

ВСТУП

Станом на сьогодні 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 тощо. 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 відносно 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 СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ПОКОВОК З НАПРАВЛЕНОЮ СТРУКТУРОЮ У МАШИНОБУДУВАННІ

1.1 Вимоги, що пред'являються до якості поковок

Вимоги, що пред'являються до якості промислових поковок у машинобудуванні, обумовлені необхідністю забезпечити необхідний рівень міцності, пластичності, надійності в експлуатації, довговічності. Дані, необхідні для адекватного прогнозування довговічності та експлуатаційної надійності, можна отримати шляхом аналізу діючих навантажень – циклічних, динамічних або статичних. Іншими даними, необхідними для проектування штампованої деталі, є дані про характер ушкоджень, про види зношування, дефекти, втомну витривалість, вимоги до довговічності та тривалість експлуатації деталей.

Однією зі складових оптимізації проектування процесу гарячого об'ємного штампування поковок, котрі мають спрямовану волокнисту будову, є максимально ефективне використання резерву фізико-механічних характеристик матеріалу, що обробляється. Шляхом використання сучасних методів імітаційного моделювання вдається враховувати анізотропію фізико-механічних властивостей матеріалу, що обробляється. За рахунок цього з'являється можливість для більш раціонального використання наявних фізико-механічних властивостей металу, а це, у свою чергу, дає можливість збільшити довговічність штампованих виробів.

Теорія втомного руйнування передбачає визначення граничних напруг в деформованому матеріалі на основі фізико-механічних властивостей матеріалу, отриманих при одновісному розтягуванні. Після визначення цих властивостей визначаються значення максимальних напруг при циклічному навантаженні σ_{max} , амплітуда діючих напруг σ_a , або середнє значення напруг $\sigma_{пор}$. Згідно [2 – 4], оптимальне керування напрямком пластичної деформації металу при штампуванні та куванні валів дає можливість сформувати оптимальну мікроструктуру та макроструктуру, за рахунок чого досягається підвищення довговічності валів на 40-70%. Автори [5-8] вважають за необхідне включати в

нормативну технічну документацію, котра регламентує якість деталей, отриманих штампуванням та куванням, специфічні вимоги до орієнтації волокон металу у поковках.

1.2 Вплив волокнистої будови поковок на їхню якість

Станом на сьогодні одним з найважливіших завдань вітчизняного машинобудування є підвищення надійності та довговічності деталей, отриманих куванням та штампуванням. Це завдання може бути вирішене за рахунок створення специфічних умов пластичної течії металу та організації пластичного деформування металу у певному напрямку, котрий співпадає із основним напрямком зовнішнього навантаження.

Таким чином, мова йдеться про підвищення рівня робочих напруг без використання більш дорогих та дефіцитних конструкційних матеріалів, тобто без заміни вихідного матеріалу, з якого виготовляється поковка. Ефект підвищення припустимого рівня робочих напруг має досягатись за рахунок раціональної орієнтації волокон металу відносно зовнішнього навантаження. Такий підхід дає змогу більш ефективно використовувати комплекс фізико-механічних властивостей традиційних конструкційних матеріалів за умови, коли деталь сприймає неоднакові навантаження у різних напрямках.

Для проведення досліджень в даній магістерській роботі було використано заготовки, отримані шляхом пресування та прокатки литий заготовок. Ці методи обробки тиском сприяють подрібненню зерен та неметалевих включень, причому зерна витягуються у напрямку пластичного деформування. Інтенсивне витягування зерен у напрямку течії металу відбувається незважаючи на рекристалізацію, які є притаманною процесам обробки тиском у гарячому стані. Таке орієнтовне деформування призводить до формування волокнистості макроструктури, яка є основною причиною виникнення анізотропії властивостей і яка може зберігатись при наступній термічній обробці.

Слід зауважити, що така орієнтована структура може бути сформована лише за рахунок спрямованої течії металу при куванні або штампуванні. Важливим чинником, що впливає на загальний рівень фізико-механічних властивостей поковок з орієнтованою волокнистою структурою, є кут виходу волокон на поверхнях поковки, котрі контактують з інструментом, який здійснює деформацію. Остаточні кути виходу волокон залежать від режимів кування або штампування на заключних переходах. Тобто саме на заключних переходах деформування первинна волокниста структура поковки перетворюється у вторинну, остаточну структуру. Це обумовлено тим, що заключні переходи деформування виконуються при відносно невеликих температурах, коли процеси рекристалізації суттєво уповільнюються. Процес деформування повинен бути організований так, щоб волокна деформованого металу розташовувались перпендикулярно до робочих напруг стискання або розтягування, котрі виникають у процесі експлуатації деталі. Напрямок дії дотичних напруг має співпадати із напрямком, в якому розташовуються волокна [9 – 12].

При протіканні інтенсивної пластичної деформації при прокатці, волочінні, куванні, штампуванні округлі зерна і неметалеві включення витягуються в напрямку, в якому досягається найбільша інтенсивність пластичної деформації [13]. Згідно даних, наведених в роботі [13], підвищення опору руйнуванню виробів, отриманих куванням, можна досягнути у випадку, коли лінії пластичної деформації металу паралельні головним дотичним напругам і перпендикулярні до напрямку, в якому діють нормальні напруги.

