Однак, необхідність застосування МСЕ можна вважати недоліком розроблених в роботах [7,22,25] методик, тому що всі програми для моделювання процесів ОМТ, наведені в структурній схемі на рисунку 1.9, є комерційними і досить дорогими. Це ускладнює використання розроблених методик на підприємствах, де кошти комп'ютерного моделювання ОМД не запроваджено. Таким чином, доцільним є доопрацювання методики, представлені на рисунку 1.9 і доповнення її різними інженерними засобами аналізу як волокнистої будови, так і енергосилових параметрів при висадці.

Найбільш поширеними комерційними програмами на базі МСЕ, використовуваними в ОМД є: Deform [32–35], QForm [36–39], Forge [40] и Simufact [41]. При цьому, необхідно зазначити, що крім методу скінченних елементів, при аналізі процесів течії металу при пластичній деформації застосовуються і інші методи [42], зокрема метод ліній ковзання [43,44], метод верхньої оцінки [45,46], в тому числі для осесиметричних задач [47], метод нижньої оцінки [48], загальний метод Хілла [49], метод ліній струму [51] а так само різні аналітичні методи, для окремих випадків напружено-деформованого стану [52-56].

У роботах [7,24,22,25,59] для моделювання процесів висадки на ГКР при проектуванні технології виробництва поковок з спрямованим волокнистою будовою застосовували програмний комплекс QForm.

На рисунку 1.10 показаний приклад результатів проектування технології висадки поковок типу стрижнів з фланцем [25]. Для оцінки орієнтації волокон використовували функцію ліній Лагранжа. Аналогічним чином були виконані дослідження в роботах [7,24,59].

Так як в обчислювальному середовищі QFORM не передбачені критерії для оцінки орієнтації волокон, в роботах [7,24,22,25,59] запропоновані критерії оцінки орієнтації волокон, а за результатами факторного аналізу отримані формули для їх розрахунку, отримані на основі методів факторного експерименту, як обчислювального, так і фізичного.

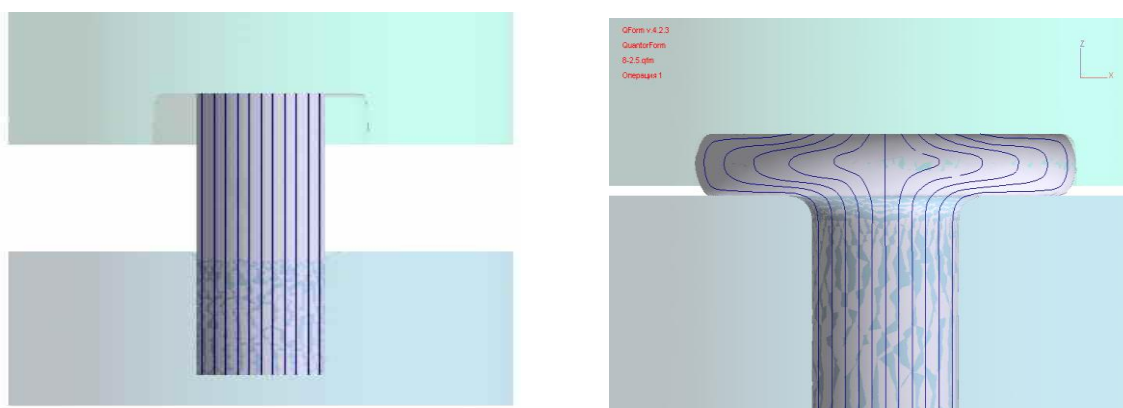


Рисунок 1.10 - Вид ліній Лагранжа, що ілюструють орієнтацію волокон в поковці з фланцем

Для зручності роботи технолога при проектуванні процесів висадки поволок з спрямованим волокнистою будовою авторами робіт [24,25] за результатами чисельного моделювання створені бази даних у вигляді таблиць і атласів волокнистої будови в електронній формі.

У сучасних програмах для моделювання процесів ОМТ на базі МСЕ математична постановка задачі моделювання вязкопластического деформування зводиться до відомим рівнянням теорії течії і теплообміну спільно з початковими і граничними умовами в напружених, переміщеннях або змішаного типу для різних областей поверхні твердого тіла. При цьому отримують класичну постановку і рішення вязкопластической завдання формозміни для ізотропного тіла в швидкостях. Невідомими, які можуть бути визначені на кожному етапі вирішення, є температурні поля, компоненти тензора швидкостей деформації, деформації та напруги, величина накопиченої деформації і т.д.

Проведений в роботі [57] огляд популярних продуктів для комп'ютерного моделювання процесів обробки металів тиском на основі пошукових запитів в електронних бібліотеках і реферативних базах даних показав розподіл переваг дослідників при виборі програм комп'ютерного моделювання процесів ОМТ. Так за результатами запиту за даними електронного ресурсу eLIBRARY в 255 статтях автори наводять результати, отримані із застосуванням програмного комплексу DEFORM, що набагато більше в порівнянні з використанням інших програм моделювання процесів ОМТ. Аналогічні результати (що ілюструють перевагу DEFORM дослідниками) дали запити і по іншим електронним базам даних.

Математичний апарат, що лежить в основі більшості комерційних програмних продуктів моделювання процесів ОМТ закритий для користувача, однак очевидно, що в переважній більшості випадків розробники цих програмних продуктів використовують математичну

постановку кінцево-елементного моделювання на основі наступної системи рівнянь [58]:

- диференціальні рівняння рівноваги, що зв'язують компоненти тензора напружень, що визначає напружений стан тіла

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad (1.3)$$

де σ_{ij} - компоненти тензора напружень, x - координата, в напрямку якої перемістилася майданчик дії даної компоненти тензора напруг;

- кінематичні рівняння, що зв'язують компоненти тензора

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (1.4)$$

швидкостей деформацій і швидкостей матеріальних точок тіла

де $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - компоненти тензора швидкостей деформацій, v_i, v_j - проекція

швидкості руху матеріальної точки на відповідну координатну вісь;

- рівняння пластичної течії Леві-Мізеса, що зв'язують напружений і деформований стан тіла

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij}, \quad (1.5)$$

де $\dot{\varepsilon}$ - інтенсивність швидкостей деформації, $\bar{\sigma}$ - девиатор напружень;

- враховують виконання умови нестисливості (1.6) і пластичності Мізеса (1.7):

$$\dot{\varepsilon}_v = 0, \quad (1.6)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_s, \quad (1.7)$$

де $\dot{\varepsilon}_v$ - швидкість об'ємної деформації, σ_s - напруга течії,

визначаєма за реологічною моделлю матеріалу.

- модель пластичного тертя на основі моделей тертя Амонтона-Кулона і Зібеля

$$\tau_K = \begin{cases} \mu p: \mu p < mk \\ mk: \mu p \geq mk \end{cases}, \quad (1.8)$$

де τ_K – зовнішні питомі дотичні сили тертя, μ – коефіцієнт тертя відповідно до закону тертя Амантона-Кулона, m – фактор тертя відповідно до закону тертя Зібеля, k – максимальне дотичне напруження в матеріалі, p – нормальний тиск матеріалу на стінку інструменту.

Рішення системи Рівнянь (1.3) - (1.7) в методі кінцевих елементів прийнято здійснювати за допомогою функціоналу Маркова, що представляє собою різницю потужності пластичної деформації і потужності зовнішніх сил, прикладених до об'єкта, що приймає мінімальне значення на істинному поле швидкостей:

$$\Phi = \int_V \sigma \dot{\epsilon} dV - \int_F v_i p_i dF, \quad (1.9)$$

де V – обсяг матеріалу, F – площа поверхні об'єкта, p_i – проекція питомої зовнішньої сили на відповідну координатну вісь.

Очевидно, що методи вирішення такого типу завдань можуть бути тільки чисельними і, відповідно, тільки наближеними, а отримані рішення повинні перевірятися і уточнюватися за результатами фізичного моделювання на натурних і модельних матеріалах, з урахуванням факторів, що визначають і формують задані показники якості виробів. Тому при розробці методик проектування процесів висадки поковок з спрямованим волокнистою будовою важливим етапом є вибір факторів, що визначають орієнтацію волокон, критеріїв оцінки орієнтації волокон і розрахунку значень обраних критеріїв.

Необхідно також відзначити, що використання методів, альтернативних методу скінченних елементів, раціонально у випадках, коли вирішують будь-яку локальну задачу, яка потребує побудови складної

системи рівнянь і застосування комерційних програмних продуктів для вирішення цих систем. Зокрема, в разі аналізу штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем, визначення необхідної сили деформування на останньому переході штампування доцільно здійснити за фізично-обґрунтованими методиками, викладеним в роботах [55] та [56].

1.4. Аналіз способів отримання поковок з спрямованим волокнистою будовою

Направлене волокнисту будову поковок може бути отримано різними способами обробки тиском [59-65]. В роботі [7] досліджували вплив типу і форми заготовки (смуга, труба і прутки), способів отримання поковок (штампування на молотах, ГКР, пресах напівавтоматичного лінії типу «Вагнер» та на багатопозиційних горячештамповочних автоматах типу «Хатебур», холодна листове штампування) на орієнтацію волокон. Для збільшення довговічності і надійності кілець підшипників необхідно здійснити технологічний процес штампування поковки кільця таким чином, щоб волокна макроструктури плавно обминали робочу поверхню, повторюючи її профіль.

На основі комп'ютерного моделювання автором встановлено [7], що технологічний процес штампування поковки кільця на ГКР в пуансоні, за типовою схемою штампування, не дозволяє виключити вихід волокон під кутом до контактних поверхонь кільця підшипника. На рисунку 1.11 представлені результати моделювання в QForm.

При штампуванні поковки кільця на ГКР в матриці, вдається уникнути виходу волокон на доріжку кочення кільця підшипника, волокна спрямовані вздовж контактної поверхні (Рисунок 1.12). Вихід волокон під кутом до внутрішньої поверхні кільця не призводить до зменшення довговічності підшипника, так як ця поверхня не працює на контактну поверхню. Уникнути виходу волокон на внутрішню

контактну поверхню зовнішнього кільця при штампуванні на ГКР не вдається, тому що волокна перерізаються при просічках поковки.

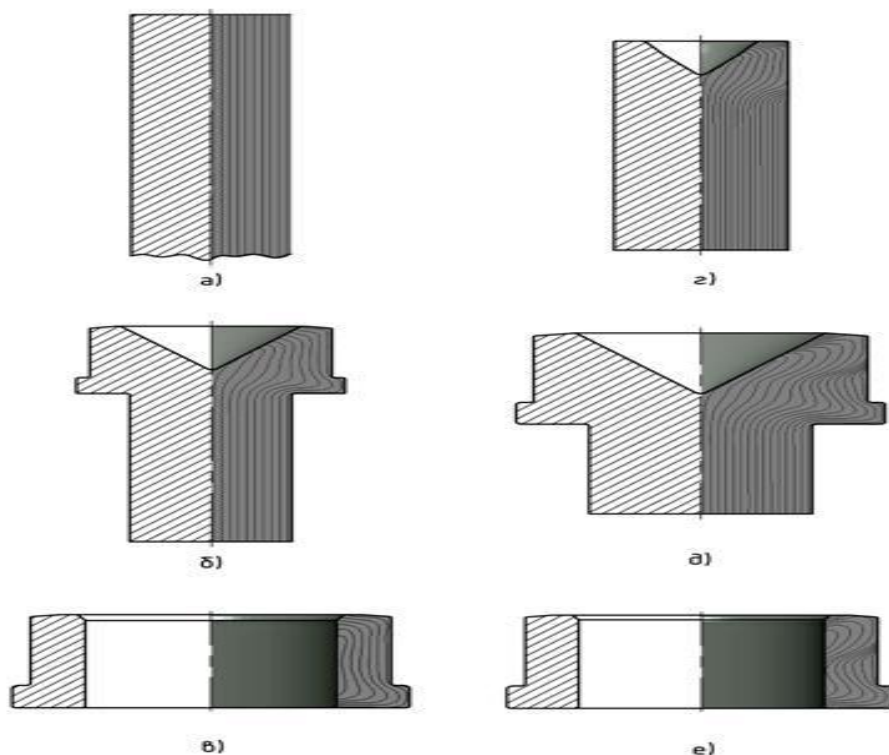


Рисунок 1.11 - Моделювання штампування поковки кільця на ГКР в пуансоні: а - вихідний пруток; б - формування 1-ої поковки; в - перша кування; г - пруток після просечки; д - формування 2-ий поковки; е - друга кування

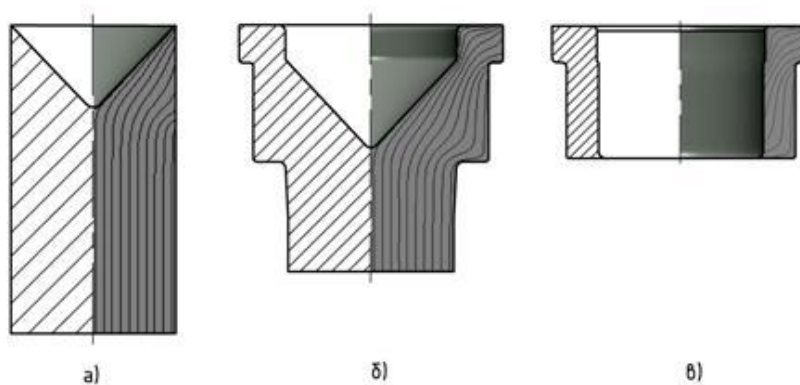


Рисунок 1.12 - Моделювання штампування поковки кільця на ГКР в матриці а - пруток після просечки; б - формування поковки; в - кування

Порівняльний аналіз інших способів отримання кілець підшипників показав, що на горячештамповочних автоматі вдається отримати спрямоване розподіл волокон макроструктури для внутрішнього кільця підшипника при штампуванні одинарної поковки і зовнішньої поковки кільця. Холодне штампування зі смугової сталі забезпечує отримання сприятливої макроструктури для зовнішнього кільця конічного роликотпідшипника, проте недоліками способу є обмеженість раціонального застосування і низький КІМ. При штампуванні повоків кілець з трубної заготовки волокна мають сприятливий характер розподілу по конфігурації кільця, волокна спрямовані вздовж контактних поверхонь.

В роботі [59] показано, що при штампуванні колінчастих валів можна керувати плином металу на гибочном переході з метою отримання заданої орієнтації волокон макроструктури. При цьому кут виходу волокон γ на контактну поверхню шатунних шийок (Рисунок 1.13) не перевищує 10° , що підвищує контактну витривалість деталі.

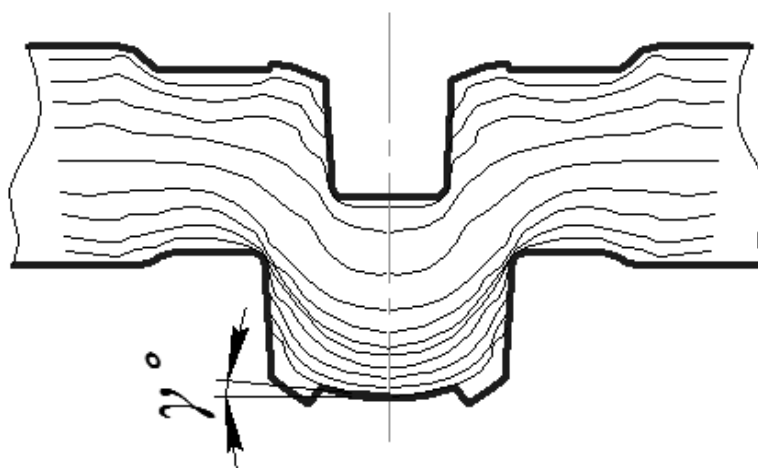


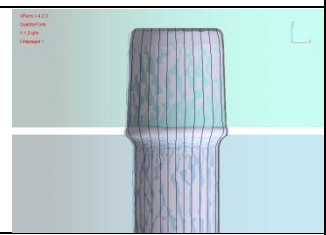
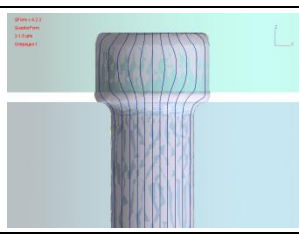
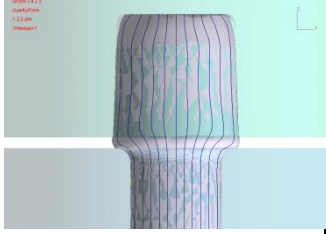
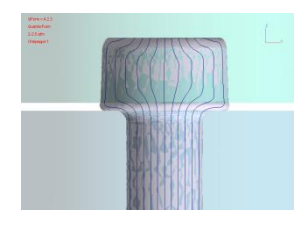
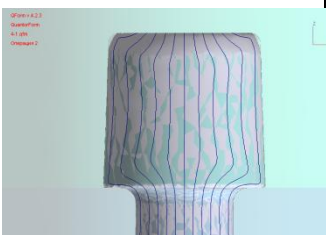
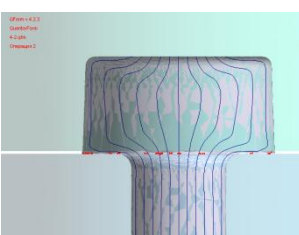
Рисунок 1.13 - Схема для визначення кута нахилу волокон в шийці вала

Під час висадки на ГКР повоків типу стрижня з фланцем [25,60,61] для формування необхідної по симетричності і спрямованості макроструктури, в набраних переходах проводять коригування розмірів і форм гравюри штампів. У Таблиці 3 наведено фрагмент таблиці волокнистих будівель, отриманої автором роботи [25]. По даній таблиці

технолог може визначити характер орієнтації волокон в залежності від основних конструкторсько-технологічних параметрів висадки: ψ – відносна довжина висадки, що характеризує висаджують обсяг матеріалу заготовки, і відношення діаметра фланця D до його висоті H .

Таблиця 3.

Таблиця 3.2 -Характер спотворення волокон при висадці поковок типу стрижня з фланцем за результатами комп'ютерного моделювання

ψ		$\frac{D}{H}$	1	2
одноперехідна висадка	1,5	волокниста будова		
	2,5	волокниста будова		
висадка з одним складальним переходом	4	волокниста будова		

1.5. Існуючі технології виробництва поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем

Згідно відомих класифікацій [5,6], все поковки в залежності від форми, маси поковок і технологічних особливостей виготовлення об'єднані в групи. Осесиметричні поковки типу стрижня з потовщенням, до групи яких відносять поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем, складають приблизно 20% від загального числа поковок, і мають довжину висаджується частини поковок H від одного до 5,5

максимального поперечного розміру D ($H/D=1-5,5$). якщо відношення H/D більше 2,5 застосовують складальні переходи в штампах різної конструкції (наприклад, конічний набірний перехід, схема якого представлена на рисунку 1.14).

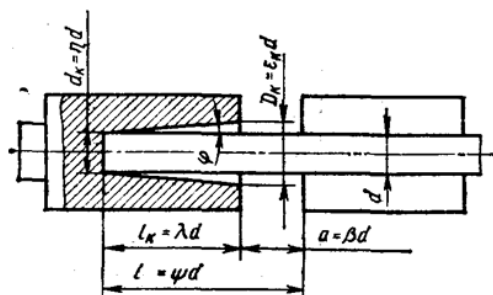


Рисунок 1.14 - Схема і відносні величини елементів складальної висадки в конічному пуансоні на ГКР

Поковки типу стрижня з фланцем широко використовуються при виробництві відповідальних деталей в автомобілебудуванні (Рисунки 1.16 і 1.17), при виробництві кульових шарнірів для пневмоциліндрів (Рисунок 1.15) і т.д.

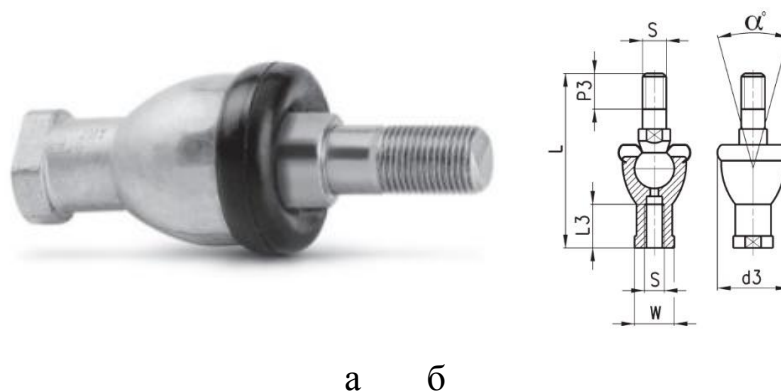


Рисунок 1.15 - Кульовий шарнір пневмоциліндра серії 40 DIN/ISO 6431 а – загальний вигляд шарніра, б - схематичне креслення шарніра

Одним із прикладів виробництва подібної поковки є кульова опора поворотного кулака масою 30 кг штампується на ГКР зі сталі 40Х [67]. Штампування виробляють із штучної заготовки $D = 95$ мм і довжиною 549 мм на ГКР номінальною силою 25 МН. Оформлення полусферического фланця отримують за 4 переходи. Спочатку комбінованої висадкою в пуансоні і в матриці отримують потовщення (перший перехід). Потім за два переходи

виробляють прошивку, роздачу і видавлювання, отримуючи попередню форму напівсферичної частини поковки. На останньому четвертому переході в чистовому струмку остаточно формують стінки полусферического фланця діаметром 235 мм тільки роздачею глибокої порожнини і незначним зворотним видавлюванням (Рисунок 1.16).

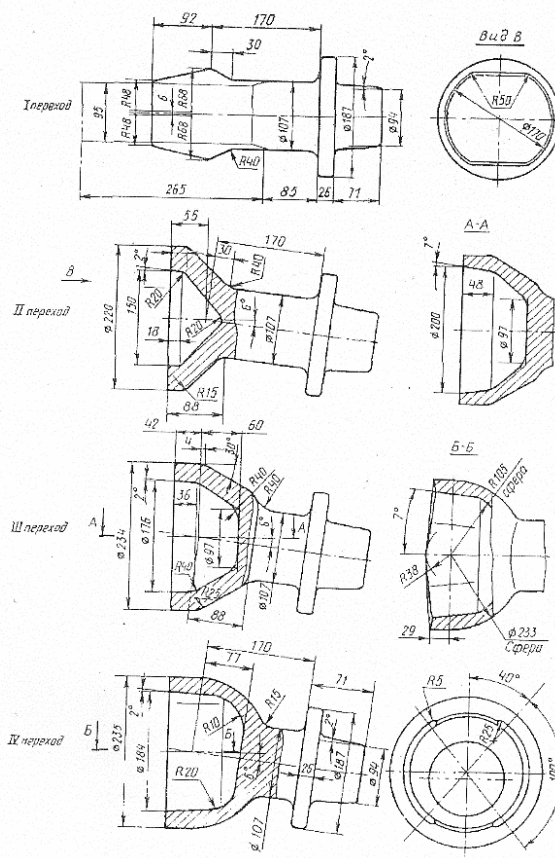


Рисунок 1.16 - Переходи штампування кульової опори автомобіля КАМАЗ

Поковки кульової опори автомобіля «УРАЛ» [68] штамнують за схожою технологією: на першому переході штампування виробляють конічний набір металу висадкою частини поковки (Рисунок 1.17, а), на другому переході конічному набору осадкою надають грибообразную форму і одночасно утворюють осьовий поглиблення конусоподібної форми (Рисунок 1.17, б), на третьому переході штампування здійснюють попередню прошивку-роздачу грибообразной потовщення без зміни його довжини (рисунок 1.17, в), на четвертому переході штампування проводять остаточно прошивку - формовку отриманого на третьому переході

потовщення з формуванням стінок порожнього сферичного потовщення зворотним видавлюванням (Рисунок 1.17, г).

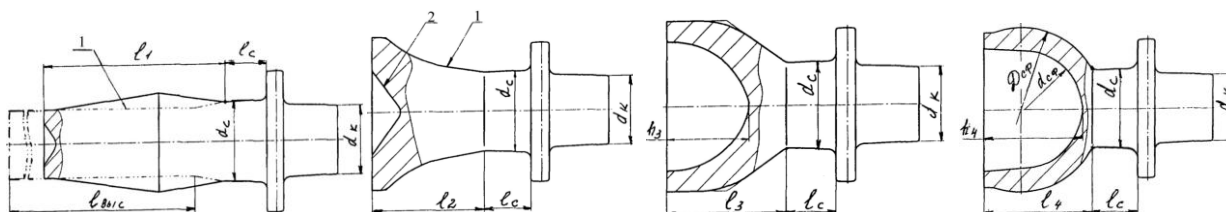


Рисунок 1.17 - Переходи штампування кульової опори автомобіля УРАЛ

Аналіз результатів штампування на свинцевих заготовках з сіткою показав, що поєднання глибокої прошивки з роздачею і зворотним видавлюванням дає хороші результати з оформлення форми поковок (Рисунок 1.18). Однак, лінії Лагранжа, що імітують волокно свинцевих заготовок, які не оминають поверхні контакту, а виходять під кутом не менше 70 градусів на внутрішню контактну поверхню полусферического фланця.

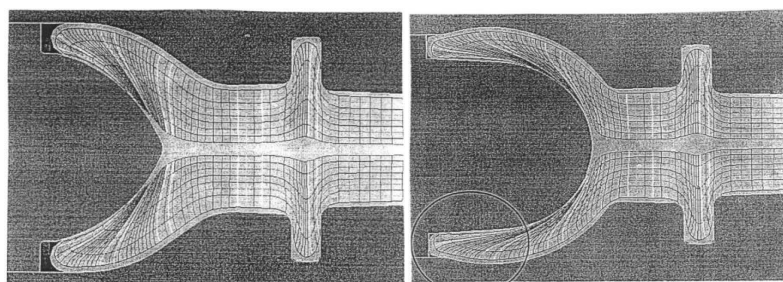


Рисунок 1.18 - Поперечні перерізи свинцевих поковок з сіткою

Поковки, розглянуті вище, служать заготовками для виробництва кульових опор призначених для рухомого з'єднання поворотного кулака з важелями підвіски. Вимоги до подібних деталей строго регламентовані [69], тому що даний виріб забезпечує безпеку руху.

Був так само розглянуто спосіб отримання півсфери з листа, запропонований авторами роботи [70]. Даний спосіб є більш ефективним, ніж висадка півсфери з прутка, за умови, що півсфера є досить тонкостінної. У зв'язку з цим одним з обмежень застосовності результатів даної роботи є товщина

стілки півсфери, конкретні показники для оцінки якої будуть запропоновані далі.

Слід зазначити, що завдання дослідження кутів нахилу волокон при розробці технологічних процесів штампування поковок типу стрижня з фланцем не ставили, а також в технічних умовах на поковки відсутні вимоги щодо орієнтації волокон.

1.6. Способи оцінки волокнистої будови поковок, одержуваних штампуванням на ГКР.

Технологічні процеси штампування на ГКР відрізняються тепловими режимами, деформаційними параметрами, такими як діаметр вихідної заготовки, довжина висаджується частини, число і форма переходів, розмірами поковки. При цьому орієнтація волокон в поковках в основному визначається неоднорідністю потоків пластичної течії металу при штампуванні.

В процесі виготовлення поковок з напівсферичним фланцем використовують такі технологічні операції: осадку, намітку, закриту прошивку, роздачу, видавлювання [5,71]. Зазначені операції мають різний характер пластичної течії металу і їх сукупність визначає орієнтацію волокон в готових поковках. Серед іншого, технологія штампування визначається такими факторами, як: обсяг і маса заготовки, відношення довжини висаджується частини заготовки до її діаметру l_v / d (Рисунок 1.14) і т.д. На орієнтацію волокон впливає і спосіб штампування (штампування в пуансоні, в матрицях або в пуансоні і матрицях).

У різних роботах, присвячених волокнистому будовою поковок прийняті різні способи оцінки якості волокнистої будови поковок. Так, в роботі [7], присвяченій дослідженню формування волокнистої структури поковок підшипникових кілець при штампуванні на ГКР, оцінку орієнтації волокон проводили по висоті ділянки з виходом волокон під кутом до контактної поверхні підшипникового кільця. При цьому встановлено вплив на орієнтацію волокон висоти циліндричного

ділянки (h) і кута конічної ділянки (α) намітки формувального пуансона, діаметра заготовки (d). Отримано рівняння регресії, що зв'язує перераховані чинники з функцією відгуку:

$$Y_1 = 6,775 - 0,0875 \cdot h - 0,0461 \cdot h^2 + 0,0125 \cdot \alpha - 0,025 \cdot d \quad (10)$$

Встановлено, що найбільш сильний вплив на Y_1 (висоту ділянки з виходом волокон під кутом до контактної поверхні поковки кільця) надає висота циліндричної ділянки (h) намітки формувального пуансона. При збільшенні висоти h від 0 до 8 мм, модель Y_1 зменшується з 7,1 до 3,2 мм (в середньому на 51,1-53,4%). Для отримання якісних поковок кілець штампуванням на ГКР рекомендують використовувати формувальний пуансон з циліндричною ділянкою намітки, а при штампуванні в пуансоні використовувати також підпружинений пуансон.

В роботі [25], присвяченій дослідженню формування волокнистої структури поковок типу стрижня з плоским фланцем, при одноперехідній висадці в якості показників симетричності волокнистої будови розглядали величину максимального зсуву Δ_{max} центрального волокна, величину кута нахилу волокон щодо осі поковки в верхній частині фланця (Рисунок 1.19).

При багатоперехідних висадці в якості показників симетричності волокнистої будови розглядали такі величини: максимальне зміщення Δ_{max} найбільше з зсувів Δ_i за абсолютною величиною і середнє зміщення Δ_{cp} полусумма абсолютних величин зсувів Δ_i , величину кута нахилу центрального волокна щодо осі поковки в верхній частині фланця.

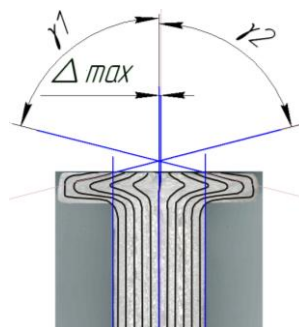


Рисунок 1.19 - волокниста будова заготовки типу стрижня з фланцем

При оцінці симетричності ліній макроструктури висаджених фланців розглядали загальніші відносні показники - коефіцієнти максимального і середнього відносного зміщення:

$$K_{\max} = \frac{\Delta_{\max} \cdot D}{d_{\text{заг}} \cdot H} \quad (1.11)$$

$$K_{\text{cp}} = \frac{\Delta_{\text{cp}} \cdot D}{d_{\text{заг}} \cdot H} \quad (1.12)$$

де H - висота висадженого фланця, D - діаметр висадженого фланця, $d_{\text{заг}}$ - діаметр заготовки. величини зміщення Δ_{\max} і Δ_{cp} замірялися на макрошліфах. В результаті були отримані три регресивні математичні моделі для визначення коефіцієнта максимального відносного зміщення K_{\max} , K_{cp} і величини кута нахилу волокна γ_{cp} відносно центральної осі поковки в верхній частині фланця в залежності від величин відносної висаджується довжини ψ і відношення розмірів фланця D/H з отриманими коефіцієнтами в натуральному масштабі:

$$K_{\max} = \frac{(-0,466 + 0,036 \frac{D}{H} \psi - 0,037 \frac{D}{H} + 0,205 \psi)}{d} \cdot \frac{D}{H} \quad (1.13)$$

$$K_{\text{cp}} = \frac{(-0,801 + 0,035 \frac{D}{H} \psi - 0,134 \frac{D}{H} + 0,161 \psi)}{d} \cdot \frac{D}{H} \quad (1.14)$$

$$\gamma_{\text{cp}} = 7,123 + 4,197 \frac{D}{H} + 11,249 \psi - 0,301 \frac{D}{H} \psi \quad (1.15)$$

При висадці заготовок з величиною $\psi = 1,5$ при різних відносинах $\frac{D}{H} = 1; 2; 4; 8$ спотворення волокнистої будови практично не спостерігали (при цьому значення K_{\max} і K_{cp} залишалися практично постійні і не перевищували значень 0,0181 і 1,2115 відповідно). При збільшенні ψ до 2,5 спотворення волокнистої будови збільшувалася (значення K_{\max} і K_{cp} лежали в межах 0,0050 ... 0,1882 і 0,445 ... 0,7705 відповідно).

При подальшому збільшенні ψ до 4 характер спотворень волокнистого будови змінювався. при $\psi = 5,4$ и $\frac{D}{H} = 8$ мало місце більше спотворення волокнистої будови. При цьому спостерігалися значення $K_{\max} = 0,7601$ и $K_{\text{cp}} = 0,5084$.

Значення кута нахилу волокон γ зі збільшенням ψ і ставленням розмірів фланця $\frac{D}{H}$ різко збільшуються і досягають максимальних значень при $\psi = 5,4$ и $\frac{D}{H} = 8$ (найбільше значення $\gamma=88,4404$).

1.7. Висновки по главі 1

1. Аналіз літературних даних показав, що існуючі дослідження процесу висадки на ГКР поковок типу стрижня з полусферическим фланцем, широко застосовуються при виготовленні відповідальних деталей різних шарнірів, не враховують розподілу волокнистої будови в поковки. Ряд досліджень показав, що волокнисту будову є одним з важливих показників якості поковок і в значній мірі визначає міцність, довговічність і експлуатаційну надійність виготовляються з них деталей. У зв'язку з цим, проектування технологічних процесів поковок типу стрижня з полусферическим фланцем доцільно проводити з урахуванням характеру волокнистої будови.

2. Аналіз способів отримання поковок з спрямованим волокнистим будовою і існуючих технологій виробництва поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем показав недостатню вивченість впливу основних технологічних параметрів процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем (відносної висаджується довжини заготовки, відносних розмірів півсфери, тертя і т.д.) на характер волокнистої будови поковки.

3. При розробці технологічних процесів штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем не ставилося завдання отримання сприятливого спрямованого будови. Тому питання визначення критеріїв оцінки характеру волокнистої будови в поковки і впливу схеми деформування і кількості переходів штампування на характер розподілу волокнистої будови в поковки на даний момент є невивченим.

4. Існуючі методики проектування поковок з спрямованим волокнистою будовою, в переважній більшості випадків, припускають наявність обчислювального блоку для моделювання технологічних процесів обробки металів тиском. У зв'язку з цим для моделювання процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем обраний метод кінцевих елементів, що дозволяє за допомогою ліній Лагранжа визначити характер волокнистої будови, а так само визначити енергосилові параметри технологічного процесу.

5. Визначено доцільність розробки інженерного методу, який дозволить визначати характер волокнистої будови і необхідну силу деформування в залежності від основних технологічних параметрів без застосування КЕ моделювання.

На підставі даних висновків сформульовані завдання дослідження, які наведені в тексті введення до дисертаційної роботи.

2. Вибір схеми штампування і основних технологічних параметрів, що впливають на волокнисту структуру поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем на основі комп'ютерного моделювання

2.1. Вибір CAD-CAE системи для обчислювального експерименту

Для розробки розрахункового інструменту, який дозволяє при проектуванні технологічного процесу висадки поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем прогнозувати спрямоване волокнисту будову деталі, використовували методи планування факторного експерименту. Сучасні CAD-CAE системи дозволяють створити моделі об'єкта дослідження і проводити на їх основі обчислювальні експерименти. При цьому, експериментатор отримує можливість варіювання, при необхідності, великим числом факторів, економити матеріальні та енергетичні ресурси, і, таким чином, підвищувати ефективність вивчення об'єкта дослідження при мінімізації витрат.

У розділі 1, на основі аналітичного огляду літератури, показано, що обчислювальні середовища DEFORM-2D і DEFORM-3D отримали найбільш широке, в порівнянні з аналогами, поширення при вирішенні наукових завдань в сфері обробки металів тиском. Стосовно до задачі аналізу напружено-деформованого стану і волокнистої будови поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем, можна сформулювати кілька основних переваг системи DEFORM:

- Наявність вбудованих інструментів побудови сіток Лагранжа, що імітують волокнисту будову в поковках;
- Можливість оцінити траєкторію руху частинок матеріалу на всьому протягу технологічного процесу;
- Наявність безлічі вбудованих моделей тертя як на основі моделі тертя Амантона-Кулона, так і на основі моделі тертя Зібеля;

Гнучкі інструменти побудови сіток кінцевих елементів, в тому числі автоматична регенерація сітки при її деградації в зв'язку з великими деформаціями;

Можливість написання призначених для користувача підпрограм мовою програмування Fortran;

Простий і зручний інтерфейс.

У зв'язку з цим для проведення обчислювального експерименту з метою отримання залежностей, що дозволяють прогнозувати напрям волокон, і з урахуванням того, що стрижень з напівсферичним фланцем є осесиметричним виробом, для проведення обчислювального експерименту була обрана система DEFORM-2D.

2.2 Створення моделі об'єкта дослідження для обчислювального експерименту

Для проведення експериментальних досліджень висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою спочатку використовували комп'ютерне моделювання гарячої висадки стали холодної висадкою заготовок з пруткового алюмінію $\varnothing 20_{-0,3}$ мм марки 1050А (АД-0, ГОСТ 4784-97,) в відпаленого стані. Використання в якості модельного матеріалу алюмінію, за даними робіт [72,73,7,22,25,59], Дозволяє отримати адекватні результати, тому що алюміній і його сплави при холодній обробці володіють малим зміцненням і можуть застосовуватися в якості модельного матеріалу для гарячої обробки. Найкраще, сплави алюмінію задовольняють умовам моделювання при великому вмісті в них магнію [72]. Хімічний склад використовуваного сплаву наведено в Таблиці 4.

Таблиця 4.1 -Хімічний склад алюмінію марки1050А (АД-0)

Склад у %, не более						
Al	Fe	Si	Zn	Mn	Cu	Mg
≤99,5	0,17	0,1	≤0,06	0,01	0,10	0,02

Досліджуваними процесами є одноперехідному висадка полусферического фланця при відсутності втрати стійкості заготовки (відсутність вигину осі заготовки) та багатоперехідних висадка зі складальними кінчними переходами в умовах обмеженої втрати стійкості в залежності від відносної висоти висаджується частини заготовки l / d (Рисунок 1.14). Імовірно, при таких умовах проведення висадки можливе отримання сприятливого, симетричного спрямованого волокнистої будови поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем.

Механічні властивості алюмінію марки 1050А в відпаленого стані наведені в Таблиці 5. Зазначені значення параметрів в чисельнику відповідають результатам випробувань на розтяг по ГОСТ 1497-84, в знаменнику - за довідковими даними [74].

Таблица 5.1 - Механічні властивості алюмінію марки 1050А (АД-0)

Тимчасовий опір σ_B , МПа	Межа текучості $\sigma_{0.2}$, МПа	Відносне подовження після розриву δ_5 , %	Відносне поперечне звуження після розриву φ , %	Модуль пружності 1-го роду Е, МПа	Модуль пружності 2-го роду G, МПа
73 / 80	23 / 40	40 / 35	87 / 80	- / 71000	- / 27000
Чисельник - результати випробувань на розтяг, ГОСТ 9651-84; Знаменник - довідкові дані					

На рисунку 2.1 представлено схематичне зображення поковки з прийнятими позначеннями геометричних розмірів. Тут R - зовнішній радіус півсфери, r - внутрішній радіус півсфери, d - діаметр вихідної заготовки, Δ - глибина припуску на механічну обробку.

Завдання розрахунку пластичного формозміни в системі DEFORM вирішують на основі системи Рівнянь (1.3) - (1.7). Як вузлових невідомих, щодо яких вирішують завдання мінімізації функціонала (1.9), використовують швидкості вузлів кінцевих елементів чотиревузлової осесиметричної сітки.

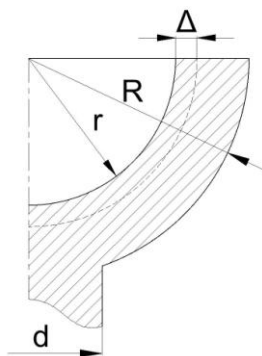


Рисунок 2.1 - Прийняті позначення розмірів поковки

Для проведення комп'ютерного моделювання (в разі рішення поставленого завдання як ізотермічного) досить задати:

1. конфігурацію гравюри штампів;
2. початкову форму заготовки;
3. реологічну модель (криву деформаційного зміцнення) матеріала заготовки;
4. фактор тертя між заготовкою і штампом (по моделі тертя Амантона-Кулона, або моделі тертя Зібеля);
5. зміна швидкості руху механізму ГОЛОВНОГО ВИКОНАВЧОГО преса;

аналогічна методика використовувалася при моделюванні ізотермічної деформації в роботі [75].

Для аналізу розподілу волокон по конфігурації діаметральної площині поковки використовували вертикальні лінії Лагранжа (функція Flownet), які відображають волокнисту будову поковки і «деформуються» одночасно з поковкою.

Для дослідження напружено-деформованого стану та енергосилових параметрів висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем використовували картини полів розподілу деформацій, швидкостей деформацій, опору деформації за обраними перетинами і по

зовнішньої поверхні поковки, а також графіки зміни сили і роботи деформування, отримані в системі DEFORM.

Результатом комп'ютерного моделювання вважали картини заповнення гравюри штампа і волокнистої будови поковок по переходах висадки, картини полів розподілу деформацій, швидкостей деформацій, напружень, а також графіки зміни сил і робіт деформування.

Вихідними даними для моделювання були:

- двовимірний геометричний модель інструменту і заготовки;
- характеристики обладнання: гідравлічний прес, $V_{\text{деф}}=60$ мм/мін;
- матеріал заготовки - алюміній 1050А (АД-0 [76]);
- модель тертя Зібеля, фактор тертя $m=0.3$;
- температура заготовки та інструменту в процесі деформації 20°C ;

процес протікає без теплообміну;

Властивості матеріалу задавалися в табличному вигляді, використовуючи криві деформаційного зміцнення (опір деформації) матеріалу заготовки [77] (Таблиця 6) при температурі 20°C .

На рисунку 2.2, як приклад, наведено комп'ютерна модель заготовки і деформуючого інструменту при одноперехідній висадці полусферического фланця. Волокна вихідної макроструктури спрямовані уздовж поздовжньої осі заготовки.

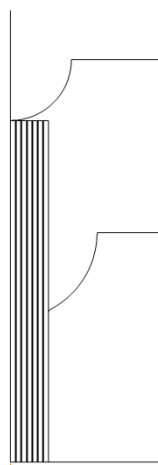


Рисунок 2.2 - Комп'ютерна модель заготовки і деформуючого інструменту

Таблиця 6.1 - Опір деформації алюмінію марки 1050А (АД-0)

накопичена деформація ($\bar{\epsilon}$), мм/мм	напруга течії (σ_s), МПа
0	55.158056
0.2	73.7739
0.3	83.42656
0.4	91.010792
0.5	97.216074
0.6	102.73188
0.7	107.55821
0.8	111.69506
0.9	115.83192
1	119.2793
1.08	119.2793

На рис. 2.3 - показані результати змодельованих 2-х набраних і остаточного переходів висадки поковки з фланцем при відносній висаджується довжині $\psi = l / d = 5,4$ і відносній товщині стінки півсфери $\gamma = (R-r)/d = 1,9$.

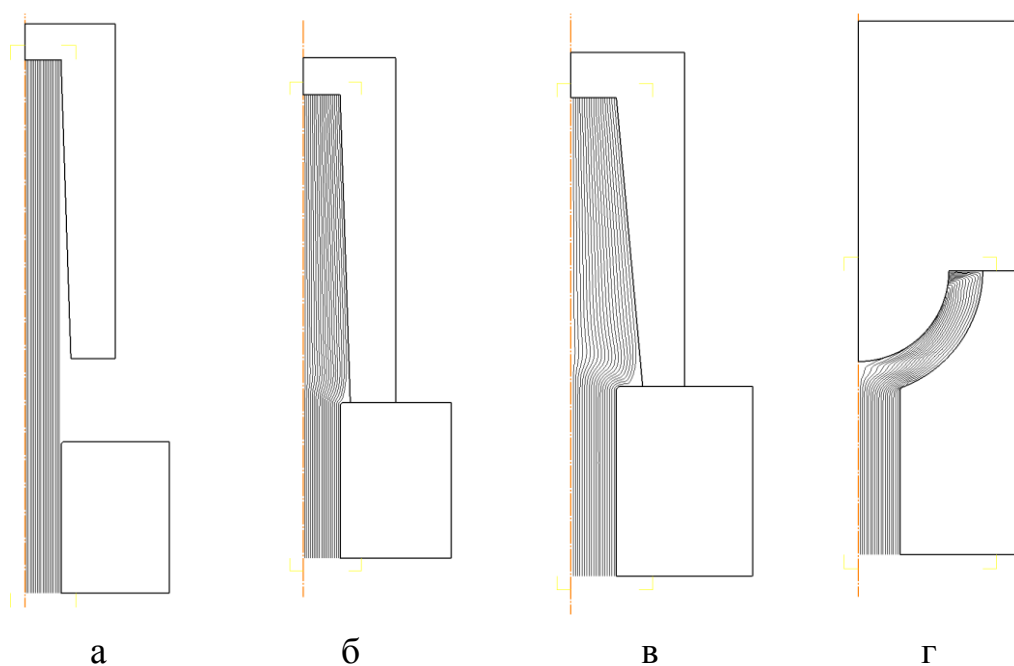


Рисунок 2.3 - Комп'ютерне моделювання складальної висадки при $\psi = 5,4$, $\gamma = 1,9$ а - вихідна заготовка; б - перший складальний перехід; в - другий складальний перехід; г - остаточна висадка

При багатоперехідних висадці можливі різні способи набраних переходів, що визначає, в чому, орієнтацію волокон. Тому на початковому етапі дослідження необхідно було вибрати схему штампування.

Оцінку схем штампування здійснювали на основі показників орієнтації волокон поковки, в якості яких вибрали кути β_1 і β_2 між дотичними, проведеними до котра утворює пуансона і волокна в точці виходу волокна до поверхні пуансона, як показано на схемі на рисунку 2.4. Кут β_1 вимірювали між дотичними на відстані 5° від верхньої кромки фланця, кут β_2 - між дотичними на відстані радіуса заготовки від осі симетрії поковки.

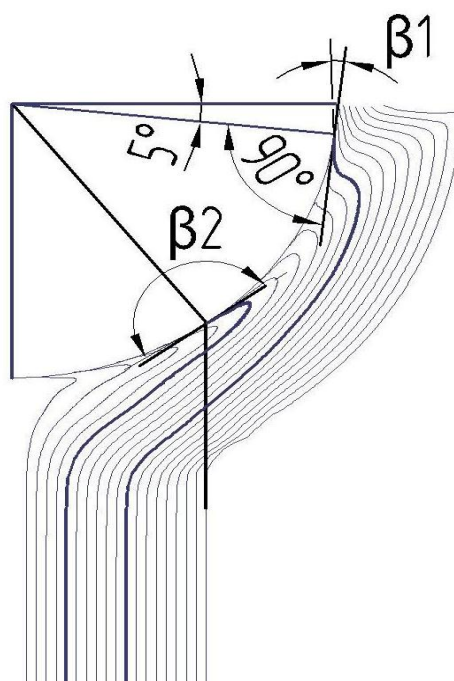


Рисунок 2.4 - Схема вимірювання кутів орієнтації волокон β_1 і β_2

Вибір саме цих критеріїв обумовлюється конструктивними особливостями контактної пари кульового пальця і кульової опори. Найчастіше верхня частина сферичної поверхні кульового пальця видаляють обробкою різанням, а в нижній частині кульової опори проробляють отвір для подачі мастила. Таким чином, найбільш навантаженою частиною кульової опори імовірно виявляється місце, близьке до перетину внутрішньої півсфери кульової опори і радіуса заготовки, з якої ця півсфера була

отримана. У зв'язку з цим найбільш доцільно, як показник орієнтації волокна поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем, взяти кут β_2 . Місце вимірювання кута β_1 є найбільш віддаленим від місця максимального навантаження (місця вимірювання кута β_2), але перебуває в контакті з кульовим пальцем, тобто працює на стирання. При цьому очевидно, що поряд з віссю півсфери, дане місце отримує найбільшу ступінь пластичної деформації на остаточній стадії формування півсфери, що може мати значний вплив на характер волокнистої будови. У зв'язку з цим оцінка орієнтації волокон в цьому місці також доцільна. Відступ в 5° від верхньої кромки фланця обумовлено можливою обробкою різанням цієї кромки.

Як усередненого показника, який би характеризував кут виходу волокна на контактну поверхню в цілому, вибрали $\beta_{\text{ср}}$ - середнє значення кутів β між дотичними, проведеними по контуру пуансона в зоні вимірювання між β_1 і β_2 . Надалі кути β_1 , β_2 , $\beta_{\text{ср}}$ і β будемо називати кутами орієнтації волокон. Кут орієнтації волокон $\beta_{\text{ср}}$ будемо обчислювати за формулою:

$$\beta_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \beta_i, \quad (2.1)$$

де n - кількість волокон в зоні вимірювань.

Як показав аналіз картини орієнтації волокон, наведений на рисунку 2.3, волокна готового виробу на зовнішній поверхні паралельні контуру матриці чистового струмка. Тому оцінку орієнтації волокон проводили тільки щодо сферичної поверхні пуансона.

Очевидно, що в разі, якщо кування проводиться способом гарячої деформації, радіуси внутрішньої і зовнішньої півсфер поковки будуть відрізнятися від радіусів внутрішньої і зовнішньої півсфер деталі на величину припуску на механічну обробку. Це може привести як до погіршення показників β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ в деталі, в порівнянні з тими ж показниками в

поковки, так і до їх покращання. У зв'язку з цим доцільним є вимір кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ не тільки на утворює пуансона, а й на деякому радіусі $r + \Delta$, де Δ визначається величиною припуску на механічну обробку (Малюнок 2.1).

Для оцінки орієнтації волокон розроблена методика, представлена на рисунку 2.5, а на мові програмування Fortran 77 [78] реалізований алгоритм визначення кутів орієнтації із застосуванням програми AutoCAD (текст реалізованого алгоритму наведений у Додатку). Алгоритм представляє з себе програму-конвертер, яка в автоматичному режимі зчитує дані з інформацією про сітку Лагранжа в форматі GEO (формат геометричного файлу програмного комплексу DEFORM) і переносить їх у файл універсального формату DXF (Drawing eXchange Format), який може бути відкритий будь-якою системою автоматизованого проектування (AutoCAD, КОМПАС і т.д.) з подальшим вимірюванням кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ стандартними засобами вимірювання застосовується САПР.

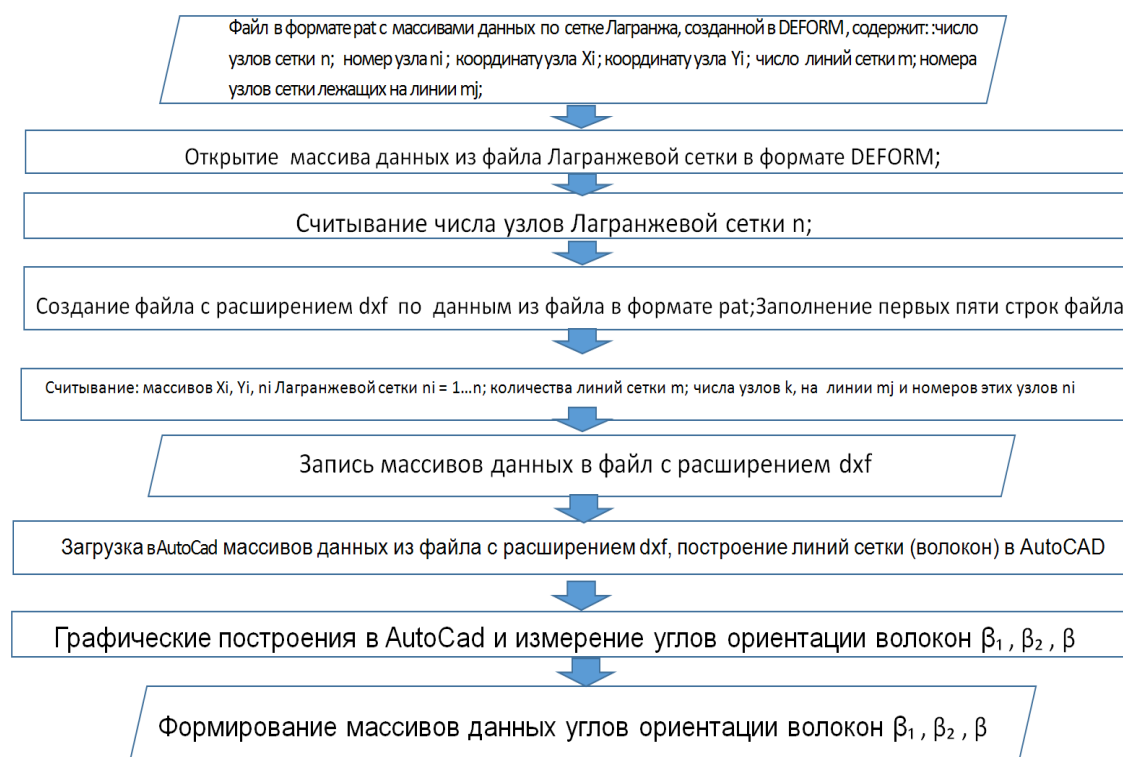


Рисунок 2.5 - Збільшена блок-схема визначення кутів орієнтації волокон

2.3. Моделювання схем висадки і вибір раціонального способу отримання поволок типу стрижня з напівсферичним фланцем

При комп'ютерному моделюванні були випробувані рекомендовані в довідковій літературі [5] схеми штампування поволок типу стрижня з напівсферичним фланцем. Розглянуто три схеми: витяжка півсфери з плоского фланця (Рисунок 2.6, а), зворотне видавлювання півсфери з прутка за один перехід (Рисунок 2.6, б), або, при необхідності, видавлювання півсфери після попередньої конічної висадки, і видавлювання півсфери після попереднього формувального переходу (Рис. 2.6, в).

Аналіз значень орієнтації волокон в готовому виробі дозволив зробити висновок про необхідність застосування попереднього формувального струмка (схема на рисунку 2.6, в) в силу того, що даний спосіб отримання кінцевої форми поволоки забезпечує найкращу форму волокнистої будови.

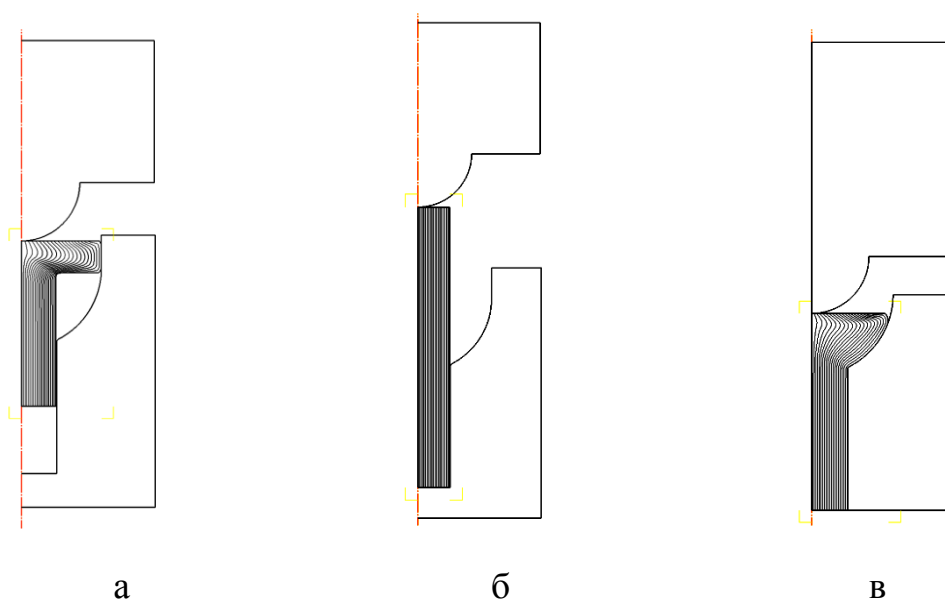


Рисунок 2.6 - Схеми штампування поволок типу стрижня з напівсферичним фланцем

В результаті витяжки півсфери з плоского фланця, утворюється значне ущільнення волокон в місці переходу від стрижня до фланця, а так само спостерігається вихід волокна під кутами близькими до 90° на контактній з пуансоном поверхні (Рис. 2.7, а). В результаті зворотного видавлювання

півсфери з прутка, волокнисту будову має більш рівномірний, в порівнянні з розглянутим вище способом, однак у верхній частині півсфери спостерігається вихід волокна під кутами близькими до 90° на контактній з пуансоном поверхні (Рис. 2.7, б). Нарешті, найкраще волокнисту будову, а саме рівномірне і плавно огибаюче контактну поверхню пуансона (Рис. 2.7, в), забезпечується в разі застосування схеми з попередніми формувальних переходом.

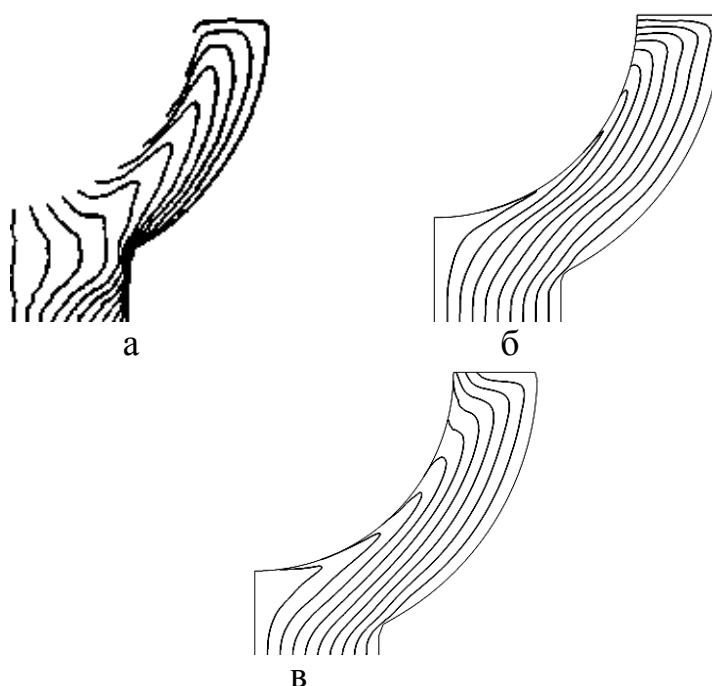


Рисунок 2.7 - волокниста будова поковок типу стрижня з

полусферическим фланцем при різних схемах деформування

На першому етапі дослідження форма попереднього штампувального переходу виходила в результаті висадки плоским пуансоном кінцевої набраної заготовки в матрицю, що збігається за формою і розмірами з матрицею відповідного чистового струмка (Рисунок 2.6, в). На додаток до вищенаведеного дослідження провели дослідження вплив форми пуансона на попередньому штамповочном струмку. На рисунку 2.8 представлені результати моделювання попереднього штампувального струмка з різними формами пуансона і матриці, а на рисунку 2.9 волокнисту будову в остаточній поковки при відповідній формі поковки на попередньому переході.