Таким чином, можна казати про те, що процеси отримання заготовок куванням або штампуванням мають суттєві переваги перед ливарними процесами не тільки з точки зору технологічності, але й з точки зору можливості отримання без будь-яких додаткових витрат орієнтованої макроструктури, котра утворюється за наявності спрямованої деформації. Важливим є те, що напрямок розташування металевих волокон має узгоджуватись із напрямком, в якому діють нормальні та дотичні напруги. В

іншому випадку волокниста структура металу може спровокувати швидке його руйнування. Стосовно показників міцності та в'язкості руйнування можна казати про наявність наступної закономірності: у разі зростання міцності відбувається зниження пластичності та в'язкості руйнування (K_{ic}). Тобто збільшення міцності супроводжується підвищенням схильності до крихкого руйнування. Для підвищення в'язкості руйнування може бути використана додаткова термомеханічна обробка, яка дозволяє здійснити фрагментацію мікроструктури попередньо деформованого металу. Інший шлях підвищення в'язкості руйнування полягає в обмеженні вмісту шкідливих домішок, в першу чергу, неметалічних включень [14].

При плоскому напруженому стані для кількісної характеристики анізотропії механічних властивостей можна використовувати показник анізотропії $K_{ан}$:

$$K_{ан} = 1 - \left(\frac{\sigma_{T,0}}{\sigma_{T,45}} \right)^2, \quad (1.1)$$

де $\sigma_{T,0}$ і $\sigma_{T,45}$ – межі плинності матеріалу призматичних зразків, вирізаних відповідно під кутами 0 та 45 градусів до напрямку деформації, при випробуванні на стиснення в умовах плоского напруженого стану.

Для більшості матеріалів $K_{ан} = 0,2 - 2,7$ [15].

В роботі [16] було досліджено вплив орієнтації волокон на контактну витривалість шарикопідшипникових кілець, виготовлених зі сталі ШХ15СГ. Згідно результатів досліджень, контактна витривалість кілець з поперечним орієнтуванням волокон у 1,5-2 рази перевищує контакту витривалість кілець, в яких волокна орієнтовані паралельно до торця кілець. На рис. 1.1 наведено узагальнену графічну залежність довговічності підшипника від кута між напрямком розташування волокон та нормаллю до контактної площадки у зоні максимальних напруг. Максимальна довговічність спостерігається тоді, коли

цей кут близький до 90 градусів. При зменшенні цього кута довговічність підшипників різко зменшується.



Рисунок 1.1 – Залежність довговічності підшипника від кута між напрямком розташування волокон та нормаллю до контактної площадки у зоні максимальних напруг

Автори роботи [9] досліджували вплив розташування волокон на інтенсивність зношування при стиранні зразків з трьох різних сталей: 40Х, 45 і 38ХГНМ. Кути виходу волокон на робочу поверхню склали 0°, 45° і 90°. Результати випробувань наведено в табл. 1.1.

Згідно отриманих результатів, максимальна відносна зносостійкість спостерігається в зразках, в яких кут виходу волокон на робочу поверхню складає 0°. Мінімальні значення відносної зносостійкості спостерігаються на зразках, в яких волокна виходять на робочу поверхню під кутом 90°. Дані, наведені в табл. 1.1, у графічній формі представлені на рис. 1.2.

Детальне вивчення впливу орієнтації волокон у поковках на механічні властивості поковок, отриманих куванням, було проведене в роботі [18]. Дослідженню піддавались зразки, вирізані під різними кутами до вісі симетрії

поковок. При цьому було отримано різні значення як характеристик міцності, так і характеристик пластичності деформованого металу.

Таблиця 1.1 – Відносна зносостійкість зразків з різними кутами виходу волокон на робочу поверхню

Кут виходу волокон на робочу поверхню	Матеріал		
	Сталь 40Х	Сталь 45	Сталь 38ХГНМ
0° Паралельно Перпендикулярно	1,29 / 1,72	1,22 / 1,64	1,14 / 1,30
	1,16 / 1,60	1,21 / 1,64	1,06 / 1,24
45°	1,12 / 1,54	0,96 / 1,46	0,94 / 1,28
90°	1,07 / 1,42	0,76 / 1,42	0,76 / 1,24

Примітка: в чисельнику наведено значення відносної зносостійкості для зразків після відпалу; в знаменнику – після гартування та відпуску