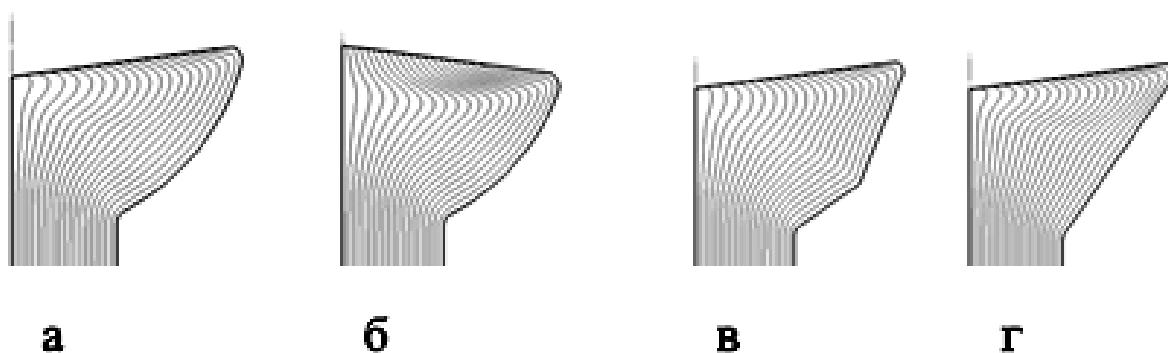


Рисунок 2.8 - Різні види волокнистої будови поковок після штампування в попередньому формувальному струмку

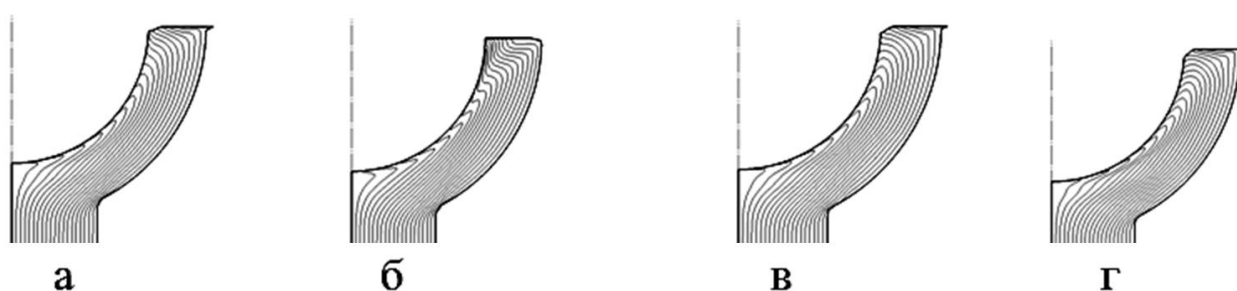


Рисунок 2.9 - Волокнисту будову поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем при різних схемах деформування

Результати показують, що варіювання формою матриці (схеми, представлені на рисунку 2.8, в і г) не дає поліпшення волокнистої будови остаточної поковки, в порівнянні зі схемами, представленими на Рисунках 2.6, в і 2.8, а і б. Крім того, дивлячись на результати варіювання формою попереднього штампувального переходу, можна зробити висновок, що механізм утворення кутів нахилу волокон до поверхні пуансона визначається співвідношенням контактних поверхонь з пуансоном і з матрицею при заповненні гравюри штампа.

Результати, представлені на Рисунках 2.7 і 2.9, говорять про те, що при штампуванні стержня з напівсферичним фланцем за всіма схемами деформування волокно плавно огинає зовнішній контур півсфери, в той час як внутрішній контур, як правило, працює на стирання, воно огинає значно гірше. Пов'язано це з тим, що швидкість протягом матеріалу

по пуансону значно вище швидкості течії матеріалу по матриці. Для аналізу цієї гіпотези в ході чисельного експерименту були заміряні положення і швидкості руху частинок матеріалу в кінці ходу деформування (Рисунки 2.10 і 2.11). Слід пояснити, що Рисунок 2.11 представляє собою шість графікою зміни швидкостей матеріальних течок металу в кінці ходу деформування в залежності від віддаленості початкової координати x_0 цієї точки від осі заготовки. Кожен з шести графіків відповідає певному (від $y = 42$ мм до $y = 148$ мм.) Значенням початкового положення точок по висоті вихідної заготовки.

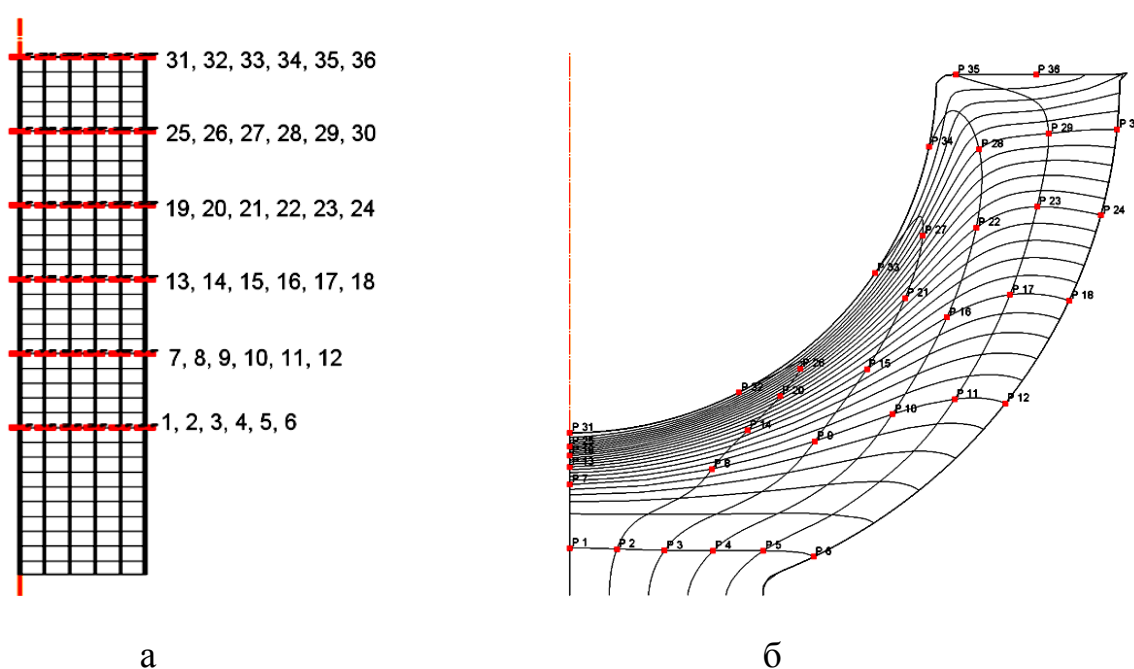


Рисунок 2.10 - Положення частинок матеріалу при одноперехідній штампуванні поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем а - в заготівлі, б - в остаточній штампуванні

Необхідно так само відзначити, що кут нахилу деформуючої поверхні пуансона α в попередньому штамповочном струмку (Рисунок 2.8, а і б) також значно впливає на значення кутів нахилу волокон до поверхні пуансона в чистовому струмку (Рисунок 2.9, а і Рисунок 2.9, б). Більш детально його вплив досліджено в наступних розділах даної роботи.

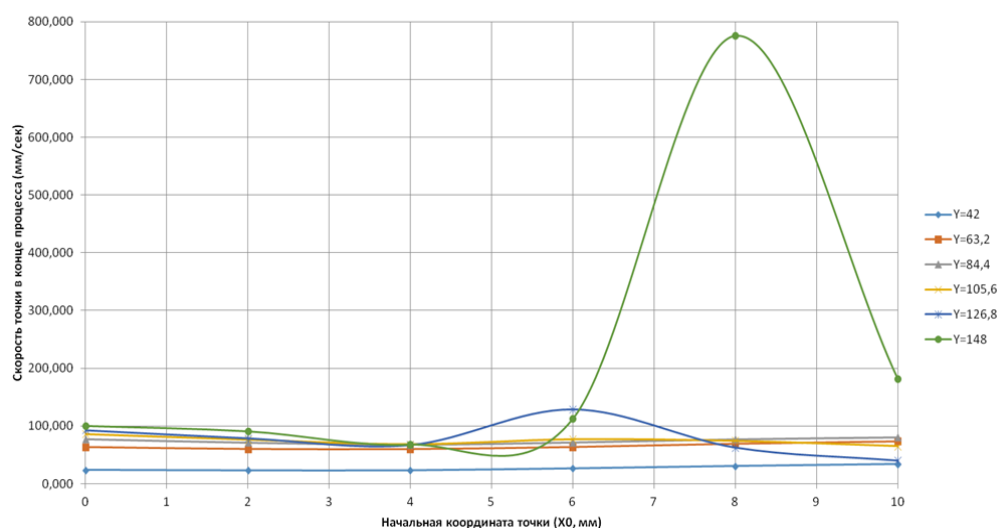


Рисунок 2.11 - Значення швидкостей матеріальних точок в кінці ходу деформування

2.4. Визначення кореляційної залежності між показниками орієнтації волокон поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем зі сплаву алюмінію АД0 і стали 45

Для перевірки можливості застосування результатів комп'ютерного, а в подальшому і фізичного, моделювання з використанням в якості модельного матеріалу алюмінію марки 1050А (аналог АД-0) для проектування процесу гарячої висадки сталевих поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою справили кореляційний аналіз кутів орієнтації волокон досліджуваних поковок.

Для визначення кутів орієнтації волокон справили комп'ютерне моделювання процесу холодної висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з алюмінію марки АД-0 і гарячої висадки аналогічної поковки зі сталі 1045 (аналог стали 45) [79] при $\psi = 2,5$; $\alpha = 0^\circ$ і $\gamma = 0,337$. Температура нагріву сталеві заготовки становила 1100 C° . Фактор тертя по моделі тертя Зібеля (Рівняння (1.8)) $m = 0,3$. В Таблиці 7 наведені динячі по опору пластичної деформації стали 1045 [80]. Дані по опору пластичної деформації сплаву алюмінію 1050А були раніше наведені в Таблиці 6.

Таблиця 7.1 - Опір пластичної деформації сталі марки 1045 (сталь 45)

Накопичена деформація (ϵ), мм / мм	напруга течії (σ_s), МПа	
	При інтенсивності швидкості деформації $\epsilon = 1.6 \text{ c}^{-1}$	При інтенсивності швидкості деформації $\epsilon = 40 \text{ c}^{-1}$
0	86.34	114.775
0.1	88.644	126.713
0.2	90.948	138.651
0.3	92.2	146.095
0.4	93.332	152.235
0.5	94.338	156.878
0.6	94.604	160.389
0.7	95.529	164.054
0.8	95.709	166.493

На рисунку 2.12 показані лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон, для сталевий і алюмінієвий поковок.

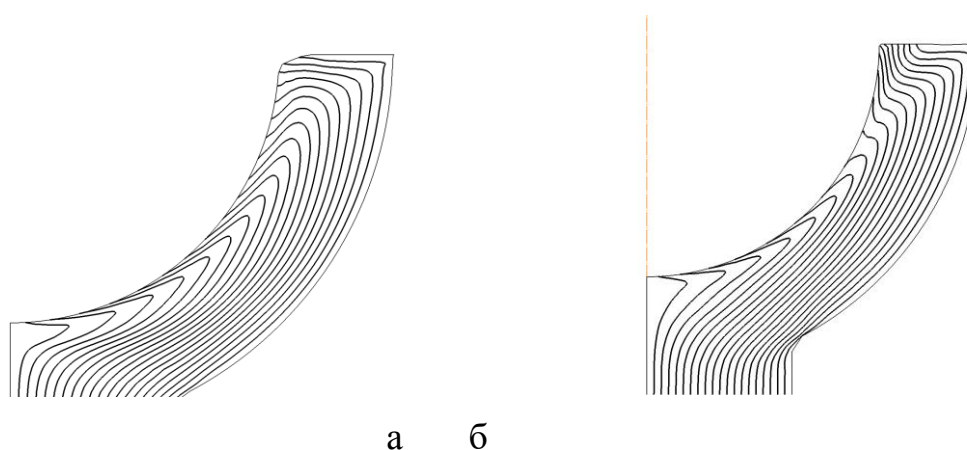


Рисунок 2.12 - Лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон для сталевий (а) і алюмінієвий (б) поковок

За розробленою в розділі 2.2 методикою було вироблено визначення кутів β орієнтації волокон (по всій контактній з пуансоном поверхні, включаючи зони в осьовій частині), значення яких наведені в Таблиці 8.

Таблиця 8.1 -Значення кутів β орієнтації волокон сталевий і алюмінієвої поковок

номер волокна	β , кутовий градус	
	Сталь 1045	Алюміній 1050А
1	169,32	170,96
2	171,45	166,11
3	173,53	174,80
4	173,65 (165*)	177,00 (180*)
5	174,56	178,96
6	171,69	174,31
7	171,85	175,94
8	169,79 (164*)	177,56 (180*)
9	170,53	177,64
10	163,40	177,38
10	163,40	177,38
11	163,40	168,06
12	160,89	50,48
13	157,3	13,98
14	105,56 (117*)	9,39 (0*)
15	98,35	12,52

* В дужках наведені результати вимірювання кутів, отримані в результаті експерименту, методика якого далі буде представлена в Розділі 3.3.

За допомогою статистичної функції програми Microsoft Excel з розрахунку коефіцієнта кореляції визначили, що коефіцієнт парної кореляції r (Рівняння (2.2)) дорівнює 0,82.

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (2.2)$$

де N - кількість вимірних кутів в кожній з моделей (обсяг вибірки), x і y - значення кутів β в сталевий і алюмінієвої поковках відповідно.

Для перевірки значимості коефіцієнтів кореляції використовують розподіл Стьюдента [82] і умова:

$$\frac{|r|\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} > t_T, \quad (2.3)$$

де r – коефіцієнт кореляції, N – обсяг виборки, t_T – табличний критерій Стьюдента.

Якщо нерівність виконується, тобто розрахунковий критерій Стьюдента більше табличного, то гіпотезу про кореляційної зв'язку приймають. Табличний критерій Стьюдента визначають з числа ступенів свободи f , рівного об'єму

вибірки, зменшеному на дві одиниці, тобто $f=N-2=15-2=13$, при рівні значущості $q=5\%$. З таблиці, представленої в роботі [82] при $f=13$ и $q=5\%$ $t_T=2,16$. Розрахунковий критерій становить 5.17, отже, між кутами орієнтації волокон поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем із сталі і алюмінію існує сильний прямий кореляційний залежність, тому що коефіцієнт кореляції значущий і близький до одиниці.

Єдиною відмінністю комп'ютерної моделі висадки з алюмінію марки АД-0 і комп'ютерної моделі висадки зі сталі 1045 була реологическая модель матеріалу (опір пластичної деформації), закладена в кожну з моделей. З цього очевидно, що причиною виникнення незначної розбіжності в волокнистом будові полусферического фланця поковки з алюмінію і поковки зі сталі є зміцнення матеріалу в процесі пластичного деформування, яке визначає значення зовнішніх питомих дотичних сил тертя на поверхні півсфери (Рівняння (1.8)). Для більш детального вивчення впливу цього ефекту була побудована комп'ютерна модель процесу гарячої висадки зі сталі 45 з реологічної моделлю матеріалу у вигляді:

$$\sigma_S = c \dot{\epsilon}^n \epsilon^m + y, \quad (2.4)$$

де σ_S – напруга течії матеріалу, $\dot{\epsilon}$ – інтенсивність швидкості деформації, ϵ – накопичена деформація, y , c , n и m – поправочні коефіцієнти.

Для більш точного обліку впливу швидкісного зміцнення матеріалу на волокнисту будову в напівсферичним фланці коефіцієнти Рівняння (2.4) визначали за даними довідника [81], тому що в порівнянні з [80], дані наведені в цій роботі більш повно описують швидкісне зміцнення при гарячому деформуванні. Значення коефіцієнтів Рівняння (2.4) для різних сталей, в тому числі сталі 45, отримані аппроксимацией даних роботи [81] наведені в Таблиці 9.

Таблиця 9.1 -Коефіцієнти рівняння опору пластичної деформації при $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Матеріал		Коефіцієнт рівняння (2.4)			
		c	n	m	y
вуглецеві сталі	Сталь 45	65	0	0.25	25
	Сталь 50	120	0	0.23	49
	Сталь 3сп	48	0	0.2	23
середньолеговані сталі	30ХГСА	53	0	0.2	32
	30ХМ	49	0	0.15	23
	20ХН3В	120	0	0.21	26
високолеговані сталі	15Х28	66	0	0.27	12
	12Х18Н9Т	70	0	0.21	44
	40Х13	78	0	0.3	38

Коефіцієнт n, що характеризує деформаційне зміцнення, прийнятий рівним 0, тобто прийнято допущення про повну відсутність деформаційного зміцнення матеріалу в гарячому стані.

Лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон, отриману за результатами моделювання з даними по опору пластичної деформації з Таблиці 9 для сталі 45, представлені на рисунку 2.13.

Візуальне порівняння результатів моделювання, отриманих з реологічної моделлю з Таблиці 7, яка враховує як ефект деформаційного зміцнення матеріалу, так і ефект швидкісного

зміцнення матеріалу (Рисунок 2.12, а) і реологічні моделлю з Таблиці 9, яка враховує лише швидкісний зміцнення матеріалу (Рисунок 2.13) дозволяє констатувати крайню схожість розподілу ліній Лагранжа. Більш точне визначення кутів виходу волокон на внутрішній радіус півсфери показує, що відхилення значень кутів β , отриманих з реологічної моделлю з Таблиці 9, становить не більше 5% від значень, наведених в Таблиці 8 для сталі 1 045.

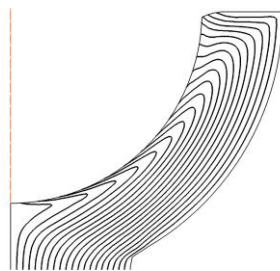


Рисунок 2.13 - Лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон поковки зі сталі 45

Далі досліджували лише ступінь впливу швидкісного зміцнення на розподіл волокон. З Таблиці 9 видно, що для різних сталей коефіцієнт m , характеризує швидкісний зміцнення, лежить в межах 0.15 - 0.3. Однак для більш наочної оцінки впливу швидкісного зміцнення на розподіл волокон, коефіцієнтом m варіювали на чотирьох рівнях ($m=0$ ($\sigma_s = 90$ МПа), $m=0.1$, $m=0.25$ и $m=0.5$), в тому числі розглядалися випадки виходу цього коефіцієнта за вище означені межі. Решта коефіцієнти Рівняння (2.4), представлені в Таблиці 9 для сталі 45 залишали без змін. Лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон, отримані за результатами цього варіювання, представлені на рисунку 2.14.

З рисунка 2.14 видно, що розподіл волокон при $m = 0$ аналогічно розподілу волокон при моделюванні висадки заготовки зі сплаву алюмінію 1050 (Рисунок 2.12, б), що ще раз дає можливість стверджувати повна відсутність впливу деформаційного зміцнення на волокнисту будову в півсфері. Зі збільшенням коефіцієнта m волокниста будова змінюється в бік більшого загину волокон, тобто в бік збільшення абсолютних значень кутів β .

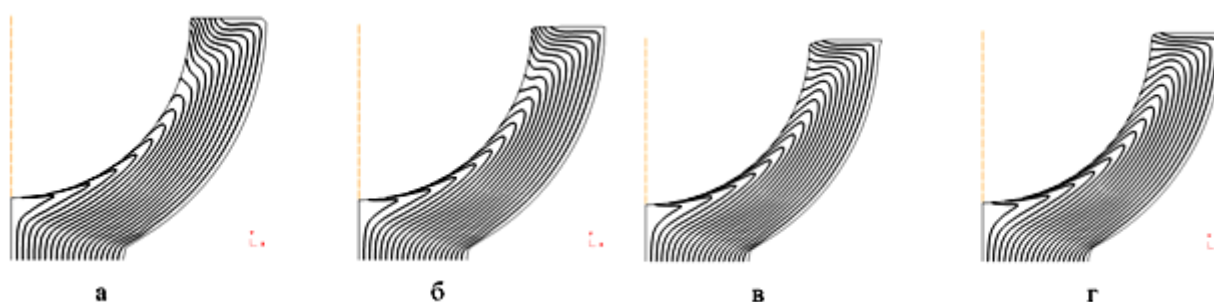


Рисунок 2.14 - Лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон

поковки при а – $m=0$, б – $m=0.1$, в – $m=0.25$, г – $m=0,5$

Необхідно відзначити, що отриманий вище коефіцієнт кореляції $r = 0,82$ близький до мінімально можливого, тому що отримано для випадку порівняння висадки з заготовки зі значним швидкісним зміцненням (сталь 1045) і заготовки з повною відсутністю швидкісного зміцнення (алюміній 1050А або сталь при $m = 0$). Таким чином, в зв'язку з тим, що мінімально можливий коефіцієнт кореляції значущий і близький до одиниці, підхід, що передбачає в якості модельного матеріалу використання алюмінієвого сплаву марки 1050А (аналог АД-0, ГОСТ 4784-97) для проектування процесу гарячої висадки сталевих поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою допустимо, за умови максимізації тертя.

2.5. Відбір факторів, що впливають на орієнтацію волокон в поковках типу стрижня з напівсферичним фланцем

При побудові математичної моделі потрібно кількісна формулювання мети побудова даної моделі [82-86]. Кількісно певну характеристику мети назвемо досліджуваною змінною, часто її також називають параметром оптимізації [85-82]. Як досліджуваних змінних, як було визначено вище, для оцінки орієнтації волокон до робочої поверхні пуансона вибрали кути β_1 , β_2 и β_{cp} .

Відбір факторів проводили на основі комп'ютерного моделювання процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з алюмінієвого сплаву АД-0. При цьому варіювалися наступні параметри в наступних межах: відносна висаджується довжина ψ від 2,5 до 5,4; кут нахилу деформуючої поверхні пуансона на попередньому штамповочном переході α від -15° (увігнутий пуансон) до $+15^\circ$ (опуклий пуансон); відносна товщина стінки півсфери γ від 0,337 до 0,475; фактор тертя m за моделлю тертя Зібеля від 0.1 до 0.5. В Таблицях, наведених в Додатку, показані лінії Лагранжа, що характеризують зміна орієнтації волокон при варіюванні різних факторів. На Рисунках 2.15

- 2.18, вплив варійованих параметрів на кути β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ орієнтації волокон представлено у вигляді графіків.

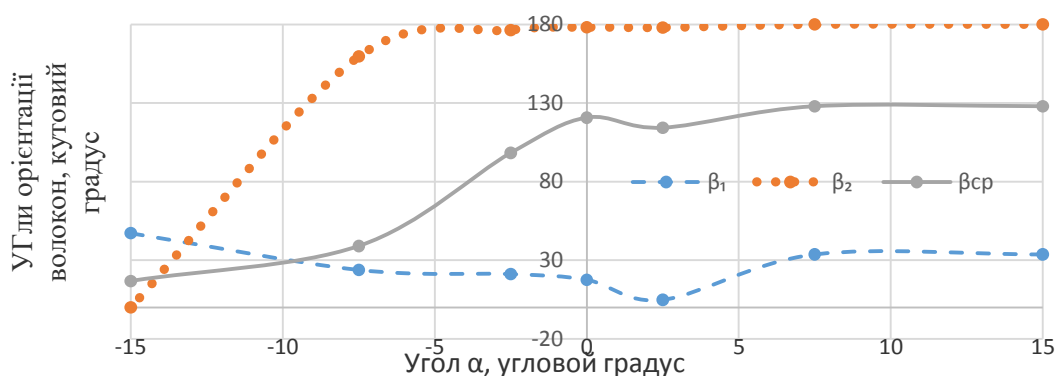


Рисунок 2.15 - залежність кутів β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ орієнтації волокон від кута нахилу α робочої поверхні пуансона в попередньому штамповочном переході при $\Psi = 2.5$, $m=0.3$ і $\gamma=0.337$

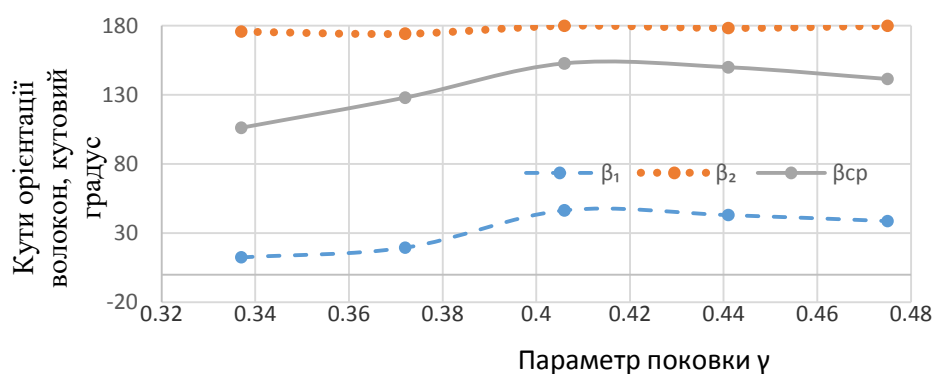


Рисунок 2.16 - Залежність кутів β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ орієнтації волокон від параметра поковки γ при $\alpha_0=2.5^\circ$, $m=0.3$ і $\Psi = 2.5$

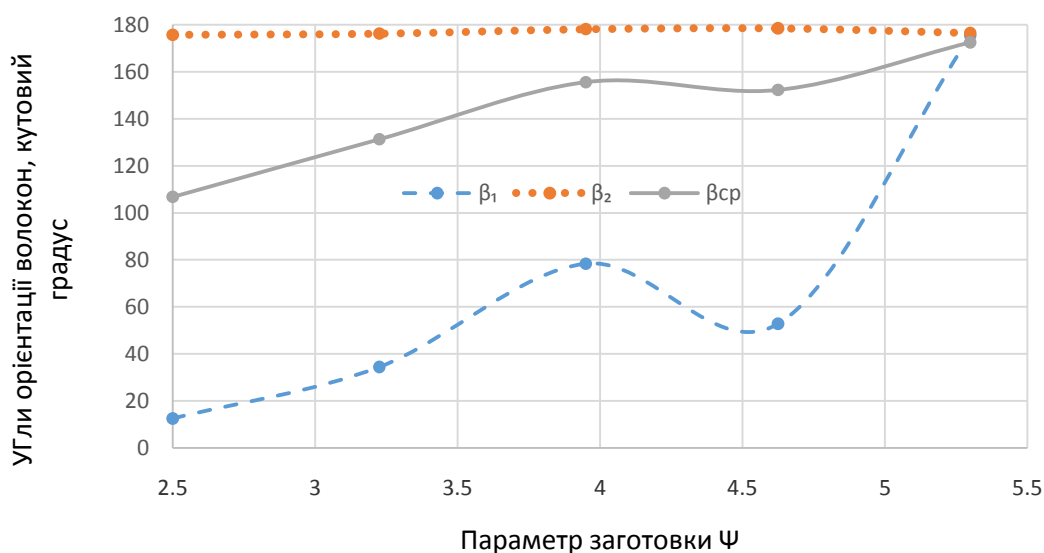


Рисунок 2.17 - Залежність кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ орієнтації волокон від параметра заготовки Ψ при $\alpha=2.5^0$, $m=0.3$ і $\gamma=0.337$

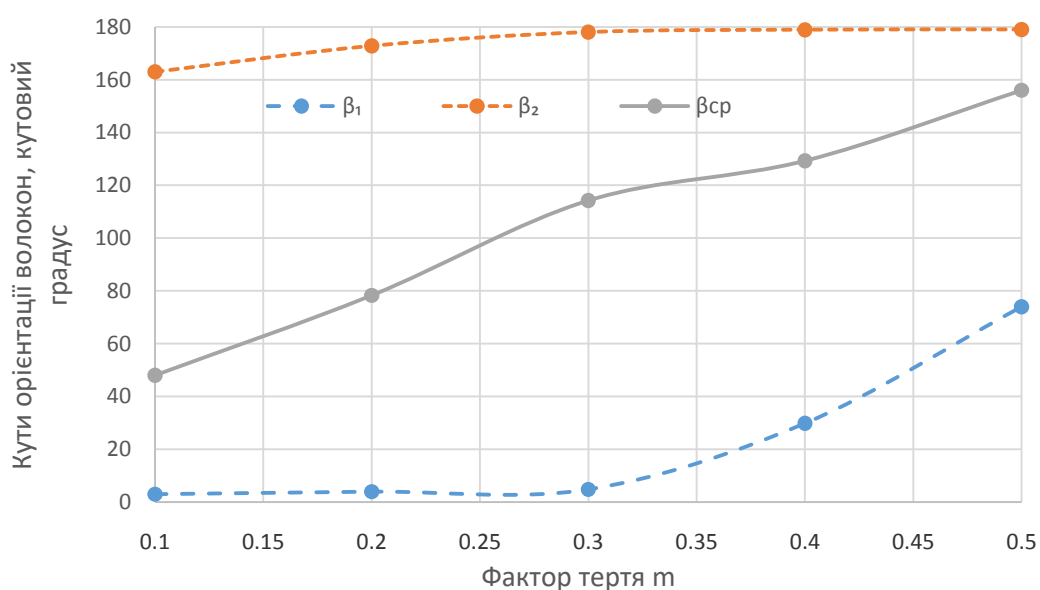


Рисунок 2.18 - Залежність кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ орієнтації волокон від фактора тертя при $\alpha=2.5^0$, $\Psi =2.5$ і $\gamma=0.337$

Комп'ютерне моделювання показало нелінійну залежність кутів орієнтації волокон β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ від таких параметрів заготовки та поковки як відношення довжини висаджується частини заготовки до її діаметру Ψ , від розмірів сферичної частини поковки γ , від кута нахилу α робочої поверхні пуансона на попередньому штамповочном переході і від фактора тертя m . вочевидь,

що в умовах масового і великосерійного виробництва варіювання тертям для забезпечення спрямованого волокнистої будови недоцільно, тому що крім волокнистої будови тертя визначає знос і стійкість інструменту і має бути мінімізовано. У зв'язку з цим в подальшому все дослідження ведуться при постійному факторі тертя m рівному 0.3, характерному для гарячого об'ємного штампування зі сталі з мастилом [87].