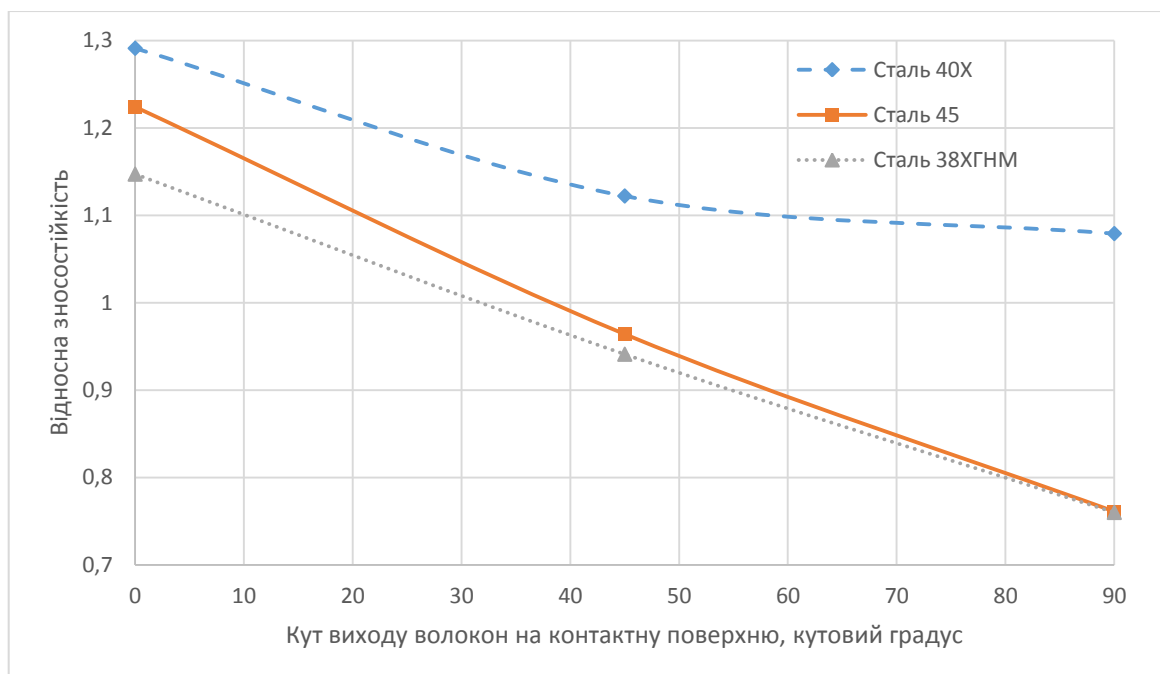


Рисунок 1.2 – Відносна зносостійкість попередньо відпалених зразків залежно від кута виходу волокон на робочу поверхню

Автори роботи [20] досліджували вплив способу виготовлення корпусів різців гірських комбайнів на волокнисту будову, а також на фізико-механічні властивості корпусів. Корпуси виготовлялись штампуванням, точінням та клинковою прокаткою. За результатами досліджень найбільш сприятлива волокниста будова корпусів різців досягається у тому випадку, коли ці корпуси виготовляються клинковою прокаткою. Саме при такому способі виготовлення досягається максимальна довговічність корпусів різців. В середньому, корпуси, виготовлені клинковою прокаткою, мали на 30 % більшу зносостійкість, ніж корпуси, виготовленні точінням та штампуванням.

Робота [21] містить результати механічних випробувань зразків зі сталі ШХ15 із різним кутом розташування волокон по відношенню до напрямку прикладання навантаження. Зразки розміром 4x20x60 мм піддавались гартуванню, а потім проходили випробовування на вигин (рис. 1.3). Результати випробувань наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Межа міцності на вигин зразків із загартованої сталі ШХ15 з різною орієнтацією волокон

Схема розташування волокон щодо прикладеного навантаження		
рисунок 1.3,а	рисунок 1.3,б	рисунок 1.3,в
213 МПа	152 МПа	124 МПа

Згідно даних, наведених в табл. 1.2, найменша межа міцності на вигин досягається у випадку, якщо волокна деформованого металу розташовані вздовж напрямку прикладання навантаження. В якості основної причини суттєвої розбіжності межі міцності на вигин в зразках, зображених на рис. 1.3, а та рис. 1.3, б, автори роботи [21] вбачають різний ступень неоднорідності напружено-деформованого стану. У зразках, зображених на рис. 1.3, а, ступінь цієї неоднорідності є значно більшим завдяки збільшенню ефективної глибини та кількості поверхневих дефектів.

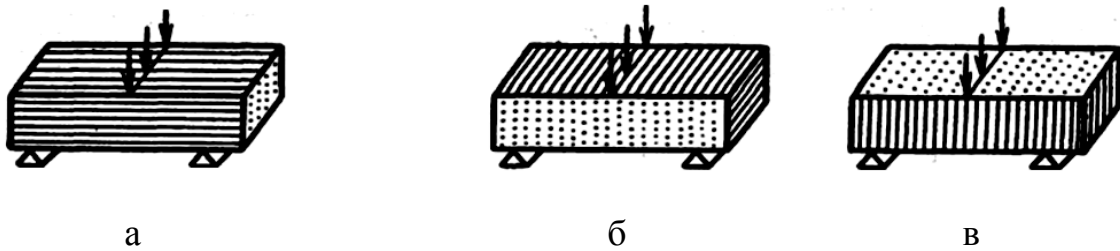


Рисунок 1.3 – Схема механічних випробувань (випробування на вигин):

а – волокна розташовані перпендикулярно до лінії дії зовнішнього навантаження та паралельно до площини, в якій діють нормальні напруги;

б – волокна розташовані перпендикулярно до лінії дії зовнішнього навантаження та до площини, в якій діють нормальні напруги; в – волокна розташовані паралельно лінії дії зовнішнього навантаження

1.3. Методи проектування поковок з орієнтованою волокнистою будовою

Дослідження проводились з використанням типових технологічних процесів гарячого штампування з інтенсивним осадженням заготовки. Використання типових технологічних процесів дозволяє отримати необхідну інформацію щодо основних технологічних переходів гарячого штампування заготовок з одночасним інтенсивним їх осадженням [5]. Принцип, за яким відбувається розбивка усього процесу штампування на окремі переходи, залежить від геометричної форми, розмірів деталі, а також вимог діючих стандартів. Попередньо визначається об'єм, геометрична форма та геометричні розміри вихідної заготовки; об'єм, геометрична форма та геометричні розміри поковки; температура та швидкість нагрівання заготовок; спосіб штампування; кількість технологічних переходів; тип технологічного оснащення; тип штампу; вид операцій заключної (фінішної) обробки.