Крім того, в ході аналізу впливу перерахованих вище факторів було встановлено, що в разі, коли кут нахилу робочої поверхні пуансона на попередньому штамповочном переході дорівнює $+15^\circ$ існує висока ймовірність неправильного оформлення півсфери і витікання матеріалу на плоску поверхню матриці (Рисунок 2.19), таким чином, при подальшому дослідженні формозміни доцільно цей кут зменшити.

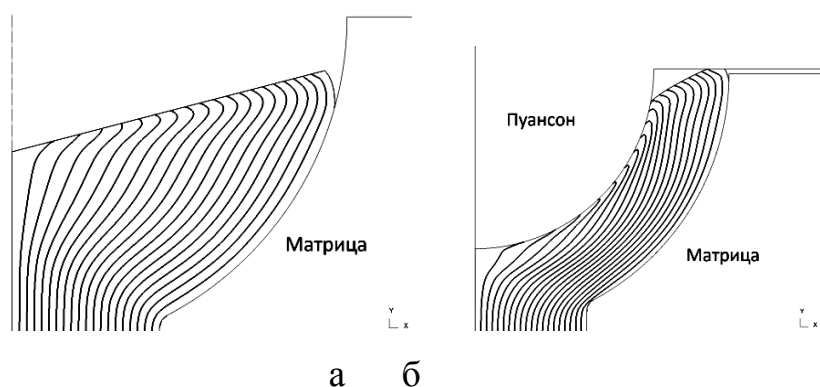


Рисунок 2.1 -. Волокниста будова поковки при $\Psi = 2,5$, $\gamma = 0,337$ і $\alpha + 15^\circ$ а після попереднього штампувального переходу, б - момент торкання торця півсфери площині пуансона

Зазначені параметри технологічного процесу Ψ , γ і α вибрали для отримання рівнянь математичних моделей у вигляді рівнянь регресії для розрахунку кутів β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ орієнтації волокон. Ці рівняння будуть показувати, як виглядає волокнисту будову поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем в залежності від розмірів вихідної заготовки, розмірів півсфери і схеми штампування на попередньому переході.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Для комп'ютерного моделювання процесів висадки на ГКР досліджуваної номенклатури поковок обрана обчислювальне середовище DEFORM-2D / 3D.
2. Створена осесиметрична модель об'єкта дослідження, що включає в себе двовимірну геометричну модель інструменту і заготовки, модель гідравлічного преса з постійною швидкістю руху траверси, реологічну модель модельного матеріалу заготовки (алюмінієвого сплаву 1050А (ПЕКЛЮ0) і стали 45) і модель тертя Зібеля між заготовкою та інструментом.
3. Для оцінки орієнтації волокон в поковках запропоновані три показника: кути β_1 і β_2 між дотичними, проведеними до котра утворює пуансона і волокна в точці виходу волокна до поверхні пуансона, і усереднений показник $\beta_{\text{ср}}$. Розроблено методику визначення показників орієнтації волокон, що включає схему вимірювання кутів орієнтації і оцифровку даних за допомогою оригінальної програми.
4. Розглянуто рекомендовані схеми штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем. Запропоновано нову схему штампування для управління перебігом деформованого металу, яке багато в чому визначає необхідну волокнисту будову поковки. Досліджено вплив форми пуансона на попередньому штамповочном струмку в запропонованій схемі штампування. Встановлено, що кут нахилу деформирующей поверхні пуансона в попередньому штамповочном струмку значно впливає на значення кутів нахилу волокон до поверхні пуансона в чистовому струмку.
5. На основі обчислювального експерименту в середовищі DEFORM-2D показана висока кореляційна залежність між кутами орієнтації волокон поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем із сталі і алюмінію (коефіцієнт кореляції склав 0.82), що дозволяє використовувати алюмінієві заготовки для моделювання процесів гарячої висадки сталевих поковок на ГКР. Встановлено, що найбільший вплив на

розбіжність кутів виходу волокон при гарячій висадки зі сталі та холодної висадки з алюмінію надає наявність швидкісного зміцнення в сталі.

6. На основі обчислювальних експериментів визначено три конструктивно-технологічних фактора впливають на показники орієнтації волокон і інтервали їх варіювання:

- ψ відношення довжини висаджується

заготовки l до діаметру заготовки d ($\psi = 2.5 - 5.4$);

- γ відношення різниці радіусу матриці

R і радіусу пунсона r до діаметру заготовки d ($\gamma = 0.337 - 0.475$);

- α кут нахилу робочої поверхні

пунсона запропонованого набірною струмка ($A = -7.50 \dots + 7.50$).

3. Дослідження процесу висадки поковок типу стрижня з полусферическим фланцем на основі чисельного і фізичного експериментів. Порівняння результатів чисельного і фізичного експериментів

3.1. Комп'ютерне моделювання процесу гарячої висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем на основі факторного експерименту

Для отримання математичних моделей досліджуваних змінних β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$, в залежності від обраних факторів Ψ , α і γ , на різних відносних глибинах $\delta = \Delta / (Rr)$, що враховують шар металу, який буде видалений при подальшій обробці поковки різанням, використовували багатофакторне планування експерименту, суть якого полягає у варіюванні чинників за певним планом. Обрана матриця планування повинна володіти такими властивостями, які дозволяють вважати, що її побудова виконано оптимально, з точки зору одержуваної за результатами реалізації матриці планування математичної моделі [82-86]. При цьому, при побудові математичної моделі у вигляді рівняння регресії, коефіцієнти рівняння повинні бути підібрані таким чином, щоб точність передбачення значень досліджуваної змінної була однаковою в будь-якому напрямку факторного простору. Зазначені вимоги сформульовані як умови ортогональності (Рівняння 3.1) і рототабельності (точність передбачення значень функції відгуку однаковою на рівній відстані від центру і не залежить від напрямку обходу [86]).

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} \cdot x_{u,i} = 0 \quad (3.1)$$

Всім перерахованим вище умовам відповідають матриці плану повного факторного експерименту (ПФЕ), в тому числі ПФЕ 23 (варіювання трьох факторів на двох рівнях) з кількістю дослідів $N = 8$ [82].

Повний факторний експеримент і відповідні розрахунки проводили за методикою, викладеною в роботі [82] шляхом обчислювального експерименту на основі комп'ютерної моделі процесу гарячої висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем. Матеріал заготовки - сталь 45. Змінні чинники були позначені в Таблиці 10.

Таблиця 10.1 -Відповідність між факторами варіювання в натуральному і кодованому масштабі.

Назва фактору	Краткий опис фактору	Позначення в натуральному масштабі	Позначення в кодованому масштабі
Відносна довжина висадки	Відношення довжини висаджуваної частини к діаметру прутка вихідної заготовки (l/d)	Ψ	X_1
Кут нахилу пуансона на попередньому штамповочном переході	від'ємне значення в натуральному масштабі відповідає увігнутому пуансону, позитивне - випуклому.	α	X_2
Відносна товщина стінки півсфери	Відношення товщини стінки півсфери ($R-r$) до діаметру прутка вихідної заготовки.	γ	X_3

Інтервали варіювання прийняті на основі проведеного раніше дослідження впливу обраних факторів на досліджувані змінні (Рис. 2.15-2.18).

Нульовий X_0 , верхній X_v і нижній X_n рівні факторів, а так само інтервали варіювання ΔX представлені в Таблиці 11.

Таблиця 11.1 - Рівні факторів та інтервали варіювання

позначення чинника		нульовий рівень, X_0	Інтервал варіювання, ΔX	Верхній рівень, X_B	Нижній рівень, X_H
У кодованому масштабі	У натурально му масштабі				
X_1	Ψ	3,95	1,45	5,4	2,5
X_2	α	0	7,5	7,5	-7,5
X_3	γ	0,406	0,069	0,475	0,337

Кодовані значення верхнього та нижнього рівня факторів рівні +1 і -1

відповідно і розраховані за формулами:

$$\frac{X_{iB} - X_{i0}}{\Delta X_i} = +1 \quad (3.2)$$

$$\frac{X_{iH} - X_{i0}}{\Delta X_i} = -1 \quad (3.3)$$

Рівняння математичної моделі для визначення кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ шукали у вигляді рівняння регресії з коефіцієнтами b_i , b_{ij} и b_{ijk} :

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (3.4)$$

Значення кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ на відносних глибинах вимірювання кутів виходу волокон $\delta = 0-0.2$ вимірювали згідно з розробленою методикою, викладеної в розділі 2.3.

Матриці планування і робоча матриця, а також результати вимірювань кутів представлені в Таблиці 12. В силу того, що результати двох ідентичних численних експериментів можна вважати ідентичними, як додатковий фактор, що впливає на результат вимірювання, було введено кількість вузлів сітки кінцевих елементів в моделі. Провели два паралельних досвіду ($m = 2$) для більш щільної сітки кінцевих елементів (значення y_{i1}) і для більш розрідженою (значення y_{i2}). Під більш щільною, в

даному випадку, розуміється сітка кінцевих елементів з розміром елемента у вихідній заготовці від 0,5 мм до 1 мм, під більш розрідженій - сітка кінцевих елементів з розміром елемента у вихідній заготовці від 0,65 до 1,3 мм. (Рисунок 3.1).

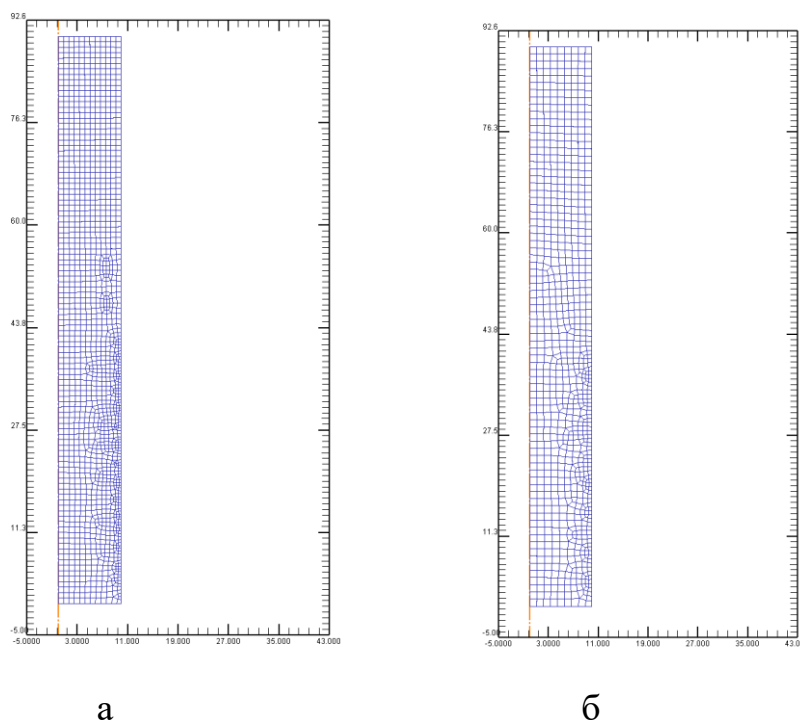


Рисунок 3.1. - Розмір сітки кінцевих елементів а - щільна сітка КЕ б розряджена сітка КЕ -

Таблиці N2 наведені дані за результатами вимірювання кутів β_1 , β_2 і β_{cp} при $\delta = 0$. Дані за результатами вимірювань кутів β_1 , β_2 і β_{cp} при $\delta = 0.05 \dots 0.2$ наведені в Додатку. За допомогою електронних таблиць Excel згідно до методики викладеної в роботі [82] були розраховані коефіцієнти b_i рівнянь регресії

$$b_i = \frac{1}{Nm} \sum_{u=1}^N \sum_{k=1}^m X_{iu} y_{uk}, \quad (3.5)$$

де N - кількість дослідів, m - кількість паралельних дослідів, X_{iu} - кодирование значення факторів, y_{uk} - значення досліджуваних змінних по паралельним дослідом.

За аналогічним залежностям розраховали і коефіцієнти b_{ij} і b_{ijk} .

Таблиця 12.1 - Матриця планування, робоча матриця і результати вимірювання кутів β_1 , β_2 і β_{cp} при $\delta=0$

№	матриця планування							робоча матриця			β_1 ,кутовий		β_2 , кутовий		β_{cp} , кутовий	
	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	X_1	X_2	X_3	градус		градус		градус	
	Ψ	α	γ					Ψ	α	γ	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}	y_{31}	y_{32}
1	1	1	1	1	1	1	1	5,4	7,5	0,475	161,87	161,55	178,83	178,75	173,9	173,75
2	-1	1	1	-1	-1	1	-1	2,5	7,5	0,475	109,19	109,1	172,61	172,56	149,05	148,97
3	1	-1	1	-1	1	-1	-1	5,4	-7,5	0,475	159,15	158,96	170,23	170,33	161,73	161,53
4	-1	-1	1	1	-1	-1	1	2,5	-7,5	0,475	44,36	44,36	163,83	163,83	90,92	90,92
5	1	1	-1	1	-1	-1	-1	5,4	7,5	0,337	166,51	166,32	179,77	179,67	175,58	175,47
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	2,5	7,5	0,337	129,59	130,01	174,61	174,71	161,95	161,89
7	1	-1	-1	-	-1	1	1	5,4	-7,5	0,337	176,24	176,11	173,31	173,22	175,17	175,02
8	-1	-1	-1	1	1	1	-1	2,5	-7,5	0,337	83,1	83,15	166,66	166,58	119,93	119,78

Результати розрахунків коефіцієнтів b_i , b_{ij} и b_{ijk} рівнянь регресії при різних значеннях відносної глибини вимірювання кутів виходу волокон δ наведені в Таблиці 13.

Таблиця 13.1 -результати розрахунків b_i , b_{ij} и b_{ijk} рівняння регресії для кутів β_1 , β_2 и β_{cp} при різних δ

δ	Кут	Коефіцієнти рівнянь регресії							
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
0	β_1	128,72	37,12	13,04	-10,16	-14,82	4,7	3,82	-0,71
	β_2	172,47	3,04	3,97	-1,1	-0,23	0,12	0,35	0,17
	β_{cp}	150,97	20,55	14,10	-7,13	-10,94	3,34	3,47	-0,53
0.05	β_1	124.0	37.00	10.40	-14.50	-7.00	5.40	0.90	7.00
	β_2	143.0	12.70	-9.25	-30.00	-11.50	10.15	-12.80	-10.6
	β_{cp}	138	22	-3.7	-23.8	-9	10.15	-7	-5.2
0.075	β_1	122.0	34.00	-0.60	-18.40	-12.50	4.60	-6.15	-1.50
	β_2	135.00	1.25	-32.15	-35.00	-2.45	-1.20	-35.80	-1.7
	β_{cp}	132	15.9	-15.9	-26.4	-5.8	3.7	-18.6	-2.05
0.1	β_1	116.21	34.20	-13.09	-19.03	-11.00	1.53	-7.76	-9.90
	β_2	113.0	-0.16	-51.00	-15.00	-1.61	-1.56	-16.41	0.31
	β_{cp}	116	16.6	-31.6	-16.1	-4.95	1.8	-9.5	-4.9
0.15	β_1	116	8.75	-36.20	-19.80	-6.60	19.85	10.45	-12.80
	β_2	55.00	-0.13	-29.35	0.65	0.05	0.05	0.58	-0.08
	β_{cp}	80.80	9.65	-28.90	-3.00	-9.25	3.70	0.35	0.02
0.2	β_1	91.50	8.50	-16.50	-11.15	-6.10	-2.60	4.00	8.00
	β_2	23.00	0.25	0.80	6.25	-0.25	0.15	-3.40	-0.25
	β_{cp}	57.6	4	-8	-3.16	-3.6	-1.56	1.4	4.3

Після обчислення коефіцієнтів рівняння регресії був проведений статистичний аналіз рівняння, який включав три етапи:

1. оцінку помилки досвіду (оцінку дисперсії відтворюваності);
2. оцінку значущості коефіцієнтів b_i , b_{ij} и b_{ijk} ;

3. оцінку адекватності математичної моделі.

Далі представлені результати статистичного аналізу при відносній глибині вимірювання кутів виходу волокон $\delta = 0$. Статистичний аналіз при інших значеннях δ проводили аналогічно.

Помилку досвіду S_0^2 оцінювали по паралельним дослідом. Спочатку розраховували построківі дисперсії S_u^2 і перевіряли їх однорідності. Розрахунок рядкової дисперсій S_u^2 виробляли за формулою [82]:

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{uk} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.6)$$

де y_u – построківі середні значення досліджуваної змінної.

Результати розрахунків по кожній досліджуваній змінній представлені в Таблиці 14.

Однорідність рядкової дисперсій була оцінена за критерієм Кохрена. Розрахункове значення критерію Кохрена G_p визначали за такою формулою [82]:

$$G_p = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (3.7)$$

де $S_{u \max}^2$ – максимальна дисперсія з усіх дисперсій по N рядках матриці планування.

Табличне значення критерію Кохрена G_t знаходили за даними роботи [82] для числа ступенів свободи $f_1 = m-1$ і $f_2 = N$ за умови значущості $q = 5\%$. Відповідно, для умов обчислювального експерименту $f_1 = 1$ і $f_2 = 8$, були отримані значення критерію Кохрена, наведені в Таблиці 15.

Так як $G_p < G_t$, була прийнята гіпотеза про однорідність дисперсій і далі помилка досвіду S_0^2 розраховували за формулою [82]:

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 \quad (3.8)$$

Таблиця 14.1 - Построкові дисперсії S_u^2 при вимірюванні кутів $\beta_1, \beta_2, \beta_{cp}$ при $\delta=0$

№	Досліджувана змінна											
	β_1				β_2				β_{cp}			
	y_{11}	y_{12}	\bar{y}_1	S_u^2	y_{21}	y_{22}	\bar{y}_2	S_u^2	y_{31}	y_{32}	\bar{y}_3	S_u^2
1	161.87	161.55	161.71	0.0512	178.83	178.75	178.79	0.0032	173.9	173.75	173.825	0.01125
2	109.19	109.1	109.145	0.00405	172.61	172.56	172.585	0.00125	149.05	148.97	149.01	0.0032
3	159.15	158.96	159.055	0.01805	170.23	170.33	170.28	0.005	161.73	161.53	161.63	0.02
4	44.36	44.36	44.36	0	163.83	163.83	163.83	0	90.92	90.92	90.92	0
5	166.51	166.32	166.415	0.01805	179.77	179.67	179.72	0.005	175.58	175.47	175.525	0.00605
6	129.59	130.01	129.8	0.0882	174.61	174.71	174.66	0.005	161.95	161.89	161.92	0.0018
7	176.24	176.11	176.175	0.00845	173.31	173.22	173.265	0.00405	175.17	175.02	175.095	0.01125
8	83.1	83.15	83.125	0.00125	166.66	166.58	166.62	0.0032	119.93	119.78	119.855	0.01125

Одиниця вимірювання кутів $\beta_1, \beta_2, \beta_{cp}$ – кутові градуси.

Таблиця 15.1 - Розрахункові і табличні значення критерію Кохрена при $\delta=0$

досліджуван а змінна	Розрах. значення критерію Кохрена, G_p	Табличне значення критерію Кохрена, G_t
β_1	0.4661	0.6798
β_2	0.1873	0.6798
β_{cp}	0.3086	0.6798

Розраховані значення дисперсії помилки досвіду по експериментам для кожної з досліджуваних величин представлені в Таблиці 16.

Таблиця 16.1 - Значення дисперсії помилки досвіду при $\delta=0$

досліджуван а змінна	Розрахункове значення дисперсії помилки, S_0^2
β_1	0.0237
β_2	0.0033
β_{cp}	0.0081

Далі проводили оцінку значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Спочатку розраховували дисперсію $S_{b_i}^2$ коефіцієнтів за формулою [82]:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{N}, \quad (3.9)$$

тобто, виходячи з умови рототабельності, дисперсії всіх коефіцієнтів дорівнюють для кожного з аналізованих рівнянь. Далі було вироблено обчислення розрахункового значення критерію Стюдента для оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Розрахункове значення t_{ip} критерію Стюдента визначали для кожного з коефіцієнтів за формулою [82]:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (3.10)$$

где $S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2}$ – середньоквадратичне значення.

Табличне значення критерію Стьюдента t_T визначали при $f_0 = N(m - 1)$ при $q=5\%$ згідно з даними, наведеними в [82]. При $f_0 = 8(2 - 1) = 8$ и $q=5\%$ табличний критерій Стьюдента дорівнює $t_T = 2,31$. В Таблиці 17 представлені розрахункові значення критерію Стьюдента для коефіцієнтів рівняння регресії по кожній з досліджуваних змінних.

Таблиця 17.1 - Розрахункові значення критерію Стьюдента t_{ip} при $\delta=0$

позначення коефіцієнта	досліджувана змінна		
	β_1	β_2	β_{cp}
b_0	2367,17	8443,93	4744,61
b_1	682,54	149,08	645,71
b_2	239,88	194,37	443,04
b_3	186,76	53,73	223,96
b_{12}	272,55	11,20	343,85
b_{13}	86,42	5,81	104,81
b_{23}	70,17	16,95	109,17
b_{123}	70,17	8,20	16,73

Всі розрахункові значення критерію Стьюдента перевищують табличне значення критерію, тобто, отже, всі фактори визнаються значущими. далі проводили оцінку адекватності рівнянь математичних моделей по кожній з досліджуваних змінних. Аналізували наступні отримані на основі повного факторного обчислювального експерименту рівняння:

$$\beta_1 = 128,7 + 37,12X_1 + 13,0X_2 - 10,16X_3 - 14,82X_1X_2 + 4,70X_1X_3 + 3,82X_2X_3 - 0,7X_1X_2X_3 \quad (3.11)$$

$$\beta_2 = 172,5 + 3,03X_1 + 3,97X_2 - 1,1X_3 - 0,23X_1X_2 + 0,12X_1X_3 + 0,35X_2X_3 + 0,17X_1X_2X_3 \quad (3.12)$$

$$\beta_{cp} = 151 + 20,55X_1 + 14,1X_2 - 7,1X_3 - \quad (3.13)$$

$$10,94X_1X_2+3,34X_1X_3+3,47X_2X_3-0,5X_1X_2X_3$$

Для перевірки адекватності математичних моделей проводили розрахунки досліджуваних змінних за наведеними вище рівняннями, а після розрахунки дисперсії $S_{ад}^2$ адекватності за формулою [82]:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \widetilde{Y}_u)^2, \quad (3.14)$$

де l число членів рівняння регресії, що залишилися після оцінки значущості коефіцієнтів, y_u – розраховане за рівнянням регресії значення досліджуваної змінної.

У Таблиці 18 наведені построківі експериментальні і розрахункові значення досліджуваних змінних, а в Таблиці 19 значення дисперсії адекватності $S_{ад}^2$.

За розрахованими значеннями дисперсій адекватності (Таблиця 19) і дисперсії помилки досвіду (Таблиця 16) визначили розрахунковий критерій Фішера F_p [82]:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_0^2} \quad (3.15)$$

Для перевірки адекватності математичних моделей порівнюють розраховане значення критерію Фішера F_p и його табличне значення F_T . Значення $F_T = 3.44$ визначали по $f_{ад} = N - l$ и $f_0 = N(m - 1)$ при $q=5\%$ по таблиці, наведеної в роботі[82].

Розрахункові значення критерію Фішера для досліджуваних змінних наведені в Таблиці 20.

Таблиця 18.1 - Розраховані і експериментальні значення кутів β_1 , β_2 , β_{cp} при $\delta=0$

№	Досліджувана змінна								
	β_1			β_2			β_{cp}		
	обчислювальний експеримент	Модель (Рівняння 3.11)	$(\bar{y}_1 - \widetilde{y}_1)^2$	обчислювальний експеримент	Модель (Рівняння 3.12)	$(\bar{y}_2 - \widetilde{y}_2)^2$	обчислювальний експеримент	Модель (Рівняння 3.13)	$(\bar{y}_3 - \widetilde{y}_3)^2$
	\bar{y}_1	\widetilde{y}_1		\bar{y}_2	\widetilde{y}_2		\bar{y}_3	\widetilde{y}_3	
1	161.71	161.66	0.0025	178.79	178.81	0.0004	173.825	173.92	0.009025
2	109.145	109.06	0.007225	172.585	172.63	0.002025	149.01	149.02	1E-04
3	159.055	159.06	2.5E-05	170.28	170.29	0.0001	161.63	161.66	0.0009
4	44.36	44.38	0.0004	163.83	163.87	0.0016	90.92	91.00	0.0064
5	166.415	166.34	0.005625	179.72	179.73	0.0001	175.525	175.50	0.000625
6	129.8	129.74	0.0036	174.66	174.71	0.0025	161.92	161.96	0.0016
7	176.175	176.22	0.002025	173.265	173.29	0.000625	175.095	175.12	0.000625
8	83.125	83.14	0.000225	166.62	166.67	0.0025	119.855	119.82	0.001225

Таблиця 19.1 -Значення дисперсії адекватності $S_{ад}^2$ для рівнянь регресії досліджуваних змінних при $\delta=0$

досліджуван а змінна	$S_{ад}^2$
β_1	0.007208
β_2	0.003283
$\beta_{ср}$	0.006833

Таблиця 20.1 -Розрахункові значення критерію Фішера F_p для рівнянь регресії досліджуваних

досліджуван а змінна	змінних при $\delta=0$ F_p
β_1	0.305
β_2	0.984
$\beta_{ср}$	0.844

Всі розраховані значення критерію Фішера менше табличного $F_p < F_T$, следовательно, рівняння математичної моделі визнаються адекватними, тобто розсіювання експериментальних даних досліджуваних змінних щодо рівняння регресії того ж порядку, що і розсіювання, викликане випадковими змінами в об'єкті дослідження (помилки досвіду).

В результаті перетворення з кодованого в натуральний масштаб, рівняння математичних моделей в кодованих змінних набувають вигляду рівнянь з параметрами заготовки і штампувального інструменту у вигляді:

$$\beta_1 = b_0 + b_1\Psi + b_2\alpha + b_3\gamma + b_{12}\Psi\alpha + b_{13}\Psi\gamma + b_{23}\alpha\gamma + b_{123}\Psi\alpha\gamma \quad (3.16)$$

$$\beta_2 = b_0 + b_1\Psi + b_2\alpha + b_3\gamma + b_{12}\Psi\alpha + b_{13}\Psi\gamma + b_{23}\alpha\gamma + b_{123}\Psi\alpha\gamma \quad (3.17)$$

$$\beta_{ср} = b_0 + b_1\Psi + b_2\alpha + b_3\gamma + b_{12}\Psi\alpha + b_{13}\Psi\gamma + b_{23}\alpha\gamma + b_{123}\Psi\alpha\gamma \quad (3.18)$$

За результатами статистичного аналізу даних Таблиці 18, при нульовому значенні відносної величини припуску на механічну обробку δ , і даних з Додатка, при ненульових значеннях δ , була

сформована Таблиця 21, в якій наведено коефіцієнти Рівнянь (3.16)–(3.18).

Таблиця 21.1 -результати розрахунків b_i , b_{ij} и b_{ijk} рівняння регресії для кутів β_1 , β_2 и β_{cp} при різних δ в натуральному масштабі

δ	Кут	Коефіцієнти рівнянь регресії							
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
0	β_1	162.67	6.53	2.59	-332.57	-0.98	47	11.05	0.93
	β_2	172.65	1.6	0.68	-20.68	-0.11	1.2	-0.16	0.23
	β_{cp}	190.29	0.62	2.06	-234.68	-0.73	33.4	9.28	-0.67
0.05	β_1	195	3.6	18.2	-423	-4.4	54	-35	9.3
	β_2	447	-32	-9.7	-835	4.7	101	31	-14
	β_{cp}	381	-26	-2.85	-746	2	101	13.8	-6.9
0.075	β_1	211	4.8	6	-448	-0.34	46	-4	-2
	β_2	318	5.75	21	-460	0.7	-12	-60	-2.25
	β_{cp}	303	-4	10.2	-529	0.57	37	-25.15	-2.7
0.1	β_1	159.5	17.4	-12.8	-336	4.3	15.3	37	-13.2
	β_2	177	6.2	7.3	-156	-0.31	-15.6	-33.3	0.41
	β_{cp}	194	4.14	-5.43	-304	2.2	18	7.4	-6.5
0.15	β_1	527	-74.5	-38	-1070	6.32	198.4	87.6	-17
	β_2	52.3	-0.29	-4.56	7.45	0.005	0.5	1.54	-0.1
	β_{cp}	131	-8.35	-0.72	-189	-0.86	37	0.57	0.027
0.2	β_1	92	16.4	14	-59	-4.9	-26	-34	10.6
	β_2	-12	-0.44	2.3	84.6	0.11	1.5	-5.25	-0.33
	β_{cp}	40.3	9	8.33	15.8	-2.66	-15.6	-20	5.7

3.2. Розрахунок енергосилових параметрів при висадці

Крім картини волокнистої будови для різних типорозмірів поволок типу стрижня з напівсферичним фланцем важливим показником, характеризуючим процес штампування на ГКР, є необхідна сила деформування, що характеризує

можливість здійснення даної технологічної операції на наявному технологічному обладнанні.