Для проектування процесів гарячого штампування найчастіше використовують наступні програмні продукти [12]: Deform, Qform, Forge, Simufact. Математичною основою усіх цих програмних продуктів є метод кінцевих елементів. Однак, слід зауважити, що для вирішення задач моделювання інтенсивної пластичної деформації матеріалів можуть також

застосовуватись і інші методи: так, наприклад, можливим є використання методу ліній ковзання, методу верхньої та нижньої оцінки, методу Хілла [16].

Для опису волокнистої будови поковок, отриманих гарячим штампуванням з великим ступенем пластичної деформації можна використовувати функцію ліній Лагранжа (рис. 1.4).

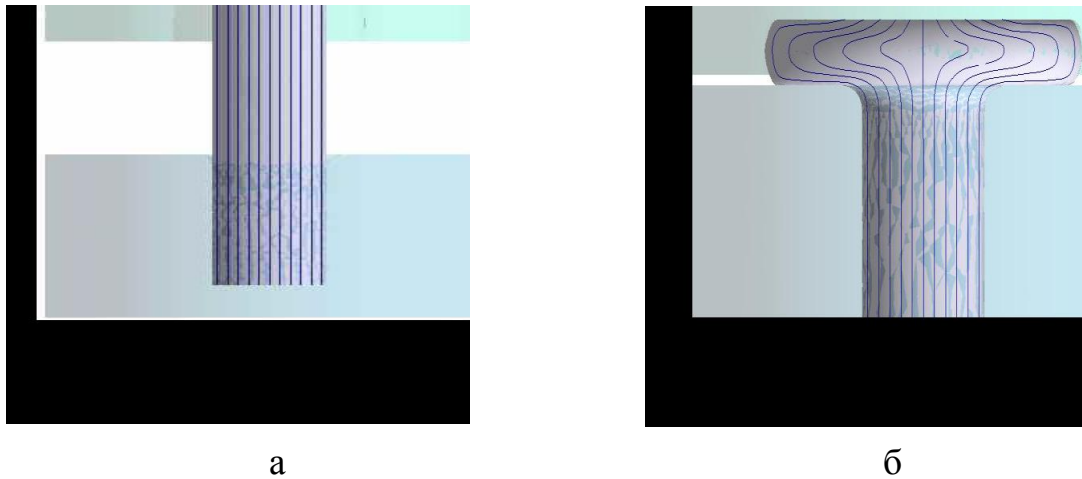


Рисунок 1.4 – Вид ліній Лагранжа при проектуванні поковок з волокнистою будовою, отриманих штампуванням з інтенсивним осадженням заготовки

У більшості прикладних програм, призначених для імітаційного моделювання процесів обробки металів тиском, наприклад, в програмному комплексі QFORM, не передбачено окремі функції, що дозволяють у режимі реального часу імітувати процес утворення волокнистої структури поковки. Саме тому найчастіше для визначення критеріїв, за якими прогнозується волокниста будова деформованих матеріалів, використовуються методи регресійного аналізу [7]. Причому відповідні регресійні рівняння можуть будуватись як за результатами експериментальних досліджень, так і за результатами імітаційного моделювання процесу інтенсивної пластичної деформації металу.

Математичною основою переважної більшості сучасних програмних продуктів, призначених для імітаційного моделювання процесів інтенсивної

пластичної деформації матеріалів, є метод кінцевих елементів. Цей метод базується на наступній системі рівнянь [58]:

Рівняння рівноваги у диференціальній формі:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad (1.2)$$

де ij – компоненти тензора напруг;

x – координата, в якій знаходиться тензор напруг;

Рівняння, що задають тензор швидкості пластичної деформації:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (1.3)$$

де $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненти тензора швидкості деформації,

v_i, v_j – проекція швидкості деформації.

Рівняння Леві – Мізеса, які задають зв'язок між напруженим та деформованим станом:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij}, \quad (1.4)$$

де $\dot{\varepsilon}$ – інтенсивність швидкості деформації;

σ'_{ij} – девіатор напруг.

Рівняння пластичності Мізеса (1.7):

$$\dot{\varepsilon}_v = 0, \quad (1.5)$$

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_s, \quad (1.6)$$

де $\dot{\varepsilon}_v$ – швидкість об'ємної деформації;

$\bar{\sigma}_s$ – напруга початку течії.

Модель пластичного тертя:

$$\tau_K = \begin{cases} \mu p: \mu p < mk \\ mk: \mu p \geq mk \end{cases} \quad (1.7)$$

де τ_K – зовнішня сила тертя;

μ – коефіцієнт тертя;

m – фактор тертя;

k – максимальні дотичні напруги у матеріалі, що деформується;

p – нормальний тиск з боку матеріалу, що деформується, на інструмент.

Систему рівнянь (1.2) – (1.7) в методі кінцевих елементів вирішують, зазвичай, з використанням функціоналу Маркова [9]:

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_F v_i p_i dF, \quad (1.8)$$

де V – об'єм матеріалу;

F – площа контактної поверхні;

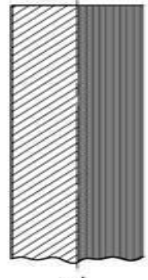
p_i – проекція питомої зовнішньої сили на відповідну координатну вісь.

1.4 Аналіз способів отримання поковок з волокнистою будовою

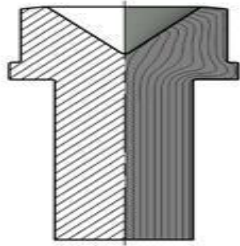
Волокнисту будову поковок отримують різними методами обробки матеріалів тиском [22 – 24]. В кільцях підшипників, отриманих гарячим штампуванням, волокна повинні проходити вздовж робочою поверхні, плавно обминаючи її та повторюючи її профіль.

При гарячому штампуванні заготовок кілець підшипників за типовим технологічним процесом в пуансоні не вдається уникнути виходу волокон деформованого металу на робочу поверхню кільця під кутом до неї (рис. 1.5) [22].

Виготовлення 1-го кільця



а

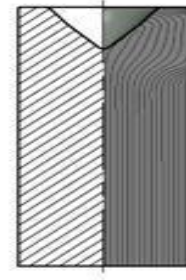


б

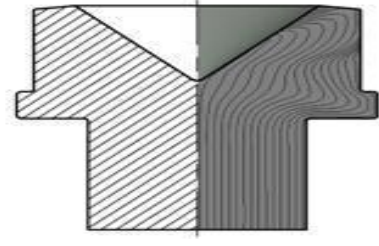


в

Виготовлення 2-го кільця



г



д



е

Рисунок 1.5 – Схема утворення волокнистої структури при гарячому штампуванні заготовок кілець шарикопідшипників в пуансоні: а – вихідний пруток без просічки; б – гаряче штампування; в – осадка; г – пруток після просічки; д – гаряче штампування; е – осадка

У разі гарячого штампування волокна деформованого металу в заготовці кільця підшипника не виходять на доріжку кочення, волокна розташовуються вздовж робочої поверхні (рис. 1.6). Вихід волокон на внутрішню поверхню кільця під кутом до неї не зменшує ресурс роботи підшипника, оскільки ця поверхня не є контактною, тобто вона не контактує з кульками.

Попередити вихід волокон на внутрішню поверхню кільця підшипника під кутом до цієї поверхні при штампуванні за типовим технологічним процесом неможливо.

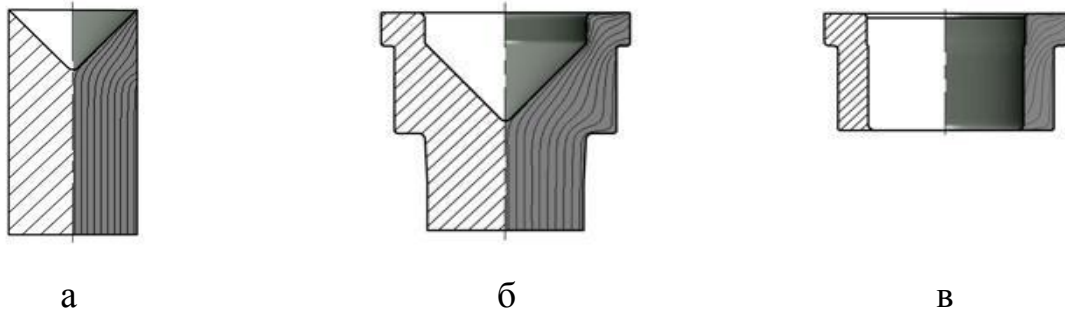


Рисунок 1.6 – Схема утворення волокнистої структури при гарячому штампуванні заготовок кілець шарикопідшипників в матриці: а – пруток з попередньо виконаною просічкою; б – штампування; в – осадка

Згідно [14] найоптимальнішим варіантом гарячого штампування кілець кулькових та роликових підшипників є штампування з використанням в якості заготовки трубного прокату. При цьому волокна розташовуються вздовж контактної поверхні, а не виходять на неї під кутом. Таке положення волокон деформованого металу відносно контактної поверхні підшипника суттєво підвищує його довговічність за рахунок збільшення контактної витривалості. При використанні заготовок інших типів, наприклад сталевих смуг, також вдається отримати оптимальне розташування волокон відносно контактної поверхні, але при цьому суттєво знижується коефіцієнт використання матеріалу, а також підвищується трудомісткість штампування.

Оптимальне розташування волокон деформованого металу також є дуже важливим фактором забезпечення високої контактної витривалості колінчастих валів, отриманих куванням [15]. Високі значення контактної витривалості можна отримати у тому разі, якщо кут виходу волокон (γ) на зовнішню поверхню шатунних шийок не перевищуватиме 10° (рис. 1.7).

Задля отримання симетричної спрямованої макроструктури у поковках типу “стрижень із фланцем” необхідно корегувати розміри та геометричну форму формоутворюючих поверхонь штампів [23]. Рекомендації щодо бажаних типів волокнистих структур у поковках “стрижень із фланцем” наведено в табл. 1.3, де ψ – ступінь висадки; D – діаметр фланця; H – висота фланця.

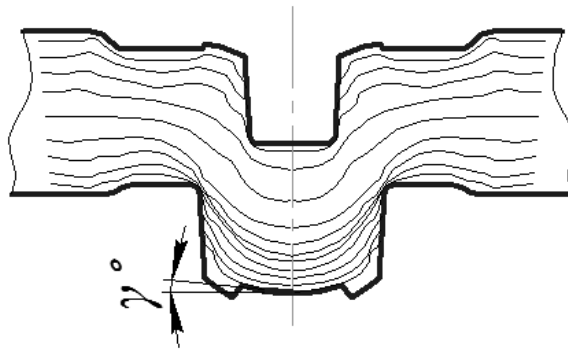
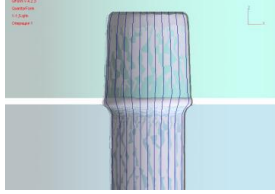
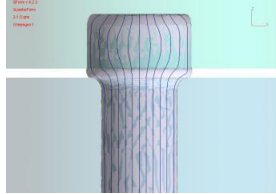
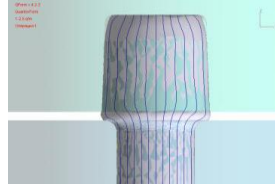
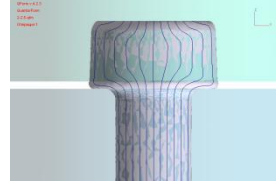
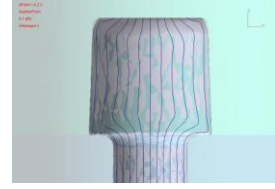
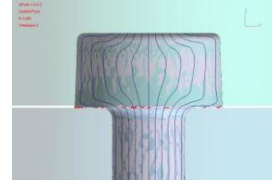