Далі представлена методика розрахунку необхідної сили висадки поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем на ГКР.

3.2.1. Визначення енергосилових параметрів за допомогою методу верхньої оцінки

Аналіз енергосилових параметрів при висадці на ГКР поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем виконаний за допомогою методу верхньої оцінки. Даний метод є інженерним методом визначення таких характеристик як сила деформування, робота і потужність пластичної деформації з урахуванням кінематики частинок заготовки при висадці [45–47,92–99].

Метод верхньої оцінки розроблений з умови, що потужність зовнішніх сил W або енергія, яку вносить інструментом в деформується заготовку, витрачається на подолання внутрішніх сил W_i , що визначаються опором пластичної деформації частинок заготовки, і силами тертя на контактній поверхні інструменту $W_{тр}$:

$$W = W_i + W_{тр} \quad (3.19)$$

При поступальному русі інструменту зі швидкістю v_{01} і силою деформування P потужність зовнішніх сил W визначається наступним чином:

$$W = P \cdot v_{01} \quad (3.20)$$

Потужності внутрішніх сил і сил контактного тертя можуть бути обумовлені полем швидкостей в осередку деформації і в загальному випадку визначаються за наступними рівняннями:

$$W_i = \int \tau_e \cdot \dot{\varepsilon}_e dV + \int \tau_s \cdot v_{i,j} df_{i,j} \quad (3.21)$$

$$W_{тр} = \int \tau_{i,k} \cdot v_{i,k} df_{i,k}, \quad (3.22)$$

де τ_e – інтенсивності дотичних напружень, ε_e – інтенсивність швидкості деформації зсуву, $v_{i,j}$ – швидкість відносного переміщення на

поверхнях розриву швидкості $f_{i,j}$ всередині заготовки, $v_{i,k}$ – швидкість відносного переміщення на поверхнях $f_{i,k}$ контакту інструменту і заготовки, τ_s – дотичні напруження на поверхнях розриву швидкостей $f_{i,j}$, $\tau_{i,k}$ – дотичні напруження на поверхнях $f_{i,k}$.

Для ідеально жёсткопластического матеріалу заготовки без зміцнення можна прийняти[93]:

$$\tau_e = \tau_s = 0,5 \sigma_s = \text{const} \quad (3.23)$$

Контактні дотичні напруження на поверхні штампа $\tau_{i,k}$ можна визначити через коефіцієнт пластичного тертя по напрузі плинності $\mu_{i,k}$, який змінюється в межах 0 до 0,5 [93]:

$$\tau_{i,k} = \mu_{i,k} \sigma_s \quad (3.24)$$

Переходячи до безрозмірного параметру $\frac{q}{\sigma_s}$, де

$$q = P/f_u, \quad (3.25)$$

де f_u – площа контактної поверхні інструменту с заготівлею, отримаємо наступне рівняння:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2f_u v_{01}} \left(\int \dot{\epsilon}_e dV + \int v_{i,j} df_{i,j} + \int 2\mu_{i,k} v_{i,k} df_{i,k} \right) \quad (3.26)$$

Для полів швидкостей з жорстких блоків, як прийнято в методі верхньої оцінки, за умови, що деформацію здійснюють за рахунок зрушень між блоками, які мають однорідне поле швидкостей, наведене вище Рівняння (3.26) спрощується. Так як на будь-якій поверхні зрушень $f_{i,j}$ різницю дотичних складових швидкості $v_{i,j}$ по всіх поверхнях $f_{i,j}$ має постійне значення, перший інтеграл скорочується, а два інших може бути замінені на суми. Тоді після перетворень маємо:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2f_u v_{01}} \left(\sum_{i,j} v_{i,j} f_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} v_{i,k} f_{i,k} \right) \quad (3.27)$$

Підсумовування в правій частині рівняння має бути здійснене по всіх поверхнях розриву швидкості. У випадку плоскої деформації, коли довжина заготовки L більш ніж в 5 разів більше її ширини b , протягом металу

відбувається тільки поперек осі заготовки і довжина заготовки не змінюється.

В цьому випадку площі поверхонь визначають як:

$$f_u = bL, \quad (3.28)$$

$$f_{i,j} = l_{i,j}L, \quad (3.29)$$

$$f_{i,k} = l_{i,k}L, \quad (3.30)$$

де $l_{i,j}$, $l_{i,k}$ – довжина кордонів або ліній розриву швидкості між суміжними блоками або між ділянками контактної поверхні і заготівлею в площині деформації.

В результаті, Рівняння (3.27) набирає вигляду:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2bv_{01}} \left(\sum_{i,j} l_{i,j} v_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} l_{i,k} v_{i,k} \right) \quad (3.31)$$

Незважаючи на те, що штампування поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем є осесиметричним завданням, метод верхньої оцінки застосуємо і для оцінки сили деформування з використанням низки рекомендацій, представлених в роботі Томлєнова А.Д. [93]. У даній роботі силу деформування в поковках типу стрижня з напівсферичним фланцем розраховували методом верхньої оцінки, прийнявши допущення про те, що метал в осередку пластичної деформації тече аналогічним чином, як він тік би в плоскому деформованому стані. Вочевидь, що даний підхід можна застосовувати лише для приблизної оцінки сили деформування і дає кілька завищене значення сили деформування.

З метою спрощення подальшої роботи з Рівнянням (3.31) вираз в дужках позначаємо через A_v :

$$A_v = \sum_{i,j} l_{i,j} v_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} l_{i,k} v_{i,k} \quad (3.32)$$

Повна сила висадки, з урахуванням Рівнянь (3.19), (3.31) і (3.32), з урахуванням симетрії по осі поковки, визначаємо як:

$$P = 2R_{\pi} L q = (\sigma_s / 2v_{01}) A_v L, \quad (3.33)$$

де R_n – радіус пуансона, L – умовна довжина поковки, що розраховується з умови рівності обсягу висаджуваної частини поковки $V_{\text{выс}}$ і обсягу умовної заготовки $V_{\text{усл}}$ для плоскої деформації:

$$V_{\text{усл}} = S_{\text{сф}} L, \quad (3.34)$$

де $S_{\text{сф}}$ – площа всього перерізу півсфери поковки без стрижневої частини.

Таким чином величину L визначаємо як:

$$L = V_{\text{выс}} / S_{\text{сф}} \quad (3.35)$$

Аналіз перебігу металу при висадці на ГКР досліджуваних поковок показав, що в попередніх набраних струмках йде процес опади заготовки, а в чистовому струмку відбувається назад видавлювання. У міру заповнення металом простору між пуансоном і матрицею зростає сила на пуансоні.

На рисунку 3.2 представлена схема дискретизації миттєвого осередку пластичної деформації (розглядається права половина поковки) для остаточної стадії висадки поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем за допомогою трикутних жорстких блоків. Кількість блоків показано рівне восьми для зручності визначення формул розрахунку координат кожної з вершин трикутників. У розрахунках за розробленими в середовищі SMathStudio [100] програмам був випробуваний варіант з числом блоків рівним 16, але до значної зміни значення коефіцієнта A_V це не привело.

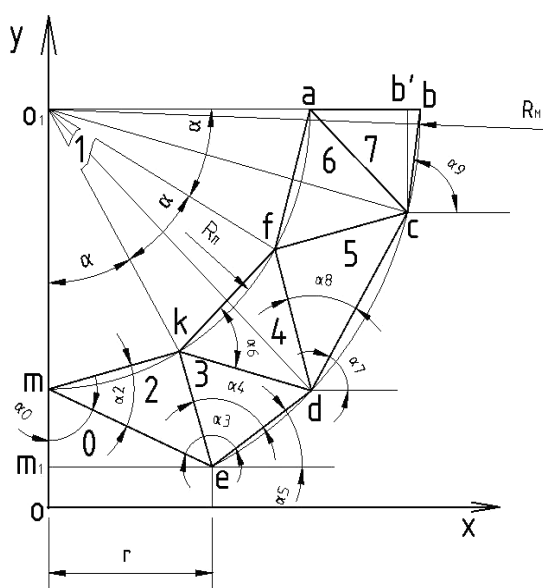


Рисунок 3.2 - Схема дискретизації осередку деформації при висадці

На рисунку 3.3 представлений годограф швидкостей для розглянутого осередку деформації.

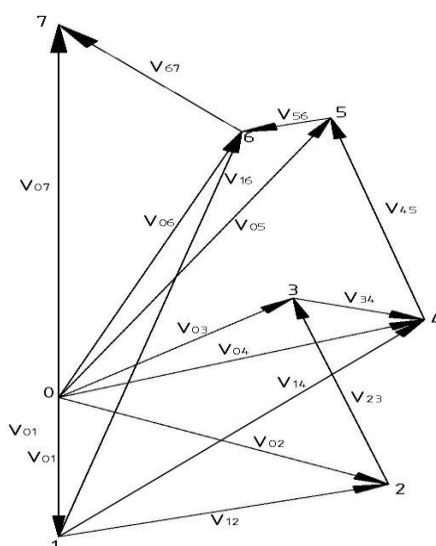


Рисунок 3.3 - Годограф швидкостей кінцевої стадії штампування типу стрижня 3

полусферическим фланцем

Абсолютна швидкість блоку 1 (пуансон) дорівнює швидкості пуансона V_{01} . Метод верхньої оцінки передбачає поділ швидкостей на дві групи: абсолютні швидкості блоків V_{0i} і відносні швидкості (розриви швидкостей) між суміжними блоками V_{ij} (методом 2, 4).

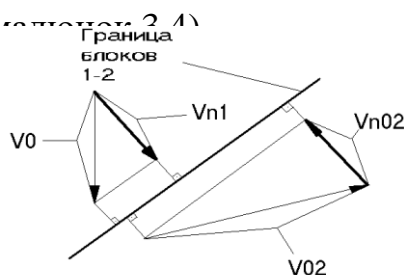


Рисунок 3.4 - Схема швидкостей на контактній поверхні блоків

Перш за все, з годографа швидкостей, на основі подібності трикутників, знаходять розриви швидкостей на кордонах суміжних блоків. Потім знаходять абсолютні швидкості блоків. Необхідно так само відзначити, що з урахуванням умови несжимаемости нормальні компоненти швидкостей на кордонах суміжних блоків рівні по модулю і напрямку. В іншому випадку блоки "врізалися б або відставали один від одного", що суперечило б умові несжимаемости в швидкостях. Для спрощення розрахунку значень меж блоків і

швидкостей визначені координати вершин трикутників (Таблиця 22).

Значення довжин відрізків $l_{i,j}$ і $l_{i,k}$ розраховували за відомою формулою:

$$l = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (3.36)$$

Таблиця 22.1 - Координати точок блоків осередку деформації

Позначення точок	Формула для розрах. координати X_i	Формула для розрах. координати Y_i
m	$X_m = 0$	$Y_m = R_M - R_{\Pi}$
k	$X_k = R_{\Pi} \sin(\alpha)$	$Y_k = R_M - R_{\Pi} \cos(\alpha)$
f	$X_f = R_{\Pi} \sin(2\alpha)$	$Y_f = R_M - R_{\Pi} \cos(2\alpha)$
a	$X_a = R_{\Pi}$	$Y_a = R_M$
m_2	$X_{m_2} = 0$	$Y_{m_2} = 0$
m_1	$X_{m_1} = 0$	$Y_{m_1} = R_M - (\sqrt{R_M^2 - R_{3a}^2})$
e	$X_e = R_{3a}$	$Y_e = Y_{m_1}$
d	$X_d = R_M \sin(90 - 3\alpha/2)$	$Y_d = R_M - R_M \cos(90 - 3\alpha/2)$
c	$X_c = R_M \sin(90 - 5\alpha/2)$	$Y_c = R_M - R_M \cos(90 - 5\alpha/2)$
b	$X = R_M$	$Y_b = R_M$
b	$X_b = R_{\Pi} + h_3$	$Y_{b1} = R_M$

У разі, якщо відомі напрямки абсолютних швидкостей суміжних блоків, для визначення розривів швидкостей $V_{i,j}$ можна обійтися без побудови годографа швидкостей. В цьому випадку неважко з умови рівності нормальних швидкостей суміжних блоків V_n визначити тангенціальні швидкості і розриви швидкостей $V_{i,j}$. Саме такий підхід застосовувався в даному рішенні за допомогою розроблених програм розрахунку сили висадки для поковок з різними геометричними параметрами. При цьому, швидкість пуансона $V=100$ мм/с, $\sigma_s = 140$ МПа для сталі в гарячому стані і $\sigma_s = 120$ МПа для алюмінію при кімнатній температурі, коефіцієнт тертя по напрузі плинності $\mu=0,35$ (напруга контактного тертя $\tau_{к.тр.} \approx 24$ МПа

для сталі та $\tau_{к.тр.} \approx 21$ МПа для алюмінію). Для досліджуваних представників поковок типу стрижень з напівсферичним фланцем отримані значення параметра A_V , представлені в Таблиці 23. Досліджувані типи поковок характеризуються обраними раніше параметрами Ψ і γ .

Таблиця 23.1 - значення коефіцієнта A_V для різних типорозмірів поковок

№	d, мм	Rп, мм	Rм, мм	Ψ	γ	A_V
1	20	11,46	20,95	2,5	0,475	6.87×10^3
2	20	16,00	22,75	2,5	0,337	9.36×10^3
3	20	19,00	28,50	5,4	0,475	1.03×10^4
4	20	25,00	31,73	5,4	0,337	1.334×10^4

Необхідно відзначити, що значення параметра A_V , наведені в Таблиці 23 дійсні тільки за умови, що діаметр вихідної заготовки $d = 20$ мм. При цьому з Таблиці 22 очевидно, що значення параметра A_V має пряму залежність від діаметра вихідної заготовки, а так само від радіуса внутрішньої і зовнішньої півсфери. У зв'язку з цим, для спрощення використання викладеної вище методики доцільно ввести величину номінального параметра A_V , яку позначимо як $A_{Vном}$, і значення якого дорівнює значенню A_V за умови, що діаметр заготовки $d=d_{ном}=2$ мм. Вцьому випадку Рівняння (3.33) може бути записано в наступному вигляді:

$$P = (\sigma_s / 2v_{01})(d/d_{ном})A_{Vном} L, \quad (3.37)$$

Необхідно пояснити, що $d = 2$ мм вводиться як номінальне значення, ніяк не пов'язане з можливими реальними діаметрами вихідного прутка, а служить винятково коефіцієнтом рівняння для розрахунку сили деформування.

Для досліджуваних представників поковок типу стрижень з напівсферичним фланцем значення параметра $A_{V_{НОМ}}$, представлені в Таблиці 24.

Таблиця 24.1 - значення коефіцієнта $A_{V_{НОМ}}$ для різних типорозмірів поковок

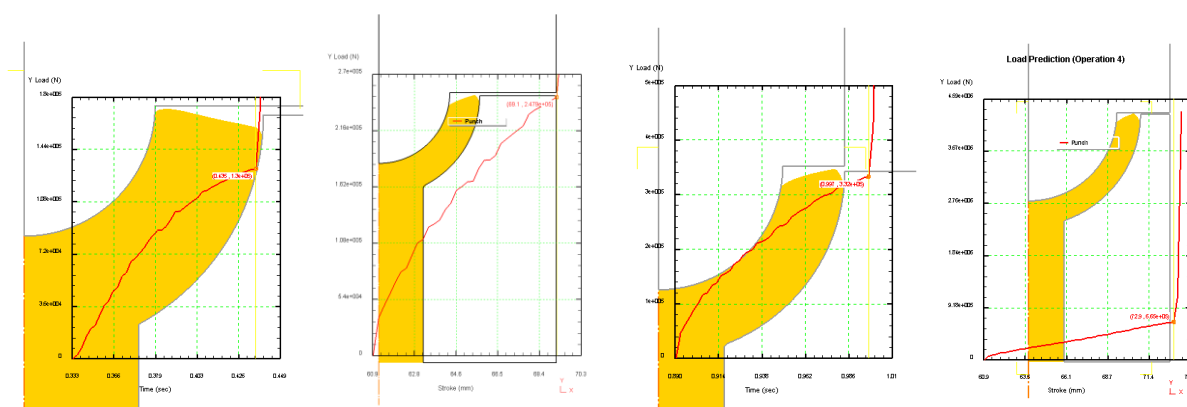
№	$d_{НОМ}$, мм	Ψ	γ	$A_{V_{НОМ}}$
1	2	2,5	0,475	6.87×10^2
2	2	2,5	0,337	9.36×10^2
3	2	5,4	0,475	1.03×10^3
4	2	5,4	0,337	1.334×10^3

Результати розрахунку сили деформування для сталі в гарячому стані і для алюмінію при кімнатній температурі, за розмірами відповідно до Таблиці 23, отримані за допомогою методу верхньої оцінки будуть представлені в Таблицях 25 та 26 в розділі 3.2.5.

Необхідно відзначити, що розрахунки за вищеописаною методикою не дозволяють врахувати стадію остаточного заповнення порожнини штампа, на якій сила деформування, в разі висадки в закритому штампі, різко зростає. Тобто результати розрахунку за допомогою методу верхньої оцінки в разі закритої штампування дійсні тільки до моменту торкання заготівлею плоского торця пуансона. Для того, що б робити оцінку сили деформування на стадії остаточного заповнення порожнини закритого штампа, в Рівняння (3.33) і (3.37) необхідно вводити додатковий поправочний коефіцієнт $k = 2-4$. Цей коефіцієнт може, також враховувати зростання сили за рахунок стиснення поверхонь верхнього і нижнього штампів.

3.2.2. Визначення енергосилових параметрів за допомогою методу скінченних елементів

Паралельно, визначення необхідної сили деформування при висадці поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем проводили за допомогою методу скінченних елементів стандартними засобами програмного комплексу Deform. На рисунку 3.5 представлені графіки сил деформування, відповідно до геометричних розмірів, представленими в Таблиці 23, отримані в Deform.



а б в г

Рисунок 3.5 - Графіки сил деформування сталевій заготовці за результатами розрахунків за допомогою МСЕ за розмірами відповідно до Таблиці 23: а – 1, б – 2, в – 3, г – 4

Далі, результати розрахунку сили деформування за допомогою методу скінченних елементів, при $\sigma_s = 140$ МПа для сталі і $\sigma_s = 120$ МПа для алюмінію, а також $\sigma_s = f(\epsilon\sqrt{\epsilon}, \epsilon)$, фактори трення $m = 0.3$, за розмірами відповідно до Таблиці 23, будуть представлені в Таблицях 25 та 26 в розділі 3.2.5. Необхідно відзначити, що метод кінцевих елементів дозволяє врахувати стадію остаточного заповнення порожнини штампа, тому в Таблицях 25 та Таблиця 26 наведені як результати розрахунку сили деформування на остаточній стадії штампування, так і результати розрахунку сили деформування до моменту торкання заготівлею плоского торця пуансона.

3.2.3. Аналітичне визначення енергосилових параметрів (варіант №1)

В роботі Семенова Є.І., Овчинникова О.Г і Дмитрієва А.М. [55] представлена методика розрахунку сили деформування при впровадженні в заготовку сферичного пуансона. Розрахункова схема процесу наведена на рисунку 3.6.

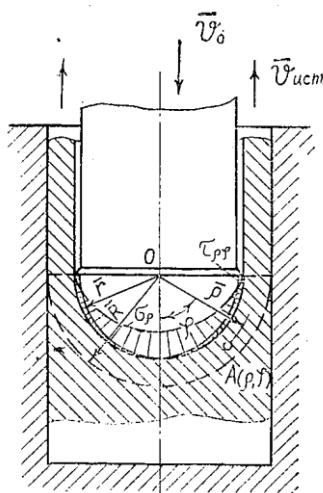


Рисунок 3.6 - Схема для розрахунку сили при впровадженні сферичного пуансона в заготовку

На розрахунковій схемі видно, що автори роботи [55] використовували сферичну систему координат для визначення тензора напружень, що дозволило скоротити кількість невідомих у вихідних рівняннях рівноваги. Необхідно відзначити, що вогнище деформації прийнятий обмеженим пунктирною лінією, а метал, що знаходиться за пунктирною лінією, є абсолютно жорстким. Авторами були аналітично отримані рівняння для розрахунку нормальних напружень σ_ρ , σ_θ і σ_φ і дотичних напружень $\tau_{\rho\varphi}$:

$$\sigma_\rho = -\frac{2(1+5\cos^2\varphi)\cos\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{(3\cos^2\varphi+\sin^2\varphi)^3}} \ln\rho - \frac{2\cos\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3\cos^2\varphi+\sin^2\varphi}} \quad (3.38)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\varphi = -\frac{2(1+5\cos^2\varphi)\cos\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{(3\cos^2\varphi+\sin^2\varphi)^3}} \ln\rho + \frac{\cos\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3\cos^2\varphi+\sin^2\varphi}} \quad (3.39)$$

$$\tau_{\rho\varphi} = -\frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3\cos^2\varphi+\sin^2\varphi}} \quad (3.40)$$

Силу деформування, відповідно до даної методики, розраховували як:

$$P = \pi r_{\Pi}^2 \sigma_s q = \pi r_{\Pi}^2 \sigma_s 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (-\sigma_\rho \sin\varphi \cos\varphi + \tau_{\rho\varphi} \sin^2\varphi) d\varphi, \quad (3.41)$$

де r_n – внутрішній радіус півсфери, q – питома сила деформування.

Інтегрування Рівняння 3.41 проводили вбудованими засобами програмного забезпечення SMathStudio.

Розрахунки за вищеописаною методикою, як і в разі методики викладеної в розділі 3.2.1, не дозволяють врахувати стадію остаточного заповнення порожнини штампа, тобто для визначення сили деформування на остаточній стадії Рівняння 3.41 вимагає використання поправочного коефіцієнта k . Результати розрахунку сили деформування при $\sigma_s = 140$ МПа для сталі в гарячому стані і $\sigma_s = 120$ МПа для алюмінію при кімнатній температурі, за розмірами відповідно до Таблиці 23, отримані за допомогою інтегрування Рівняння 3.41 далі будуть представлені в Таблицях 25 та 26 в розділі 3.2.5.

3.2.4. Аналітичне визначення енергосилових параметрів (варіант №2)

В роботі Воронцова А.Л. [56] представлена методика розрахунку сили деформування операції видавлювання пуансоном з напівсферичним торцем в матриці, що має сферичне дно. Дану методику використовували для визначення питомої сили, що діє на напівсферичну поверхню пуансона. Розрахункова схема операції наведена на рисунку 3.7.

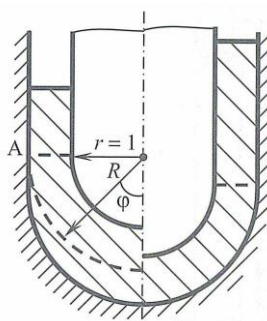


Рисунок 3.7 - Схема для розрахунку сили при впровадженні сферичного пуансона в заготовку

Як і в роботі [55], автором роботи [56] використовувалася сферична система координат і відносні значення радіусів зовнішньої і внутрішньої півсфери. Параметри напруженого стану визначали за такими залежностями:

$$\sigma_{\varphi} = 1 + 2 \ln \rho + \frac{2C_{\rho} + C_1}{\rho^2} \cos \varphi + C_2 \quad (3.42)$$

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\varphi} + 1 \quad (3.43)$$

$$\tau_{\rho\varphi} = \frac{C_{\rho} + C_1}{\rho^2} \sin \varphi, \quad (3.44)$$

де $r \leq \rho \leq R$.

Для визначення довільних постійних C і C_1 використовували граничні умови:

$$\tau_{\rho\varphi} = 2\mu/\sqrt{3} \text{ при } \rho = 1 \text{ и } \varphi = \pi/2 \quad (3.45)$$

$$\tau_{\rho\varphi} = -2\mu/\sqrt{3} \text{ при } \rho = R \text{ и } \varphi = \pi/2 \quad (3.46)$$

Підставивши граничні умови 3.45 і 3.46 в вираз 3.44 отримали вираз для постійних C і C_1 :

$$C = -\frac{2\mu(R^2 + 1)}{\sqrt{3}(R - 1)} \quad (3.47)$$

$$C_1 = \frac{2\mu(R^2 + R)}{\sqrt{3}(R - 1)} \quad (3.48)$$

Для визначення довільної сталої C_2 використовували граничну умову:

$$\sigma_{\varphi} = 0 \text{ при } \rho = (R + 1)/2 \text{ и } \varphi = \pi/2 \quad (3.49)$$

Підставивши гранична умова 3.49 в вираз 3.42 отримали вираз для постійної C_2 :

$$C_2 = -1 - 2 \ln \frac{R+1}{2} \quad (3.50)$$

За допомогою системи Рівнянь 3.42 - 3.44 при $\rho = 1$, з урахуванням виразів для довільних постійних 3.47, 3.48 і 3.50, аналогічно 3.41, визначили питому силу деформування:

$$\begin{aligned} q_1 &= \int_0^{\pi/2} |\sigma_{\rho} \sin 2\varphi + 2|\tau_{\rho\varphi} \sin^2 \varphi| d\varphi = \\ &= 1 + 2 \ln \frac{R + 1}{2} + 0,77 \frac{\mu(R^2 + R)}{(R - 1)} \end{aligned} \quad (3.51)$$

Для визначення питомої сили, що діє на плоску поверхню пуансона на стадії остаточно заповнення порожнини штампа, використовували представлену в роботі [56], методику розрахунку сили деформування

операції закритою калібрування. Розрахункова схема операції наведена на рисунку 3.8.

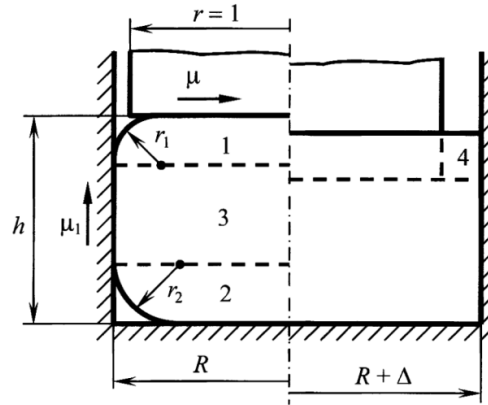


Рисунок 3.8 - Схема для розрахунку сили при закритій калібрування

Область 1 є осередком пластичної деформації з вільним радіальним плином, області 3 і 2 можуть бути прийняті не деформуються.

На схемі видно, що відносний радіус матриці R може бути більше відносного радіуса пуансона r для обліку конструктивного зазору. У даній роботі прийнято допущення про повну відсутність конструктивного зазору, тобто $R = r = 1$. Висота області 1 визначається радіусом r_1 . Було прийнято допущення про те, що величина радіуса r_1 визначається як:

$$r_1 = (R_M - r_{\Pi}) / 4r_{\Pi}, \quad (3.52)$$

де r_{Π} – абсолютне значення внутрішнього радіусу півсфери поковки, R_M – абсолютне значення зовнішнього радіусу півсфери поковки.

З огляду на граничне тертя на кордоні областей 1 і 3 в роботі [56] отримано вираз для визначення питомої сили при закритому калібруванні:

$$q_2 = 1 + \frac{(\mu + 0,5)R}{4r_1}, \quad (3.53)$$

яке, з урахуванням 3.52, можна записати як:

$$q_2 = 1 + \frac{(\mu + 0,5)R}{4 \left(\frac{R_M - r_{\Pi}}{5r_{\Pi}} \right)} \quad (3.54)$$

Таким чином, силу деформування, відповідно до даної методики, з урахуванням 3.51 і 3.54 і того, що на стадії вільного перебігу металу по поверхні пуансона питома сила q_1 діє тільки на сферичну

поверхню пуансона, а на стадії остаточного заповнення порожнини штампа питома сила q_2 діє як на плоску (кільцеву), так і на сферичну поверхні пуансона, розраховували як:

$$P = \pi r_{\text{п}}^2 \sigma_s q_1 \delta_1 + \pi R_{\text{ш}}^2 q_2 \delta_2, \quad (3.55)$$

де $\delta_1 = 0$, а $\delta_2 = 1$ якщо розраховували силу деформування з урахуванням стадії остаточного заповнення порожнини штампа; $\delta_1 = 1$, а $\delta_2 = 0$ якщо розраховували силу деформування без урахування стадії остаточного заповнення порожнини штампа.

Результати розрахунку сили деформування при $\sigma_s = 140$ МПа для стали в гарячому стані і $\sigma_s = 120$ МПа для алюмінію при кімнатній температурі, $\mu = 0,2$ (напруга контактного тертя $\tau_{\text{к.тр.}} \approx 24$ МПа для сталі і $\tau_{\text{к.тр.}} \approx 21$ МПа для алюмінію), за розмірами відповідно до Таблиці 23, отримані за допомогою Рівняння 3.55 далі будуть представлені в Таблицях 25 та 26 в розділі 3.2.5.