Рисунок 1.7 – Кут нахилу волокон в шийці колінчастого вала

Таблиця 1.3 – Утворення волокнистої структури у поковках типу “стрижень із фланцем”

Ψ – ступінь висадки		$\frac{D}{H}$	1	2
Висадка в один перехід	1,5	волокниста будова		
	2,5	волокниста будова		
Висадка з попереднім штампунням	4	волокниста будова		

1.5 Існуючі технології виробництва поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем

Якщо використовувати загальновідому класифікацію поковок [3, 5], поковки типу “стрижень із напівсферичним фланцем” можна віднести до групи поковок “стрижень із потовщенням”. Поковки цієї групи складають близько 20% від загальної кількості усіх поковок. Довжина тієї частини заготовки, яка

формується шляхом висадки (H), може змінюватись від $1,0D$ до $5,5D$, де D – діаметр у максимальному перетині заготовки. У разі, якщо H/D перевищує $2,5$, використовують схеми комбінованого штампування, коли окремі частини заготовки отримують на окремих технологічних переходах в різних за своєю конструкцією штампах.

Поковки типу “стрижень із фланцем” знаходять широке використання в автомобільній промисловості, наприклад до цієї групи поковок відносяться заготовки кульових шарнірів пневмоциліндрів (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Кульовий шарнір пневмоциліндра 40 DIN/ISO 6431:

а – загальний вигляд; б – схема конструкції шарніра

Типовим прикладом поковки типу “стрижень із фланцем” можна вважати кульову опору автомобіля КАМАЗ; ця кульова опора, виготовлена з конструкційної сталі 40Х, має вагу близько 30 кг. В якості заготовки під гаряче штампування використовується заготовка діаметром 95мм та довжиною 549 мм. Напівсферичний фланець формують за 4 переходи. Спочатку, на першому переході, отримують потовщення; в якості першого переходу використовують комбіновану висадку в пуансоні та в матриці. Протягом двох наступних технологічних переходів виконують прошивку, роздачу та видавлювання. Четвертий технологічний перехід, який виконується у чистовому штампі, призначений для остаточного формування напівсферичного фланця діаметром

235 мм при одночасному зворотному видавлюванні глибокої порожнини з невеликим ступенем деформації.

Схожа технологія штампування використовується для виготовлення кульової опори автомобіля «УРАЛ» [8]. На першому технологічному переході висаджують частину заготовки задля отримання двох конічних поверхонь (рис. 1.9, а). При виконанні другого технологічного переходу з двох конічних поверхонь шляхом осадки формується одна грибовидна поверхня; водночас з лівого торця виконується конусоподібне поглиблення (рис. 1.9, б). Третій технологічний перехід представляє собою прошивку-роздачу грибовидного елемента без зміни його довжини (рис. 1.9, в). На четвертому переході виконується остаточна прошивка, під час якої формується напівсферичне поглиблення, із одночасним зворотним видавлюванням (рис. 1.9, г).

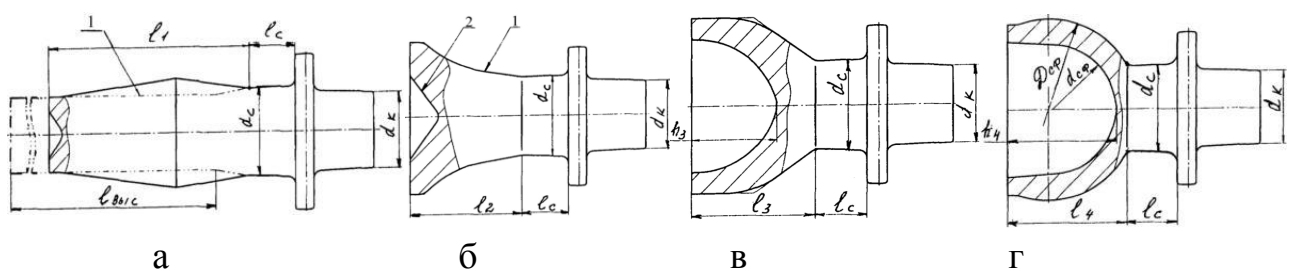


Рисунок 1.9 – Переходи штампування кульової опори автомобіля УРАЛ

Аналіз волокнистої структури свинцевих відштампованих заготовок доводить, що поєднання глибокої прошивки, роздачі та зворотного видавлювання забезпечує високу точність та стабільність геометричної форми та геометричних розмірів поволок (рис. 1.10). Тим не менш, лінії Лагранжа, які призначені для імітації волокон у свинцевих заготовках із попередньо нанесеною сіткою, не оминають внутрішню контакту поверхню напівсферичного фланця, а, навпаки, виходять під кутом не менше 70 градусів саме на цю поверхню.

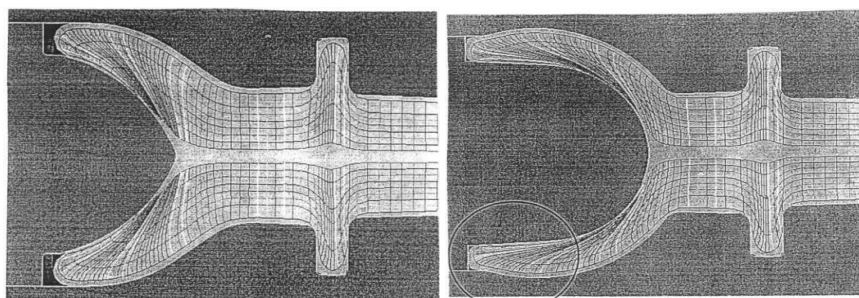


Рисунок 1.10 – Поперечні перерізи свинцевих поковок з попередньо нанесеною сіткою, котра імітує волокна

Вищезгадані поковки призначені для виготовлення відповідальних деталей – кульових опор, через які поворотний кулак з'єднується з важелями підвіски. До надійності таких деталей пред'являються дуже високі вимоги [6, 9], оскільки фактично від якості виготовлення цих деталей залежить безпека руху.

У роботі [7] розглядався варіант штампування напівсферичного фланця з листового прокату. Цей спосіб дозволяє отримати таке розташування волокон деформованого металу у поковці, яке є дуже близьким до оптимального. Але, водночас, листовий прокат може використовуватись в якості заготовки лише при відносно невеликій товщині напівсферичної частини кульової опори.

1.6 Способи оцінки волокнистої будови поковок, отриманих штампуванням

Процеси гарячого штампування можуть відрізнитись один від одного за різними параметрами: за тепловими режимами, за параметрами деформування – за діаметром заготовки, за довжиною частини заготовки, що піддається висадці, за кількістю переходів, за кінцевими розмірами поковки. При цьому важливим є те, що орієнтація волокон у відштампованих поковках залежить, головним чином, від неоднорідності пластичної деформації в об'ємі заготовки.

При виготовленні поковок, що мають напівсферичний фланець, використовуються наступні операції: осадка, закрите прошивання, роздача,

видавлювання [5]. Ці операції суттєво відрізняються між собою за характером пластичної деформації металу, при цьому саме сукупність усіх цих операцій, а не якась одна окрема операція, визначає остаточну орієнтацію волокон. Серед іншого, технологія штампування визначається такими факторами. На орієнтацію волокон впливають різні фактори: об'єм та маса вихідної заготовки, геометрична форма заготовки; відношення довжини тієї частини заготовки, котра піддається висаджуванню, до її діаметру l_b / d ; спосіб штампування (штампування окремо або в пуансоні, або в матриці або комбіноване штампування в пуансоні і в матриці).

Єдиної методики оцінювання волокнистої структури поковок не існує. В роботі [7] орієнтацію волокон в кільцях підшипників оцінювали по висоті ділянки, на якій відбувається вихід волокон на контактну поверхню кільця, та по куту, під яким волокна виходять на цю контактну поверхню. Авторами вищезгаданої роботи встановлено, що на орієнтацію волокон впливають наступні фактори: висота циліндричної ділянки пуансона (h); кут конічної ділянки пуансона (α); діаметр заготовки (d). Регресійне рівняння, яке пов'язує між собою вищезгадані фактори, має наступний вигляд:

$$Y_1 = 6,775 - 0,0875 \cdot h - 0,0461 \cdot h^2 + 0,0125 \cdot \alpha - 0,025 \cdot d, \quad (1.9)$$

Згідно цього рівняння найбільш суттєво на висоту ділянки, на якій відбувається вихід волокон на контактну поверхню кільця (Y_1), впливає висота циліндричної ділянки h формуютьуючого інструмента – пуансона. У разі збільшення h від 0 до 8 мм, Y_1 зменшується з 7,1 до 3,2 мм (в середньому зменшення складає 51 - 53 %). Для отримання підшипникових кілець з оптимальним розташуванням волокон рекомендовано використовувати пуансон з циліндричною передньою частиною, а у разі, якщо штампування виконується у пуансоні, використовувати протитиск, що прикладається до пуансона від окремої пружини.

В роботі [25], в якій досліджувалось формування направленої волокнистої структури у поковках типу стрижня з пласким фланцем при висадці, що виконується за один технологічний перехід, основними показниками, що визначають наявність симетрії у волокнистій структури, вважають максимальний зсув Δ_{max} центрального волокна, кута нахилу волокон до вісі штампованої заготовки у верхній частині фланця (рис. 1.11).

У разі, якщо висаджування виконується за декілька технологічних переходів, основними показниками, котрі характеризують ступінь симетричності волокнистої структури, автори роботи [25] вважають величину максимального зсуву Δ_{max} , величину середнього зсуву Δ_{cp} , котрий представляє собою середнє арифметичне усіх зсувів Δ_i , а також кут нахилу центрального волокна до вісі штампованої заготовки у верхній частині фланця.