3.2.5. Порівняння результатів розрахунку сили деформування по чотирьом розглянутим методикам

В Таблицях 25 та 26 представлено порівняння результатів розрахунку сили деформування по чотирьом, розглянутим вище методикам (Таблиця 25 - результати для сталі 45 в гарячому стані, Таблиця 26 - результати для алюмінію АД0 при кімнатній температурі), для чотирьох розмірів зразків відповідно до Таблиці 23 .

З Таблиці 25 та 26 видно, що всі чотири методи дають відносно близькі за значеннями розрахункові значення сили деформування.

Найменш точним, але найбільш простим способом оцінки сили деформування при висадці поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем є метод верхньої оцінки, з урахуванням отриманих залежностей параметра $A_{\text{вном}}$. Найменша, в порівнянні з іншими трьома методиками, точність методу верхньої оцінки пов'язана з тим, що при розрахунку брали допущення про площинності напружено-деформованого стану. Необхідно так само відзначити, що аналітичний

розрахунок за способом №1 розроблявся авторами роботи [55] для поковок зі значно меншою відносною товщиною стінки півсфери, в порівнянні з поковками, розглянутими в цій роботі. Тому найбільш точними і фізично обґрунтованими методами розрахунку сили деформування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем, розглянутими в цій роботі, є аналітичний розрахунок за способом №2 і розрахунок методом кінцевих елементів.

Таблиця 25.1 - Порівняння результатів розрахунку сил деформування за чотирма розглянутими методам для сталі 45

№	Сила деформування, розрахована методом верхньої оцінки. Р, Н	Сила деформування, розрахована методом кінцевих елементів. Р, Н		Сила деформування, розрахована аналітично (спосіб 1). Р, Н	Сила деформування, розрахована аналітично (спосіб 2). Р, Н
		$\sigma_s = f(\dot{\epsilon}, \epsilon)$ (Таблиця 7)	$\sigma_s = 140$ МПа		
Без урахування стадії остаточного заповнення порожнини штампа					
1	1.603×10^5	1.3×10^5	1.48×10^5	0.79×10^5	1.39×10^5
2	2.56×10^5	2.48×10^5	2.69×10^5	2.25×10^5	2.6×10^5
3	3.47×10^5	3.32×10^5	3.77×10^5	2.93×10^5	3.67×10^5
4	5.32×10^5	6.65×10^5	6.99×10^5	6.64×10^5	6.84×10^5
З урахуванням стадії остаточного заповнення порожнини штампа					
1	-	5.24×10^5	5.18×10^5	-	5.39×10^5
2	-	7.69×10^5	7.78×10^5	-	8.51×10^5
3	-	11.85×10^5	12.04×10^5	-	12.28×10^5
4	-	21.34×10^5	21.32×10^5	-	21.39×10^5

Таблиця 26.1 -Порівняння результатів розрахунку сил деформування за чотирма розглянутими методам для алюмінію АД0

№	Сила деформування, розрахована методом верхньої оцінки. Р, Н	Сила деформування, розрахована методом кінцевих елементів.Р, Н		Сила деформування, розрахована аналітично (спосіб 1). Р, Н	Сила деформування, розрахована аналітично (спосіб 2). Р, Н
		$\sigma_s=f(\dot{\epsilon}, \epsilon)$ (Таблиця 6)	$\sigma_s = 120 \text{ МПа}$		
Без урахування стадії остаточного заповнення порожнини штампа					
1	1.37×10^5	1.24×10^5	1.42×10^5	0.68×10^5	1.31×10^5
2	2.19×10^5	2.41×10^5 (2.38×10^5)*	2.62×10^5	1.93×10^5	2.54×10^5
3	2.97×10^5	3.21×10^5	3.66×10^5	2.5×10^5	3.54×10^5
4	4.56×10^5	6.42×10^5 (5.8×10^5)*	7.28×10^5	5.7×10^5	6.8×10^5
З урахуванням стадії остаточного заповнення порожнини штампа					
1	-	4.72×10^5	4.74×10^5	-	4.2×10^5
2	-	6.64×10^5 (5.4×10^5)*	6.75×10^5	-	6.5×10^5
3	-	10.32×10^5	10.56×10^5	-	9.49×10^5
4	-	17.01×10^5	17.87×10^5	-	16.32×10^5
* в дужках наведені результати виміру сили деформування, отримані при експериментальних дослідженнях висадки алюмінієвих заготовок на випробувальній машині Instron 600 DX (Рисунок 3.15), які далі будуть представлені в розділі 3.3.1.					

3.3. Фізичне моделювання процесу висадки

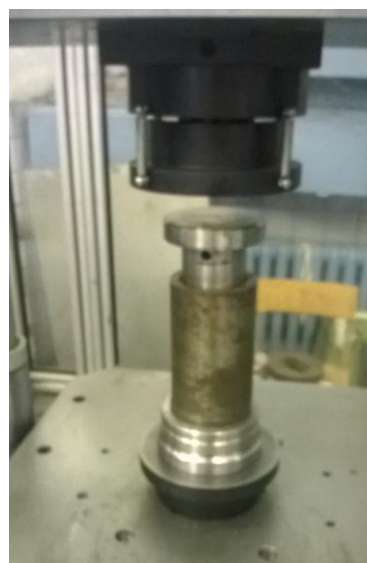
Завданням експериментальних досліджень було вивчення впливу розробленого способу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем на формозміна спрямованого волокнистої будови щодо контактних робочих поверхонь пуансона і матриці, а так само перевірка результатів проведеного чисельного експерименту. Експерименти проводили на заготовках з сплаву алюмінію марки АД-0 і стали 45. Температури висадки становили відповідно 200С для АД-0 і 1100С для стали 45.

3.3.1. Висадка поковок з алюмінієвих заготовок

Алюмінієві заготовки деформували в штампах на випробувальній машині Instron 600 DX (Малюнок 3.9) в лабораторії кафедри МТ6 МГТУ ім. Н. Е. Баумана. Швидкість деформування становила 2 мм / с.



а



б

Рисунок 3.9 - Установка для фізичного моделювання процесу висадки поковки з напівсферичним фланцем а - загальний вид Instron 600 DX б - штамп для моделювання висадки

Розміри заготовок для фізичного моделювання висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем представлені в Таблиці 27, де 10 - довжина хвостової частини заготовки, що входить в матрицю.

Таблиця 27.1 - Розміри заготовок для фізичного моделювання

№	Розміри кінцевої деталі							
	R	r	l	Ψ	γ	d	α	l_0
1	22,75	16	50	2,5	0,337	20	0	40
2	31,73	25	108	5,4	0,337	20	0	40

Для оцінки макроструктури вихідний пруток (Малюнок 3.10, а.) Розрізали по осі на установках Struers Accuton 05 та Struers Discotom-6 методом абразивного мокрого різання, тобто абразивний різання з подачею охолоджувальної рідини в зону різку, для запобігання нагрівання матеріалу і спотворення його властивостей. Для різання прутка використовували диск з оксиду алюмінію на бакелітовій основі товщиною 1,5 мм. Розрізані заготовки для макроаналізу шліфували відповідно до методичних рекомендацій [88] на верстаті Tegamin-30.

Вихідну макроструктуру заготовок визначали двома способами. За першим способом макроструктуру виявляли глибоким травленням в реактиве, відповідно до рекомендацій робіт [89-91]. Склад реактиву представлений у Таблиці 28.

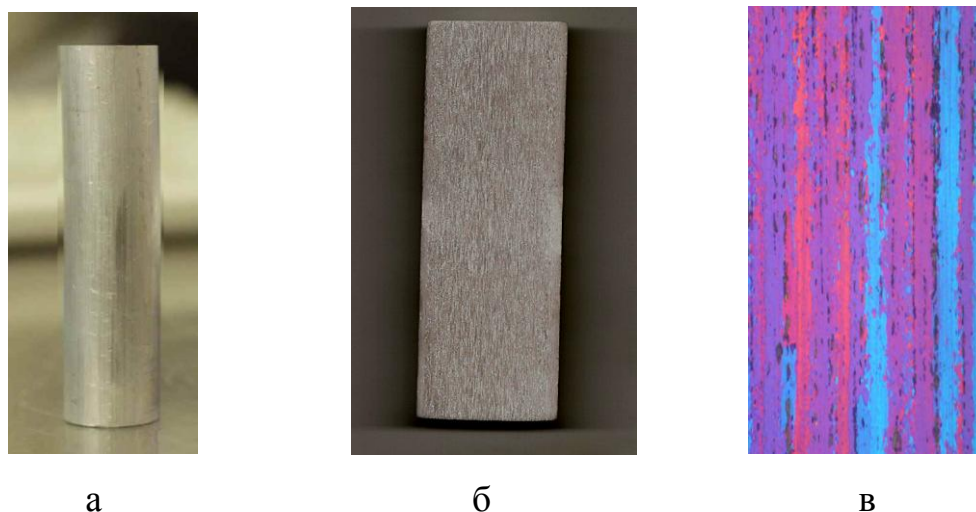


Рисунок 3.10 - Заготівля зі сплаву АД-0: а - вихідний пруток; б - макроструктура після глибокого травлення в кислотному розчині; в - макроструктура на НЕОРНОТ 30 при збільшенні x250

Таблиця 28.1 - Склад реактиву травлення для виявлення макроструктури сплаву АД-0

Склад, %			
HCl	HNO ₃	HF	H ₂ O
15	15	30	40

Сплав алюмінію має тонку структуру волокнистої будови, що ускладнює отримання якісного макрошліфов. При незначному збільшенні часу травлення виникає «роз'ятрювання» поверхні шліфа і випадання осаду (потемніння поверхні).

Для освітлення поверхні і видалення залишкових слідів обробки різанням проводили попереднє травлення зануренням макрошліфов в 10-15% розчин лугу NaOH. Травлення виконували до того моменту, коли поверхня макрошліфов не купувала білий матовий колір. При потемнінні поверхні макрошліфов зразок освітлювали протиранням п'ятипроцентним спиртовим розчином HNO₃. Потім зразок остаточно промивали у воді і сушили шляхом промокання м'яким сукном. Фотографія макроструктури, отриманої способом глибокого травлення, представлена на рисунку 3.10, б.

За другим способом макроструктуру виявляли шляхом оксидування при температурі 0-2 0С, протягом 15-20 секунд, при електричному напрузі 25 В. Потім проводили хімічну обробку відповідними реактивами. Фотозйомку поверхні макрошліфов проводили на установці НЕОРНОТ 30. Зображення орієнтації волокон показано на рисунку 3.10, в. Отримані обома способами макроструктури шліфів показують подовжню орієнтацію волокон, характерну для пресованих виробів.

Для проведення експериментів зі штампування алюмінієвих заготовок розробили і виготовили штампову оснащення для висадки заготовок з розмірами відповідно до Таблиці 27. Конструкція оснастки, за рахунок застосування вставок, дозволяє отримувати поковки різних розмірів.

Приклади конструкцій формотворного інструменту показані на рисунках 3.11 і 3.12, складальні креслення штампів показані на рисунку 3.13.

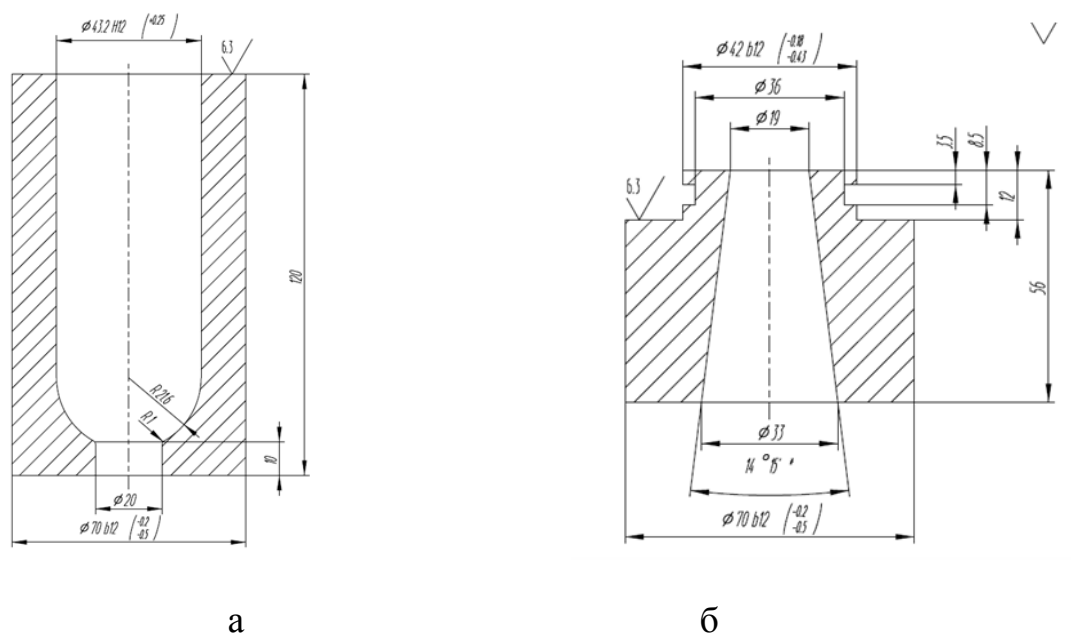


Рисунок 3.11 - Приклади ескізів а - матриця для формування півсфери, б - пуансон для висадки на конус

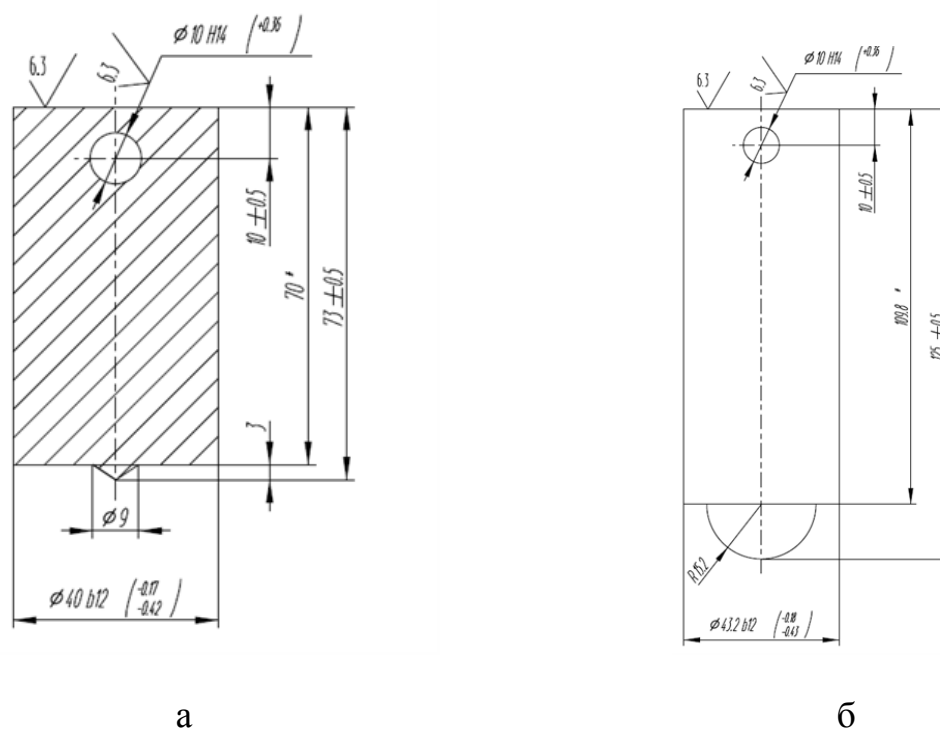
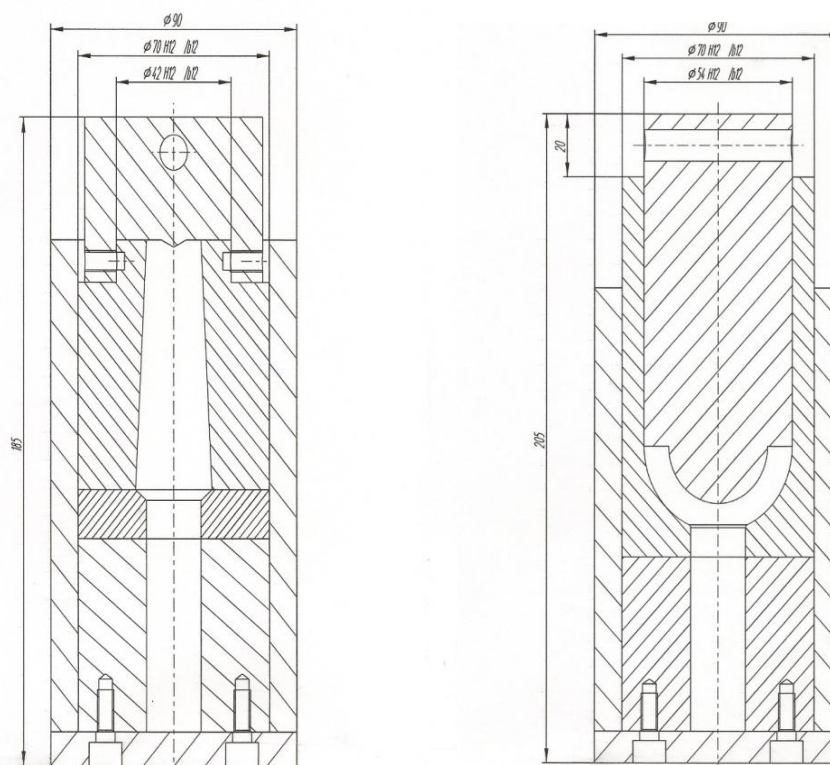


Рисунок 3.12 - Приклади ескізів а - пуансон для попередньо штампувального, б - пуансон для формування півсфери



а б

Рисунок 3.13 - Конструкції штампів: а -наборний струмок, б -чістовий струмок

Для максимізації тертя при штампуванні перед приміщенням в штамп заготовку натирали крейдою[10]. В результаті проведених експериментів, були отримані поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем (Рис. 3.14) і графіки зміни сили деформування по ходу процесу(Рис. 3.15).



а б

Рисунок 3.14 - Отримані в результаті фізичного моделювання висадки поковки зі сплаву АД-0: а – $\Psi = 2,5$ б – $\Psi = 5,4$

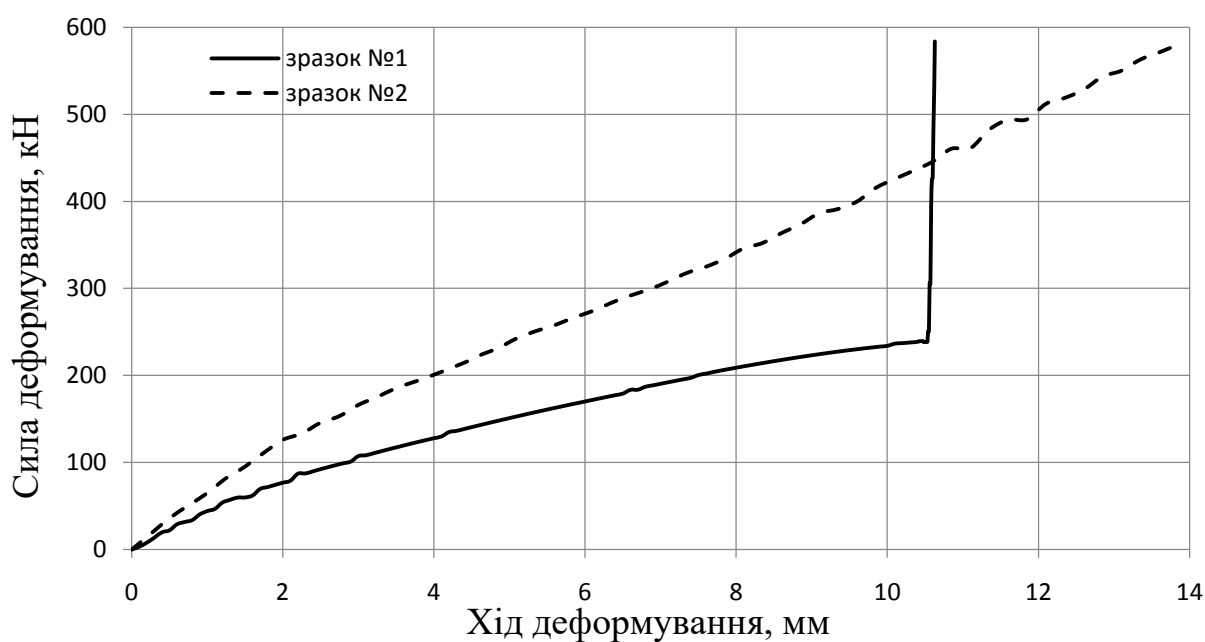


Рисунок 3.15 - Отримані в результаті фізичного моделювання висадки поковки зі сплаву АД-0 графіки сили деформування

За графіками зміни сили деформування видно, що зразок №2 (Таблиця 27) штампували не до повного заповнення порожнини штампа, а швидше за все і не до торкання заготівлю плоского торця пуансона. Це пов'язано з обмеженням максимально можливої сили деформування випробувальної машини Instron 600 DX, яке становить 600 кН.

Аналогічним чином, як був порізаний вихідний зразок заготовки, отримані в результаті фізичного моделювання висадки поковки зі сплаву АД-0 були порізані в осьовому напрямку (рис. 3.16).

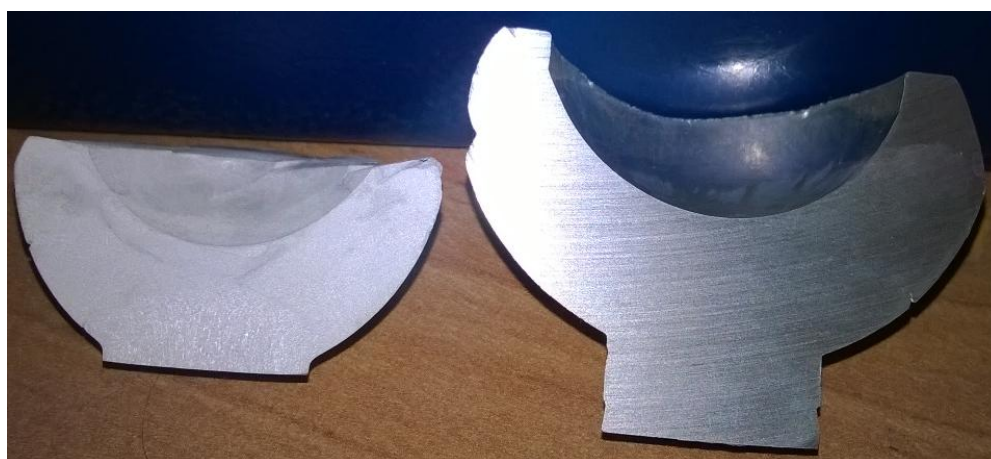


Рисунок 3.16 - Зразки після розрізання та обробки (зліва $\Psi = 2,5$; справа $\Psi = 5,4$)

На зразку №1 (Таблиця 27) орієнтацію волокон методом глибокого травлення виявити не вдалося. У зв'язку з цим застосувати фотозйомка поверхні макрошліфов на установці НЕОРНОТ 30. Зображення орієнтації волокон показано на рисунку 3.17.

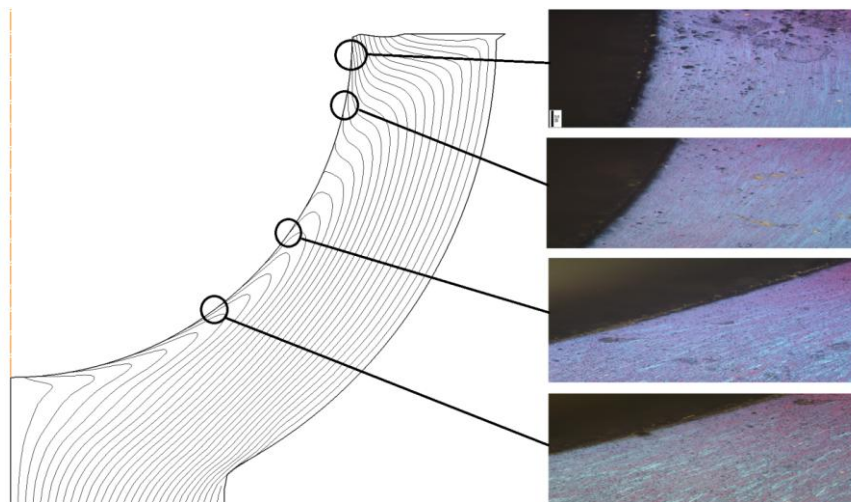


Рисунок 3.17 - Макроструктура ділянок поківки №1 ближче до внутрішньої поверхні полусферического фланця (НЕОРНОТ 30, збільшення x250)

Волокнисту будову зразка №2 (Таблиця 27) в розрізі ближче до внутрішньої поверхні полусферического фланця після травлення в реактиве складу, зазначеного в Таблиці 28 та порівняння з результатами математичного моделювання представлено на рисунку 3.18.

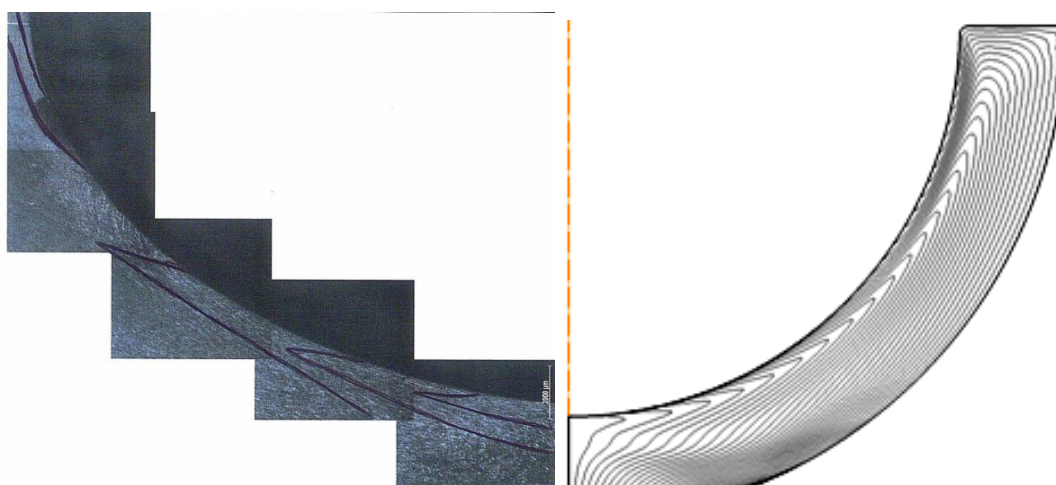


Рисунок 3.18 - Волокниста будова алюмінієвої поківки №2 ближче до внутрішньої поверхні полусферического фланця

Результати аналізу орієнтації волокон в обох зразках за розробленою методикою показали наступне: в контрольованих перетинах волокна практично огинають контактну поверхню полусферического фланця, відповідно кути β_1 и β_2 рівні $170-180^\circ$.

3.3.2. Висадка поковок із сталевих заготовок

Дослідну штампування поковок із сталі 45 в гарячому стані виконували на кривошипно-колінному пресі K0034 номінальною силою 2,5 МН в лабораторії кафедри МТ6 МГТУ ім. Н. Е. Баумана. Нагрівання заготовок до температури 1100 0С виробляли в печі ПЛ20 / 12,5.

Розміри вихідної заготовки і інструмента аналогічні розмірам зразка №1 (Таблиця 27).

В результаті проведених експериментів, були отримані сталеві поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем (Рисунок 3.19).



Рисунок 3.19 - Отримана в результаті фізичного моделювання висадки кування зі сталі 45 після попереднього штампувального переходу (зліва) і після остаточного формування півсфери (праворуч)

Аналогічним чином, як раніше різали заготовки і поковки зі сплаву АД-0, отримані в результаті фізичного моделювання висадки поковки зі сталі 45 порізали в осьовому напрямку (рис. 3.20).



Рисунок 3.20 - Макрошліфов зразків зі сталі 45

Далі проводили глибоке травлення зразка. До складу реактиву для травлення входила хлорне кислота HClO_4 , перед травленням проводили електрополірування поверхні при температурі 00 C і напрузі 25 В . На рисунку 3.21 показано волокнисту будову полусферического фланця, отриманого з заготовки сталі 45 і порівняння з результатами математичного моделювання.

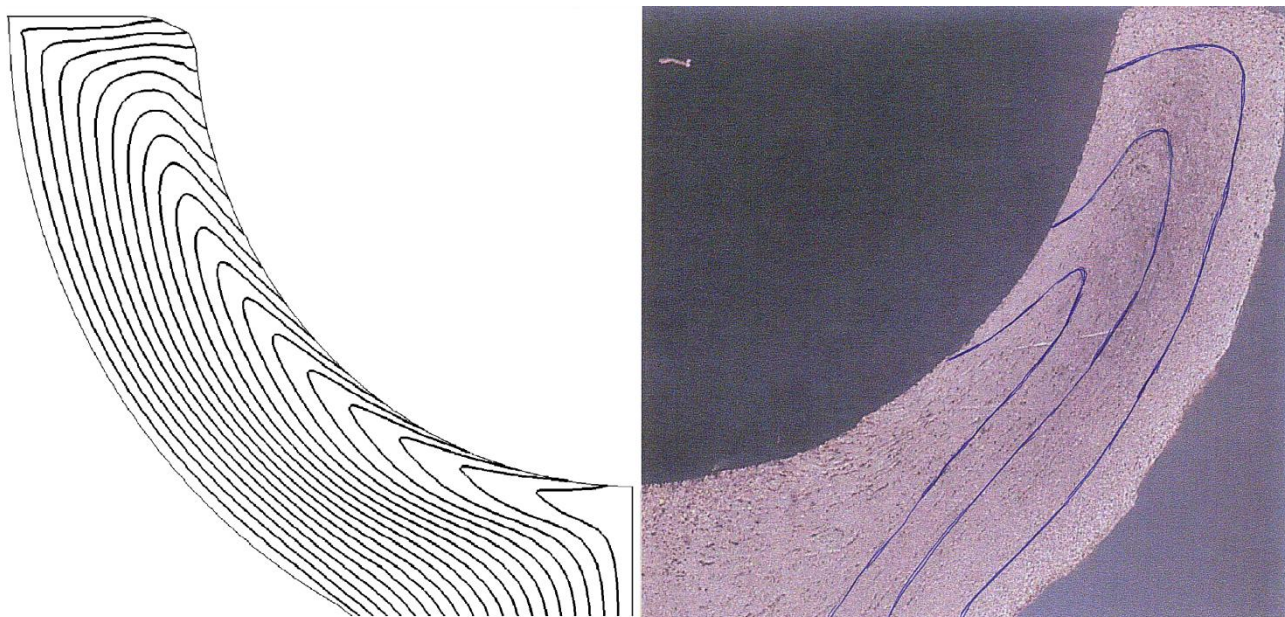


Рисунок 3.21 - Волокниста будова поковки зі сталі 45

Фрагменти панорами волокнистої будови представлені на рисунку 3.22 у вигляді схеми по внутрішній поверхні полусферического фланця. Фотографії були отримані на установці Axiovert 200 MMAT фірми Zeiss при збільшенні $\times 25$.

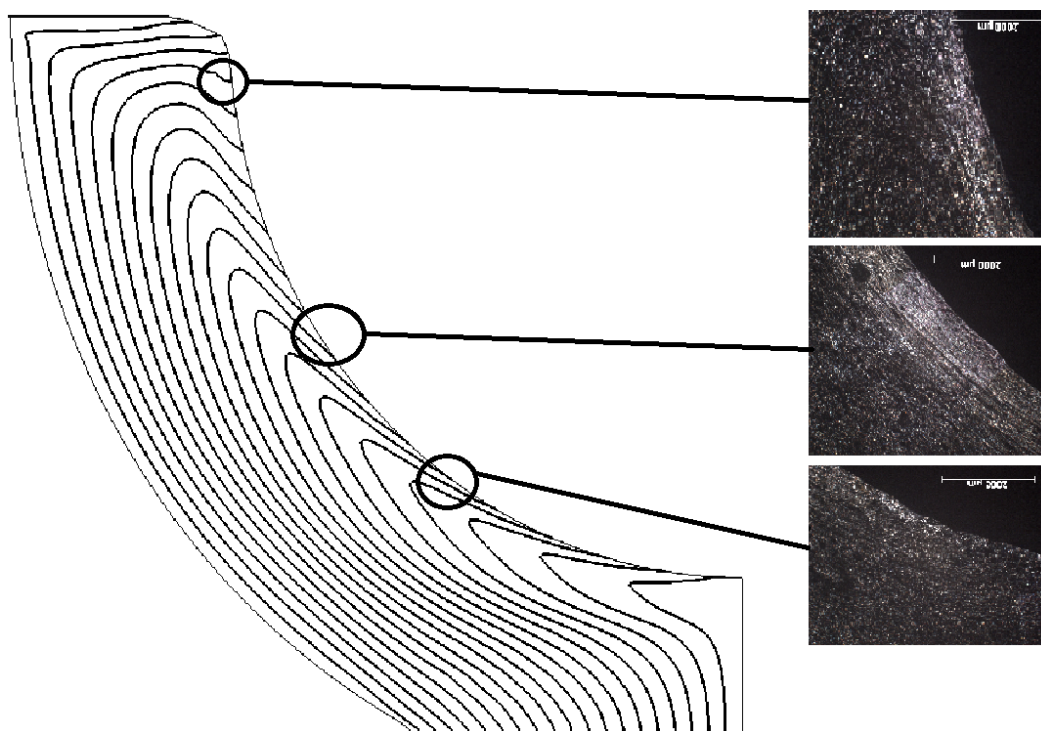


Рисунок 3.22 - Фрагменти волокнистої будови поковки зі сталі 45 ближче до внутрішньої поверхні полусферического фланця

Замір кутів орієнтації волокон проводили згідно з розробленою в розділі 2.2 методикою. Результати цих вимірів, разом з результатами розрахунку, отриманими за Рівнянню 3.16 і Таблиці 21 наведені в Таблиці 29. Як видно з таблиці розбіжності між розрахунковим значенням кутів і замірених не перевищує 10%.

Таблиця 29.1 - Результати вимірів кутів орієнтації волокон для сталевих поковок при

$$\delta = \Delta / (R - r) = 0 \quad (\Delta = 0 \text{ мм})$$

Кут орієнтації волокна	β_1	β_2	$\beta_{\text{ср}}$
Значення кутів за результатами вимірювання, градус	117	165	145
Значення кутів за результатами розрахунку, градус	106,53	170,66	140,9

3.4. Висновки до розділу 3

1. Розроблено методику чисельного моделювання формозміни і волокнистої будови при висадці поковок типу стрижня з

полусферическим фланцем, що включає в себе методику побудови повного факторного експерименту. В результаті проведеного дослідження шляхом чисельного експерименту отримані рівняння регресії показників орієнтації волокон β_1 , β_2 , β_{cp} при різних значеннях відносної глибини вимірювання кутів виходу волокон δ .

2. Зроблені розрахунки сили деформування на стадії вільного перебігу металу в порожнині штампа і на стадії остаточного заповнення порожнини штампа. При виборі технологічного обладнання для штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем найбільш доцільним є використання аналітичного розрахунку сили деформування за варіантом №2, або використання методу скінченних елементів, тому що обидва ці методи дозволяють розрахувати силу деформування на стадії остаточного заповнення порожнини штампа.

3. Розроблено методику фізичного моделювання формозміни і волокнистої будови при висадці поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем, що включає в себе методику проведення фізичного моделювання та дослідження висадки на ГКР шляхом холодного висадження з пруткового алюмінію марки АД-0 і гарячої висадки зі сталі 45. У результаті виготовлення і травлення макрошліфов для дослідження макроструктури поковок, отримані картини волокнистої будови в поковках типу стрижня з напівсферичним фланцем.

4. Відмінність результатів розрахунку за рівняннями регресії кутів β_1 , β_2 , β_{cp} від результатів вимірювання в ході фізичного моделювання становить не більше 10%, а відмінність результатів розрахунку сили деформування від сили заміряний в ході фізичного моделювання становить не більше 20%.

4. Розробка методики проектування технологічного процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою і приклади її застосування

4.1. Структура методики проектування технологічного процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою

Методика проектування технологічного процесу висадки на ГКР поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем для забезпечення спрямованого волокнистої будови поковки представлена у вигляді укрупненої блок-схеми, показаної на Малюнках 4.1 і 4.2. Запропонована методика може бути так само сформульована у вигляді послідовності дій, які необхідно виконати технологу при проектуванні технологічних процесів виробництва розглядаються в даній роботі поковок:

1. Аналіз вихідних даних для проектування. Вихідними даними є креслення деталі, вимоги до матеріалу деталі, а також вимоги до показників якості деталі. Вимоги можуть бути сформульовані конструктором або технологом за даними, наведеними в класифікаторах деталей, або виходячи з індивідуальних особливостей режимів експлуатації деталей. На основі даних класифікатора деталей проводять аналіз особливостей, як самого виробу, так і технології його виготовлення і умов подальшої експлуатації;

2. Вибір типу обладнання, яке буде використовуватися при виробництві поковок, і визначення технічних умов для її виготовлення. При цьому, використовують бази даних, що містять відомості з ГОСТів, керівних технічних матеріалів, довідників і публікацій, які відображають сучасний вітчизняний і зарубіжний досвід зі штампування, в тому числі щодо забезпечення необхідної орієнтації волокнистої будови в досліджуваній групі поковок (якщо такі є);

3. Проектування креслення поковки і визначення значень параметрів технологічного процесу: відносної висаджуваної довжини $\Psi=1/d$, відносної товщини стінки $\gamma=(R-r)/d$ і відносної величини припуску на механічну обробку $\delta=\Delta/(R-r)$. При цьому доцільно використовувати САД-системи SolidWorks [101], AutoCad [102], Catia [103] та інші;

4. Вибір схеми технологічного процесу, на основі класифікатора деталей з урахуванням переходів штампування. Необхідно враховувати, що відповідно до рекомендацій роботи [5] в разі, якщо $\Psi \leq 2.5$ висадку півсфери можна проводити без набраних конічних переходів, в разі, якщо $2.5 < \Psi \leq 4$ – з одним складальним конічним переходом, а в разі, якщо $\Psi > 4$ – с двома;

5. Проектування гравюри штампового інструменту для вибраного обладнання, з урахуванням обраної схеми технологічного процесу висадки, розмірів і форми заготовки, параметрів процесу. На даному етапі, в тому числі, призначається величина кута нахилу деформирующей поверхні пуансона α . Початкове значення α доцільно прийняти рівним нулю, тому що це сприяє мінімізації витрат при виготовленні штампового оснащення;

6. Визначення волокнистої будови поковки за результатами моделювання.

6.1. Для забезпечення спрямованого волокнистої будови в поковки при проектуванні технологічного процесу методика передбачає застосування комп'ютерного моделювання за допомогою САЕ систем (Deform, Qform і ін.) І побудови ліній Лагранжа, що ілюструють орієнтацію волокон.

6.2. У разі недоступності жодної з САЕ систем можна скористатися рівняннями математичних моделей для розрахунку показників орієнтації волокон в поковки і в деталі - кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ (Рівняння 3.16 - 3.18 і коефіцієнти з Таблиці 21), або наочними даними таблиць 30 і 31, наведених нижче.

7. Отримані при моделюванні значень показників орієнтації волокон β_1 , β_2 та β_{cp} необхідно використовувати для оцінки на відповідність вимогам (симетричність розташування, плавність і повторення волокнами робочого контуру деталі, тобто $135^\circ < \beta_1, \beta_2, \beta_{cp} < 45^\circ$) спрямованості волокон в поковки. Якщо вимоги по орієнтації волокон не виконуються, то необхідно провести корекцію форми і розмірів штампного інструменту:

7.1. В першу чергу необхідно здійснити корекцію форми і розмірів інструменту на попередньому штампному переході, тобто змінити кут нахилу деформуючої поверхні пуансона α . При цьому доцільно перевірити обидва екстремальних випадку, коли $\alpha = +7.5$ і $\alpha = -7.5$, тому за даними наведеними в Таблиці 31 при різних співвідношеннях Ψ та γ збільшення або зменшення кута α може призводити як до покращення, так і до погіршення показників β_1 , β_2 і β_{cp} ;

7.2. Якщо вимоги по орієнтації волокон все ще не виконані, то необхідно збільшити величину припуску на механічну обробку Δ і здійснити перерахунок параметрів технологічного процесу Ψ , γ і відносної величини припуску $\delta = \Delta / (R - r)$. Після чого заново виконати пункти 6-8;

8. Розрахунок енергосилових параметрів розробленого технологічного процесу і вибір конкретного обладнання наявного в розпорядженні технолога. При комп'ютерному моделюванні технологічного процесу штампування для розрахунку енергосилових параметрів і параметрів напруженого і деформованого станів проектувальник може використовувати стандартні процедури CAE систем. Крім того, запропонована методика проектування дозволяє скористатися для визначення сили штампування аналітичними залежностями, наведеними в Главі 3. Розраховані значення сили штампування дають можливість оцінити правильність вибору типу обладнання або схеми техпроцесу і, при необхідності, внести зміни в технологічний

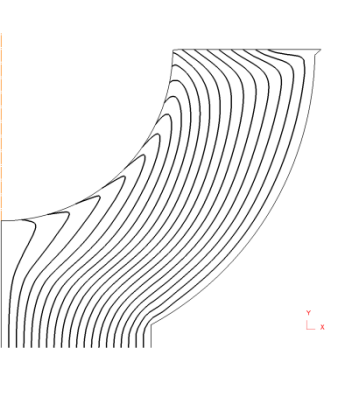
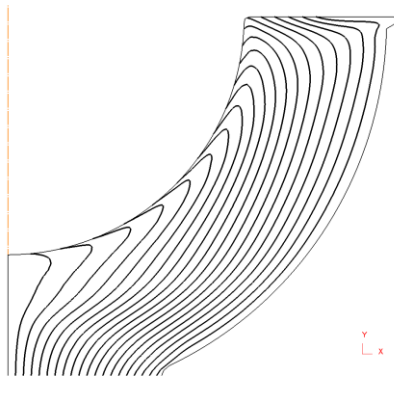
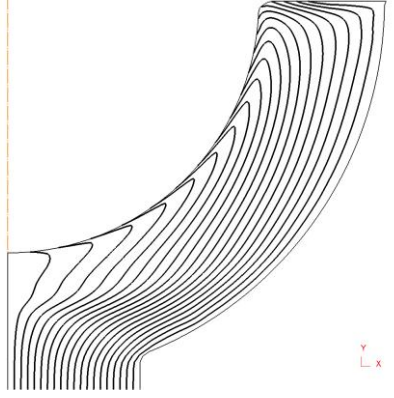
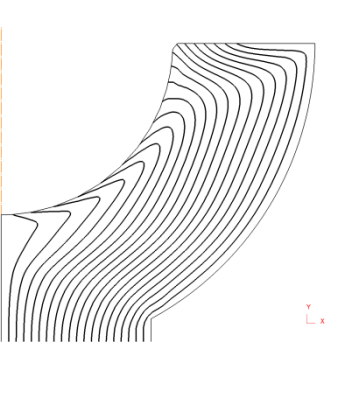
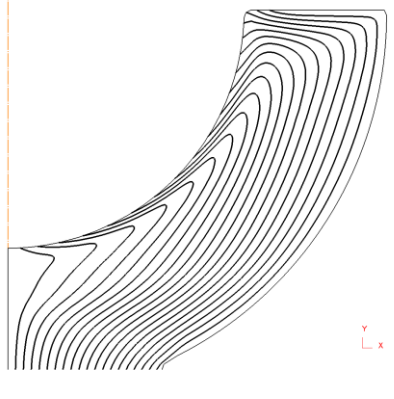
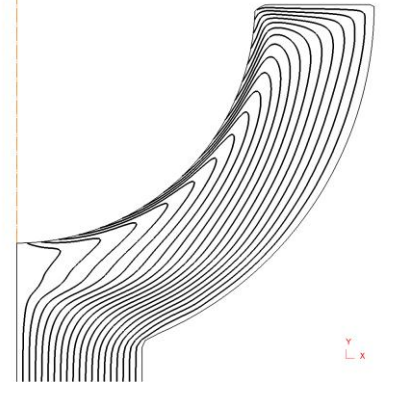
процес;

9. Оцінка економічної ефективності розробленої технології. Якщо технологія не є економічно ефективною, то слід внести відповідні коригування в вибір обладнання або технологічної схеми;

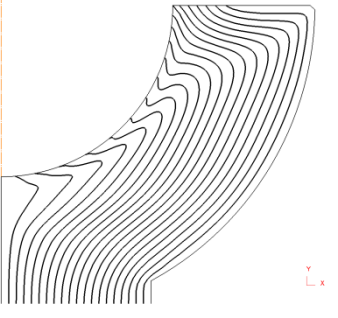
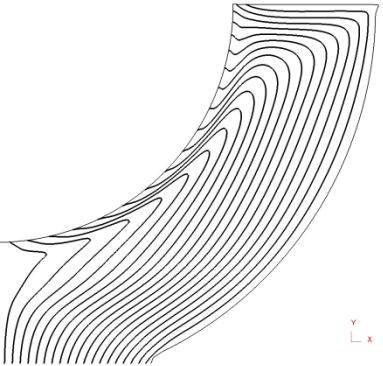
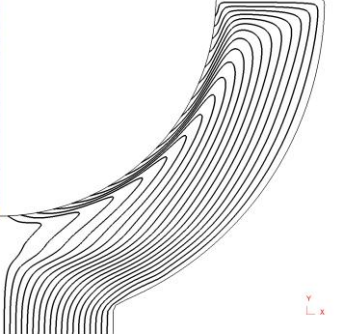
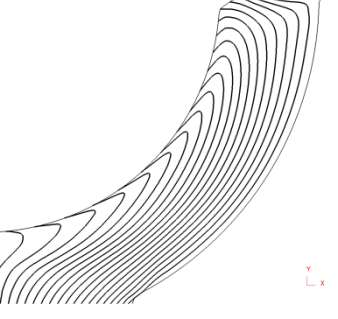
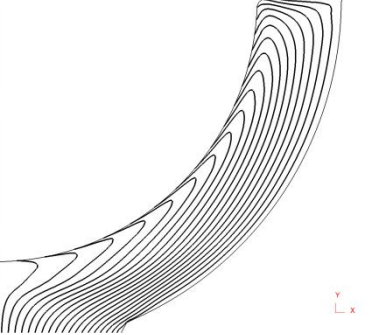
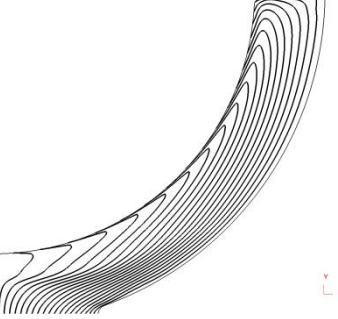
10. Підготовка технологічної карти, іншої технічної документації, робочого проектування штампового інструменту і оснастки;

11. На заключному етапі здійснюють дослідно-промислову перевірку спроектованого технологічного процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем і остаточне доведення розмірів штампового оснащення.

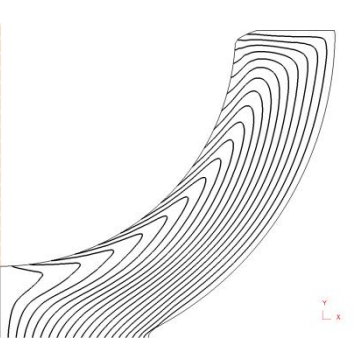
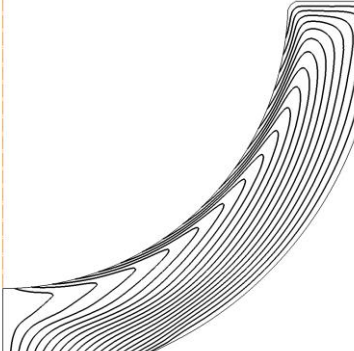
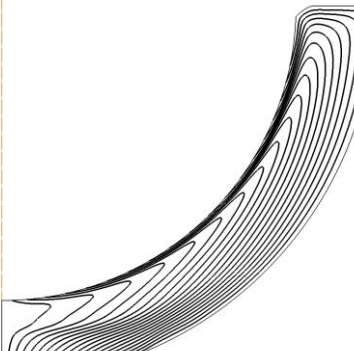
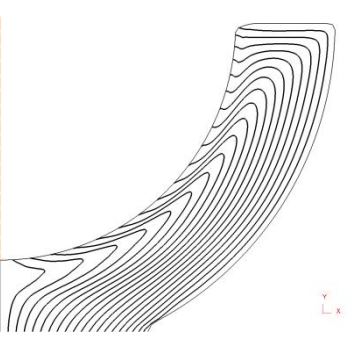
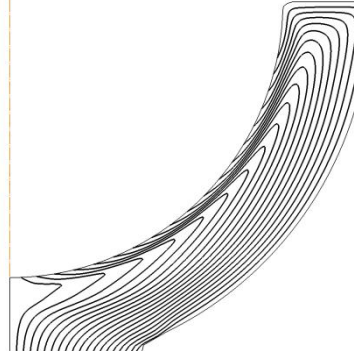
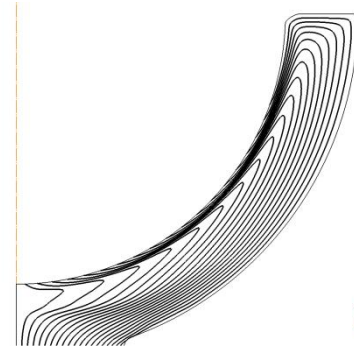
Таблиця 30.1 - Характер спотворення волокнистої будови при висадці поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем в залежності від параметрів технологічного процесу ψ , γ , α

Значення параметр $\alpha \gamma$	Значення параметр α	Значення параметра ψ		
		2.5	3.95	5.4
0.475	7.5			
0.475	0			

Таблиця 30.1- (продовж.). Характер спотворення волокнистої будови при висадці поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем в залежності від параметрів технологічного процесу ψ , γ , α

Значення параметр $\alpha \gamma$	Значення параметр $\alpha \alpha$	Значення параметра ψ		
		2.5	3.95	5.4
0.475	-7.5			
0.337	7.5			

Таблиця 30.1- (продовження) Характер спотворення волокнистої будови при висадці поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем в залежності від параметрів технологічного процесу ψ , γ , α

Значення параметр $\alpha \gamma$	Значення параметр $\alpha \alpha$	Значення параметра ψ		
		2.5	3.95	5.4
0.337	0			
0.337	-7.5			

Таблиця 31.1 - Кути виходу волокон в деталі після зняття припуску на механічну обробку в залежності від параметрів технологічного процесу ψ , γ , α

Значення параметра $\psi=l/d$	Значення параметра α	Значення параметра $\gamma=(R-r)/d$	Величина припуску на механічну обробку, $\delta=\Delta/(R-r)$								
			0.05			0.1			0.2		
			β_1	β_2	β_{cp}	β_1	β_2	β_{cp}	β_1	β_2	β_{cp}
5.4	7.5	0.337	165.6	178.2	173.15	161.48	92.89	124.75	79.15	33.1	49.02
	0		170.1	175.55	173.65	167.91	129.4	146.9	113.75	28.9	66.32
	-7.5		174.6	172.9	174.5	174.34	165.9	169.05	148.35	24.7	83.62
3.95	7.5	0.337	148	176.55	165.1	129.9	93.41	110	82.15	33	51.36
	0		138.5	173	161.8	135.24	128	132.1	102.64	28.8	60.76
	-7.5		129	169.45	158.5	140.57	162.59	154.2	123.15	24.6	70.16
2.5	7.5	0.337	130.4	174.9	157.05	98.35	93.92	92.25	85.15	32.9	53.7
	0		106.9	170.45	149.95	102.57	126.6	117.3	91.55	28.7	55.2
	-7.5		83.4	166	142.8	106.8	159.3	139.35	97.95	24.5	56.7

Таблиця 31.1 - (продовження) Кути Вихід волокон в деталі после зняття припуску на механічну обробка в залежності від параметрів технологічного процесу ψ , γ , α

Значення параметра $\psi=l/d$	Значення параметра α	Значення параметра $\gamma=(R-r)/d$	Величина припуску на механічну обробку, $\delta=\Delta/(R-r)$								
			0.05			0.1			0.2		
			β_1	β_2	β_{cp}	β_1	β_2	β_{cp}	β_1	β_2	β_{cp}
5.4	7.5	0.406	164.4	134.95	147.3	126.3	60.23	96.05	77.4	35.85	50
	0		161	155.7	160	150.41	112.84	132.6	100	35.3	61.6
	-7.5		157.6	176.45	172.2	174.5	165.45	169.15	122.6	34.7	73.2
3.95	7.5	0.406	134.4	133.75	134.3	103.12	62	84.4	75	35.85	49.6
	0		124	143	138	116.21	113	116	91.5	35.05	57.6
	-7.5		113.6	152.25	141.7	129.3	164	147.6	108	34.25	65.6
2.5	7.5	0.406	104.4	132.5	121.3	79.93	63.77	72.75	72.6	35.852	49.2
	0		87	130.3	116	82.01	113.16	99.4	83	34.802	53.6
	-7.5		69.6	128.05	110.7	84.1	162.55	126.05	93.4	33.752	58

Таблиця 31.2 -(продовження) Кути виходу волокон в деталі після зняття припуску на механічну обробку в залежності від параметрів технологічного процесу ψ , γ , α

Значення параметра $\psi=l/d$	Значення параметра α	Значення параметра $\gamma=(R-r)/d$	Величина припуску на механіческую обробку, $\delta=\Delta/(R-r)$								
			0.05			0.1			0.2		
			β_1	β_2	β_{cp}	β_1	β_2	β_{cp}	β_1	β_2	β_{cp}
5.4	7.5	0.475	163.2	91.7	121.45	126.32	60.23	96.05	77.4	35.85	50
	0		151.9	135.85	146.35	150.41	112.84	132.6	100	35.3	61.6
	-7.5		140.6	180	171.25	174.5	165.45	169.15	122.6	34.75	73.2
3.95	7.5	0.475	120.8	90.95	103.5	103.12	62	84.4	75	35.85	49.6
	0		109.5	113	114.2	116.2	113	116	91.5	35.05	57.6
	-7.5		98.2	135.05	124.9	129.3	164	147.6	108	34.25	65.6
2.5	7.5	0.475	78.4	90.2	85.55	79.93	63.77	72.75	72.6	35.85	49.2
	0		67.1	90.15	82.05	82.014	113.16	99.4	83	34.8	53.6
	-7.5		55.8	90.1	78.55	84.1	162.55	126.05	93.4	33.75	58

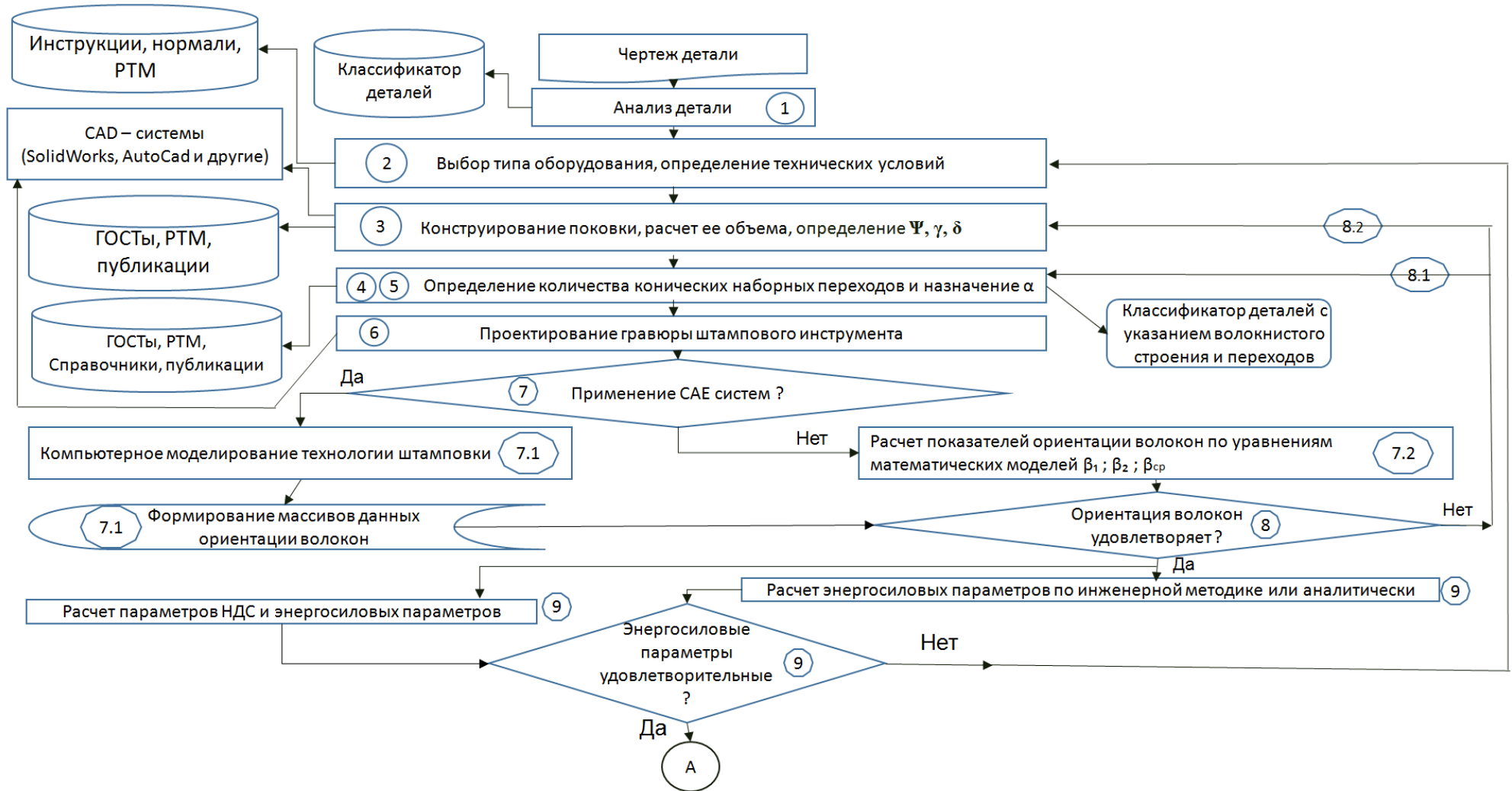


Рисунок 4.1 - Збільшена блок-схема методики проектування технологічного процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою

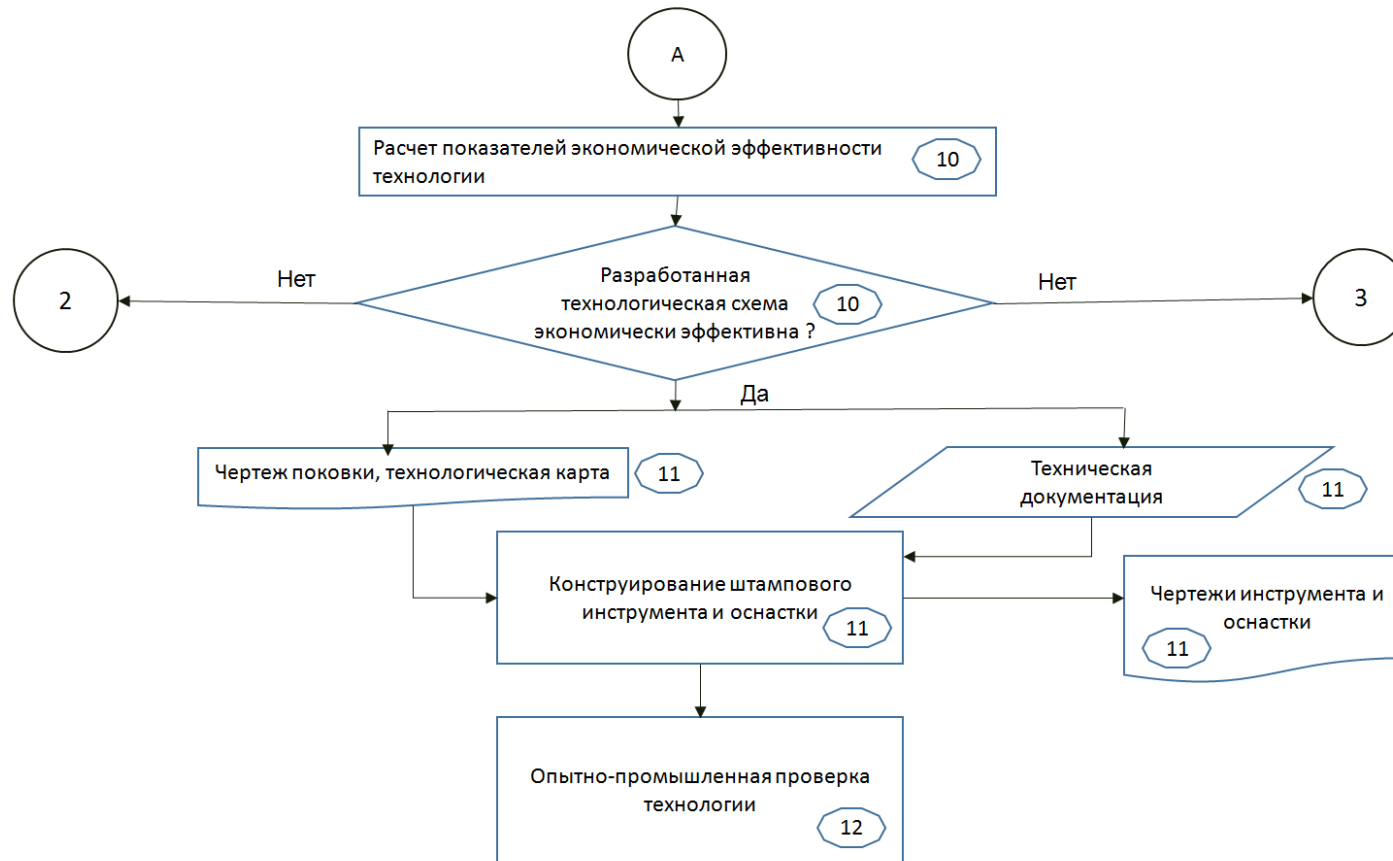


Рисунок 4.2 - Збільшена блок-схема методики проектування технологічного процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою (продовження рисунка 4.1)

4.2. Приклад розрахунку при проектуванні поковки кульової опори вантажного автомобіля УРАЛ за розробленою методикою

Далі розглянута технологія штампування поковки «опора кульова» для автомобіля «Урал» (6361Х-2304015) [68] зі сталі 30ХГСА с припуском на механічну обробку внутрішньої поверхні півсфери $\Delta = 1.9$ мм [104]. Опора кульова є частиною складного механізму «поворотного кулака» (Рисунок 4.3), що є важливим елементом підвіски будь-якого автомобіля. Вже згадана деталь працює в умовах складної циклічного навантаження, в тому числі на стирання (в області вимірювання кута β_2), і, з урахуванням, в основному військового призначення автомобіля Урал, питання підвищення ресурсу її роботи може бути досить актуальним.

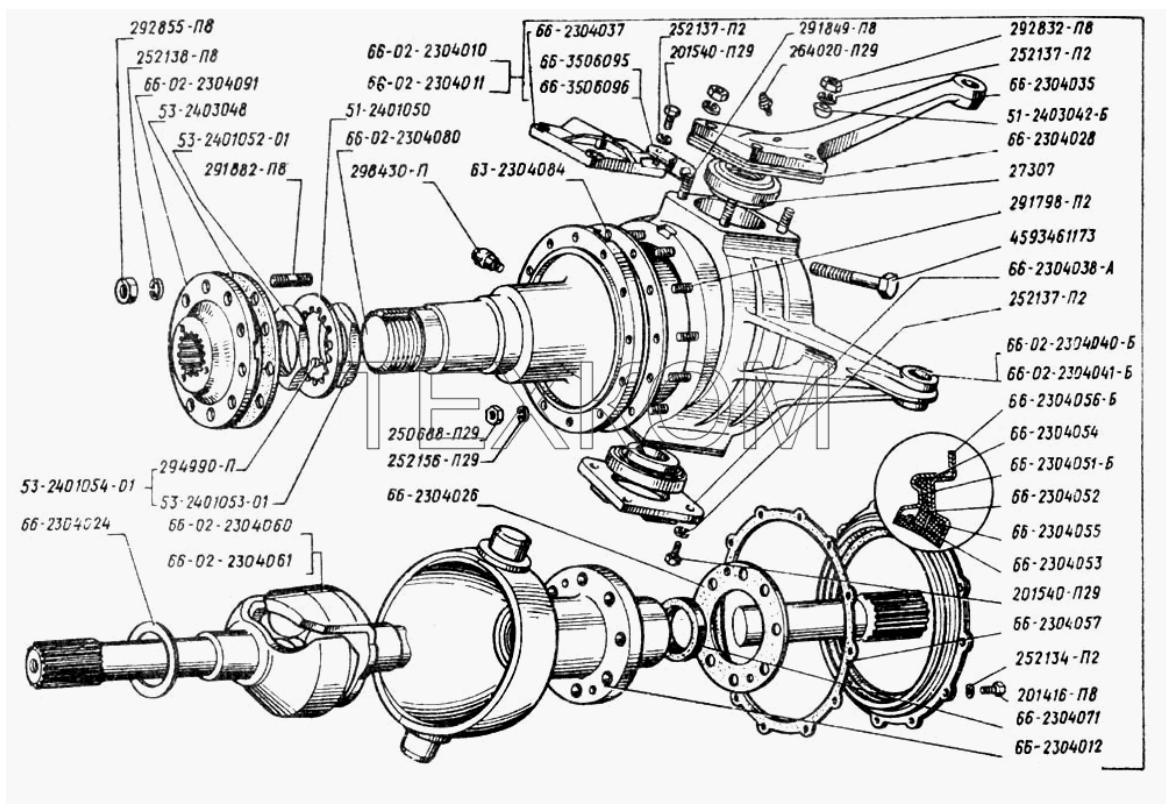


Рисунок 4.3 - Приклад схеми вузла «поворотного кулака» вантажного автомобіля

Для штампування використана гарячекатана заготовка [105]. Обсяг висаджуваної частини заготовки для формування полусферического фланця визначено відповідно до розмірів поковки, яка показана на рисунку 4.4, і склав 1026578 мм³. З урахуванням отриманого значення обсягу і діаметра

вихідного прутка розраховували показники $\psi=l/d$, $\gamma=(R-r)/d$ и $\delta=\Delta/(R-r)$ (Таблиця 32).

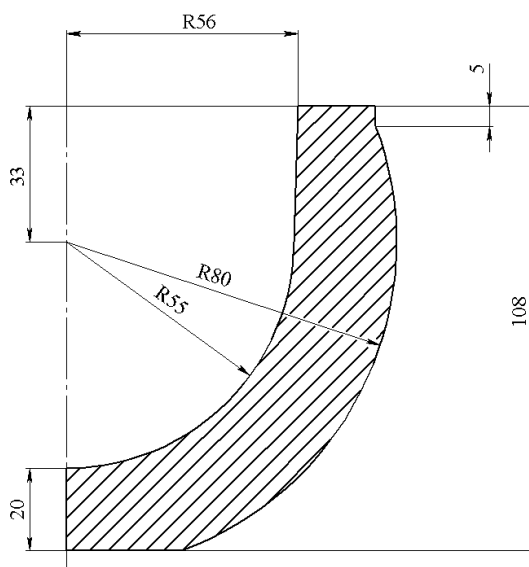


Рисунок 4.4 - Розміри полусферического фланця поковки

Таблиця 32.1 - Параметри технологічного процесу висадки d , ψ , δ и γ

Діаметр вихідної заготовки d , мм	Ψ	γ	δ
63	5.2	0.4	0.076

Згідно заводської технології на першому переході штампування виробляють конічний набір металу висадкою частини поковки з прутка $d = 63$ мм. Форма заготовки після першого переходу штампування представлена на рисунку 4.5.

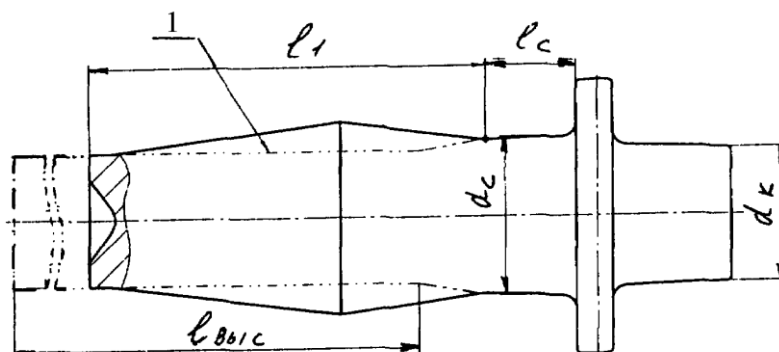


Рисунок 4.5 - Заготівля після першого переходу штампування: $l_1 = 167.3$ мм

На другому переході штампування заготовку осаджують на висоту $l_2 = 98$ мм (Рис. 4.6) і надають їй грибообразную форму 1 з формуванням осевого конусообразного поглиблення 2.

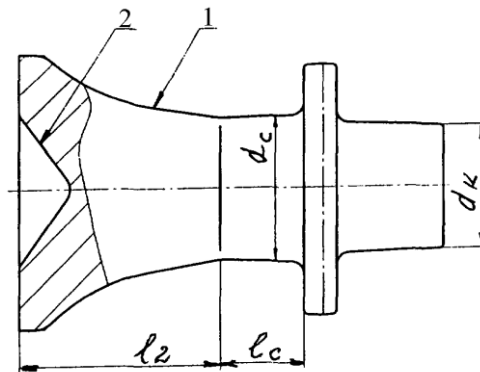


Рисунок 4.6 - Заготівля після другого переходу штампування: $l_2 = 98$ мм

На третьому переході штампування (Рис. 4.7) виконують прошивку-роздачу грибообразной потовщення без зміни його довжини $l_2 = 13$.

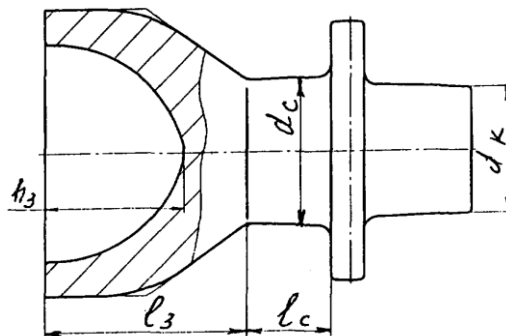


Рисунок 4.7 - Заготівля після третього переходу штампування: $l_3 = 98$ мм

При остаточній штампування (Рис. 4.8), на четвертому переході проводять остаточну прошивку-формовку отриманого на третьому переході потовщення з формуванням стінок полусферического фланця.

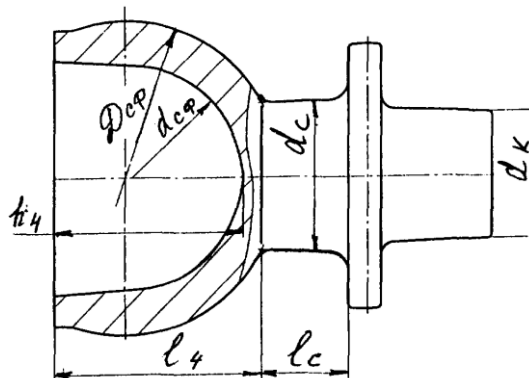


Рисунок 4.8 - Кування після остаточного переходу штампування: $l_4 = 108$ мм

Кування «опора кульова» дещо відрізняється від усіх розглянутих вище, тому що центр її півсфери зміщений відносно площини її торця (Рисунок 4.8). У зв'язку з цим більш доцільним для оцінки орієнтації її волокон є використання КЕ моделювання, а не отриманих раніше рівнянь регресії. У програмному комплексі DEFORM були змодельовані операції штампування поковки «опора кульова» для автомобіля «Урал» за заводською технологією. На рисунку 4.9, по переходах, для кінцевих стадій навантаження, показані орієнтації ліній Лагранжа, що моделюють орієнтацію волокон в поковки.

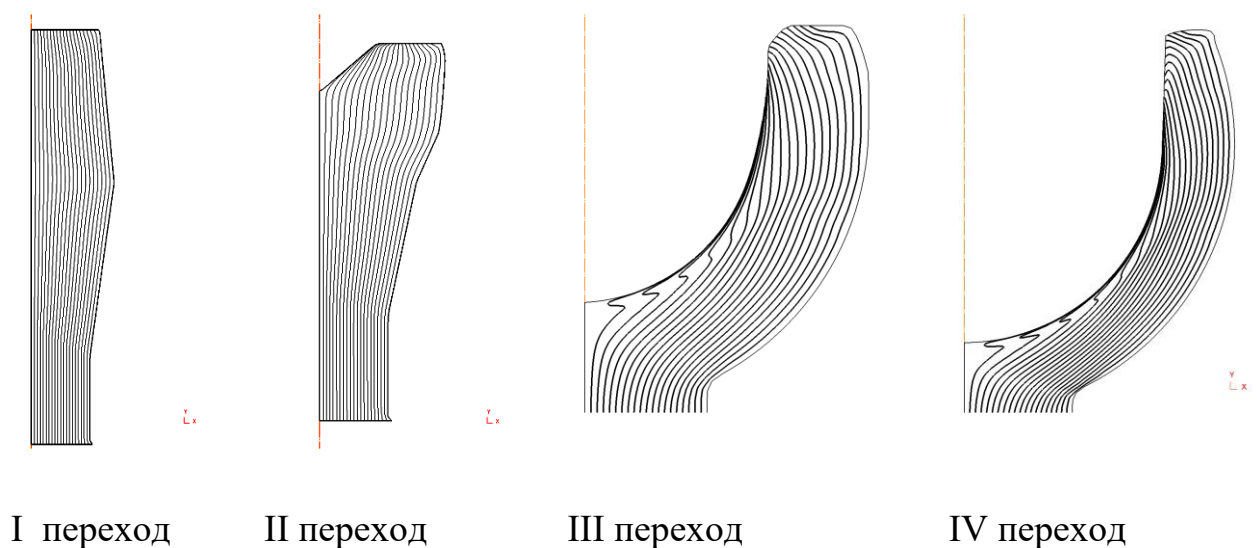


Рисунок 4.9 - Заготовки з лініями Лагранжа по переходах штампування (заводська технологія при $d=63$ мм)

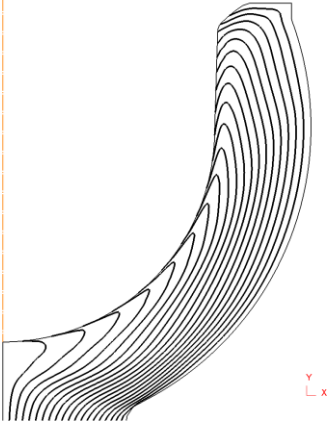
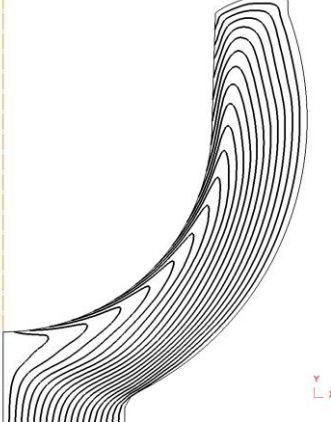
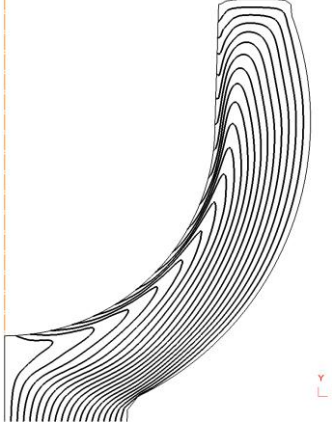
Значення кутів β_1 і β_2 і β_{cp} орієнтації волокон після останнього переходу на глибині зняття припуску на механічну обробку $\Delta = 1.9$ мм відповідно рівні 76.8° , 87.7° і $65,6^\circ$. Зазначені значення кутів орієнтації волокон показують, що волокна не оминають контактну з пуансоном поверхню, волокнисту будову кінцевої деталі не буде плавним.

Відповідно до алгоритму проектування з урахуванням незадовільною орієнтації волокон була проведена процедура удосконалення технологічного процесу, що складається з наступної послідовності дій, керуючись блок-схемою представленої раніше на Рисунках 4.1 і 4.2:

- Була обрана нова схема штампування з прутка $d = 63$ мм, що включає в себе один складальний перехід в кінчному пуансоні, попередній штампувальний перехід при $\alpha = 0^\circ$ (плоский торець пуансона) і остаточний штампувальний перехід. Вид поковки з лініями Лагранжа після остаточного переходу представлений на відповідній картинці в Таблиці 33 (при $\alpha = 0^\circ$). Значення улов β_1 і β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ орієнтації волокон після останнього переходу на глибині зняття припуску на механічну обробку $\Delta = 1.9$ мм відповідно рівні $161,4^\circ$, $165,3^\circ$ і $165,6^\circ$. Дані показники можуть бути визнані задовільними, однак, з урахуванням, що показники цих кутів все ж далекі від оптимальних, подальше поліпшення волокнистої будови в цій поковки є доцільним.
- Далее на двух уровнях варьировали формой предварительного штампувального переходу, прийнявши $\alpha = 7.5^\circ$ (опуклий пуансон) і $\alpha = -7.5^\circ$ (увігнутий пуансон). Всі інші параметри технологічного процесу були залишені без змін. Відповідні види поковок з лініями Лагранжа після остаточного переходу представлені на картинках в Таблиці 33. Значення улов β_1 і β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ орієнтації волокон при $\alpha = 7.5^\circ$ відповідно рівні $134,2^\circ$, $49,7^\circ$ і $94,75^\circ$, а при $\alpha = -7.5^\circ$ відповідно рівні $132,36^\circ$, $176,77^\circ$ і $34,83^\circ$. Варіант, коли кут $\alpha = -7.5^\circ$ є найкращим з трьох розглянутих варіантів, тому що специфіка роботи деталі така, що вона не працює на стирання в області вимірювання кута β_1 , а працює на стирання тільки в області вимірювання кута β_2 . Оскільки кут β_2 в цьому випадку близький до 180° , дана схема визнається оптимальною з точки зору волокнистої будови. Згідно з даними, наведеними в Таблиці 1, зміна показника β_2 з $87,7^\circ$ за заводською технологією, до 180° за пропонованою збільшить відносну стійкість до стирання розглянутої деталі мінімум на 17%. Далі можна переходити до оцінки енергосилових параметрів і здійснювати інші дії відповідно до розділу 4.1.

Таблиця 33.1 -

Характер спотворення волокнистої будови при висадці поковки «опора кульова» для автомобіля «Урал» в залежності від параметрів технологічного процесу ψ , γ , α

Діаметр вихідного прутка d , мм	Значення параметра α , кутовий градус		
	7.5°	0°	-7.5°
63 ($\Psi=5.2$, $\gamma=0.4$)			

4.3. Висновки до розділу 4

1. Розроблено науково обгрунтована методика проектування технологічного процесу висадки на ГКР поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з спрямованим волокнистою будовою. Методика проілюстрована у вигляді укрупненої блок-схеми, що включає такі етапи проектування як вибір типу обладнання, схеми технологічного процесу, конструювання поковки і штампового інструменту. В укрупненої блок-схемі методики показані зв'язку між основними етапами проектування, блоки перевірки умов на відповідність заданим технологічним і економічним критеріям.

2. Отримано таблиця волокнистих будівель при висадці поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем в залежності від конструктивно-технологічних параметрів процесу ψ , γ , α .

3. Розроблена методика проектування технологічних процесів штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем була продемонстрована на прикладі проектуванні технології виробництва поковки деталі опора кульова вантажного автомобіля УРАЛ.

Загальні висновки

1. На основі проведеного аналізу існуючих способів отримання направленої волокнистої будови запропонований технологічний процес штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем, що дозволяє управляти орієнтацією волокон при наступних конструктивно-технологічних параметрах: відносна довжина висадки $\psi = 2.5 \dots 5.4$, відносна товщина стінки півсфери $\gamma = 0.337 \dots 0.475$, кут нахилу деформуючої поверхні пуансона на попередньому штамповочном переході $\alpha = -7.50 \dots + 7.50$.
2. Розроблені регресійні моделі, що описують взаємозв'язок між запропонованими показниками орієнтації волокон $\beta_1, \beta_2, \beta_{\text{ср}}$ при різних значеннях відносної величини припуску на механічну обробку δ і конструктивно-технологічними параметрами, дозволяють оцінювати характер волокнистої будови в деталі з точністю $\pm 10\%$, що підтверджено експериментальними дослідженнями.
3. Аналіз сучасних методів розрахунку сил деформування показав, що найбільш раціональними методами розрахунку сил деформування при висадці поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем є метод кінцевих елементів і аналітичний метод розрахунку, заснований на методі пластичної течії, що дозволяють розраховувати силу висадки з точністю $\pm 20\%$.
4. Розроблена методика проектування дозволяє визначати конструктивно-технологічні параметри висадки на ГКР поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем, застосування яких дозволяє поліпшувати показники орієнтації волокон $\beta_1, \beta_2, \beta_{\text{ср}}$ в деталі і підвищувати її відносну стійкість до стирання до 20%.

Список літератури

1. Семенов Є.І., Зінов'єв І.С. Загальні вимоги до волокнистої будовою висаджених поковок // Вісник машинобудування. М. 1977. №11. С. 69-71.
2. QForm-універсальна і ефективна програма для моделювання кування і штампування / Н.В. Біба [и др.] // Ковальсько-штампувальне виробництво. Обробка матеріалів тиском. 2011. № 1. С. 36-42.
3. Брюханов О.М. Кування і об'ємне штампування. М. : Машинобудування, 1975. 408 с.
4. Біллігман І. В. Висадка і штампування: (Пер. з нім.). М. : Машіздат, 1960. 467 с.
5. Кування і штампування. Довідник в чотирьох томах / Под ред. Є.І. Семенова М. : Машинобудування, 1986. Т. 2. 592 с.
6. Навроцький Г. А. Холодна об'ємна штампування: Довідник. М. : Машинобудування, 1973. 628 с.
7. Белокуров О. А. Розробка методики проектування технологічного процесу штампування кільцевих поковок з спрямованим волокнистою будовою: дис. ... канд. техн. наук. М. 2004. 204 с.
8. Тюрін В. А. Теорія і процеси кування злитків на пресах. М. : Машинобудування, 1979. 240 с.
9. Штампування поковок з спрямованим волокнистою будовою / О.А. Банних [и др.] // Вісник машинобудування. 2000. № 10. С. 33-37.
10. Зінов'єв І.С. Дослідження формозміни і волокнистої будови при складальній висадці: дис. ... канд. техн. наук. М. 1973. 220 с.
11. Лахтін Ю.М. Металознавство і термічна обробка металів. М. : Металургія, 1976. 420 с.
12. Research on Effects of Uneven Macrostructure to Mechanical Properties in TC21 Forging / J. Li [et al.] // Materials Science Forum. 2013. V. 747. P. 823-827.
13. Hertzberg R. W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. New York: John Wiley & Sons, 1983. 697 p.

14. Hoagland R. G., Rosenfield A. R., Hahn G. T. Mechanisms of fast fracture and arrest in steels //Metallurgical Transactions A. 1972. V. 3, №. 1. P. 123-136.
15. Hahn G.T. and Rosenfield A.R. Metallurgical factors affecting fracture toughness of aluminum alloys //Metallurgical Transactions A. 1975. V.6, №4 P. 653-668.
16. Microstructural aspects of fracture by dimpled rupture / R. H. V. Stone [et al.] //International Metals Reviews. 1985. V. 30. №. 1. P. 157-180.
17. Яковлев С. П., Кухарь В. Д. Штамповка анизотропных заготовок. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
18. Раузин Я.Р. Влияние макроструктуры металла на контактную выносливость и долговечность подшипников качения // Контактная прочность машиностроительных материалов: Сб. научных трудов. М.: Наука, 1964. С. 51-55.
19. Тюрин В.А. Алгоритм построения технологииковки // Известия вузов Черная металлургия. 1974. №11. С. 123-125.
20. Троп А.А., Козин В.З., Прокофьев Е.В. Управление технологическими процессами обогатительных фабрик. М.: Недра, 1986. 315 с.
21. Шейн А.С. Влияние ориентировки волокна на контактную усталостную прочность закаленной стали // МиТОМ. 1957. № 12. С. 61-66.
22. Широких А.М. Разработка методики моделирования процессов горячей штамповки для проектирования технологии производства поковок из конструкционных сталей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 148 с.
23. Тетерин Г. П., Полухин П. И. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки. М.: Машиностроение, 1979. 284 с.
24. Лавриненко В.Ю. Разработка методики автоматизированного проектирования процессов высадки поковок типа стержня с шаровой головкой с направленным волокнистым строением: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 245 с.

25. Гудов А.А. Разработка методики проектирования технологического процесса высадки на ГКМ поковок типа стержня с фланцем с направленным волокнистым строением: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 148 с.
26. Определение силовых параметров процесса изотермической раскатки ответственных деталей газотурбинных двигателей / Р.Ю. Сухоруков [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 1. С. 116-122.
27. Use of the software deform 2D to model the process of rolling with vibration of the top work roll / M. M. Skripalenko [et al.] // Metallurgist. 2013. V. 56. №. 11-12. P. 844-847.
28. 3D rigid-plastic FEM numerical simulation on tube spinning/ Y. Xu [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 113. №1. P. 710-713.
29. Finite element analysis of rotary-die equal channel angular pressing/ S. C. Yoon [et al.] // Materials Science and Engineering. 2008. V. 490. №1. P. 289-292.
30. Diametrical growth in the forward flow forming process: simulation, validation, and prediction / X. Song [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. V. 71 № 1-4. P. 207-217.
31. Zhang, Yu, Zhi Guo An, and Lu Li. Numerical Simulation and Process Optimization of the Die Forging for the Center Wedge of the Railway Freight Car Buffers // Advanced Materials Research. 2011. № 228. P. 412-415.
32. Recent development of process simulation for industrial applications / J. Walters [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. 2000. V. 98. №. 2. P. 205-211.
33. Tang, J., Wu, W. T., & Walters, J. Recent development and applications of finite element method in metal forming // Journal of materials processing technology. 1994. V. 46. № 1. P. 117-126.
34. Integration of manufacturing process simulation with probabilistic damage tolerance analysis of aircraft engine components / R. C. McClung [et al.] // Presentation at AIAA SDM Conference. Honolulu. 2012.

35. Modeling Spin Testing Using Location Specific Material Properties / Bandar A. R. [et al.]. Presentation of Scientific Forming Technologies Corporation. Columbus OH. 2012.
36. Biba N., Stebounov S., Lishiny A. Cost effective implementation of forging simulation //Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 113. №. 1. P. 34-39.
37. Thermally and Mechanically Coupled Simulation of Metal Forming Processes/ S. Stebunov [et al.] //Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity. Aachen. 2011. P. 171-175.
38. The model for simulation of thermally, mechanically and physically coupled problems of metal forming / N. Biba [et al.] // STEEL RESEARCH INTERNATIONAL. 2012. – P. 1363-1366.
39. Biba N., Stebunov S., Lishny A. Simulation of material flow coupled with die analysis in complex shape extrusion //Key Engineering Materials. 2014. №585. P. 85-92.
40. Dynamic load-balancing of finite element applications with the drama library / A. Basermann [et al.] //Applied Mathematical Modelling. 2000. V. 25. №2. P. 83-98.
41. Buijk A. Enhanced capability of metal forming simulation tools a pioneering approach to simulate real process behavior. Detroit: Simufact-Americas L. L., 2005. 10 p.
42. Унксов, Е. П., Колмогоров В. Л., Огородников В.А. Теорияковки и штамповки. М.: Машиностроение, 1992. 727 с.
43. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос //монография Потапкин В.Ф. Краматорск: ДГМА, 2005. 315 с.
44. Панфилов Г. В., Недошивин С. В., Перминов Д. А. Анализ процесса холодной штамповки конических головных частей сердечников пуль аналитическим методом линий скольжения //Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №. 3. С. 218-222.