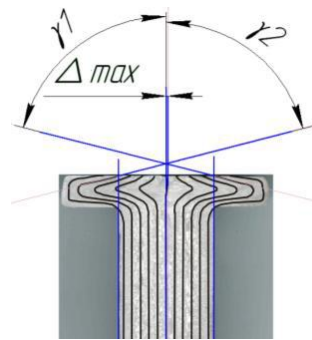


Рисунок 1.11 – Волокниста структура заготовки типу стрижня з фланцем

Для оцінки симетричності волокнистої макроструктури у фланцях, сформованих інтенсивним висаджуванням, у роботі [25] пропонують використовувати більш узагальнені показники – коефіцієнт максимального відносного зсуву та коефіцієнт середнього відносного зсуву:

$$K_{max} = \frac{\Delta_{max} \cdot D}{d_{зар} \cdot H}, \quad (1.10)$$

$$K_{cp} = \frac{\Delta_{cp} \cdot D}{d_{зар} \cdot H}, \quad (1.11)$$

де H – висота фланця, сформованого при висадці;

D – діаметр фланця, сформованого при висадці;

$d_{\text{заг}}$ – діаметр заготовки;

Зсув Δ_{max} та зсув $\Delta_{\text{ср}}$ визначались шляхом вимірювання при аналізі макрошліфів.

Дослідження, проведені в роботі [25], дозволили отримати три регресивні рівняння, за якими можна розрахувати коефіцієнт максимального відносного зміщення K_{max} , коефіцієнт відносного середнього зміщення $K_{\text{ср}}$ та кут нахилу волокон до центральної вісі поковки у верхній частині фланця ($\gamma_{\text{ср}}$) залежно від відносної довжини тієї частини заготовки, яка піддається висадці (ψ) та відношення D/H :

$$K_{\text{max}} = \frac{\left(-0,466 + 0,036 \frac{D}{H} \psi - 0,037 \frac{D}{H} + 0,205 \psi\right)}{d} \cdot \frac{D}{H}, \quad (1.12)$$

$$K_{\text{ср}} = \frac{\left(-0,801 + 0,035 \frac{D}{H} \psi - 0,134 \frac{D}{H} + 0,161 \psi\right)}{d} \cdot \frac{D}{H}, \quad (1.13)$$

$$\gamma_{\text{ср}} = 7,123 + 4,197 \frac{D}{H} + 11,249 \psi - 0,301 \frac{D}{H} \psi, \quad (1.14)$$

При висадці заготовок з величиною $\psi = 1,5$ та при $\frac{D}{H} = 1; 2; 4; 8$ спотворення волокнистої структури майже відсутнє (при цьому значення K_{max} і $K_{\text{ср}}$ залишаються практично постійними та не перевищують відповідно 0,0181 і 1,2115). У разі збільшення ψ до 2,5, волокниста структура спотворюється більш інтенсивно (значення K_{max} і $K_{\text{ср}}$ знаходяться відповідно в наступних межах: 0,005 - 0,188 та 0,44 - 0,770).

У разі збільшення ψ до 4 відбувається суттєва зміна характеру спотворення волокнистої структури. При $\psi = 5,4$ та $\frac{D}{H} = 8$ спостерігається майже

суцільне спотворення волокнистої структури. Для цього випадку $K_{max} = 0,7601$, $K_{cp} = 0,5084$.

Кут нахилу волокон γ зі збільшенням ψ та відношення $\frac{D}{H}$ (це відношення береться для фланця) стрімко збільшуються; максимальні значення кута нахилу волокон досягаються при $\psi = 5,4$ та $\frac{D}{H} = 8$ (найбільше значення $\gamma = 88,4404$).

1.7 Висновки по розділу 1

1. Аналіз літературних даних показав, що існуючі дослідження процесів виготовлення поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем не враховують наявність волокнистої текстури у поковках. Тим не менш, волокниста структура в значній мірі визначає міцність, довговічність та надійність деталей, що виготовляються з отриманих поковок. У зв'язку з цим, проектування технологічних процесів поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем доцільно проводити з урахуванням наявної волокнистої структури.

2. Аналіз способів отримання поковок з направленою волокнистою структурою та існуючих технологій виготовлення поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем показав недостатню вивченість впливу основних технологічних параметрів процесу висадки на процес формування волокнистої структури.

3. При розробці технологічних процесів штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем до сьогодні ніхто не ставив за мету цілеспрямоване отримання направленої волокнистої структури поковок із максимально сприятливим розташуванням волокон. Тому питання визначення критеріїв оцінювання параметрів волокнистої структури поковок та дослідження впливу схеми деформування на волокнисту структуру поковок є актуальним.

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 системи м для проведення обчислювального експерименту

Для проведення обчислювального експерименту у вигляді імітаційного моделювання процесів формоутворення поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з метою виявлення основних факторів, що впливають на процес формування волокнистої структури поковок, було обрано систему DEFORM.

У порівнянні з іншими аналогічними системами система DEFORM має наступні переваги:

- Наявність вбудованих інструментів побудови сіток Лагранжа, котрі імітують волокнисту структуру поковок.
- Можливість оцінити траєкторію руху частинок матеріалу під час усього циклу деформування, що є надважливим для отримання коректного кінцевого профілю волокнистої текстури.
- Наявність безлічі вбудованих моделей тертя, зокрема моделі тертя Амантона-Кулона та Зібеля.
- Гнучкі інструменти побудови сіток кінцевих елементів, в тому числі автоматична перебудова сітки при її деградації в зв'язку з надвеликими деформаціями.
- Можливість написання окремих підпрограм.
- Простий та зручний інтерфейс.

2.2 Створення моделі для проведення обчислювального експерименту

Для проведення досліджень процесу висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем зі спрямованою волокнистою структурою в якості

модельного матеріалу використовували алюміній марки 1050А у відпаленому стані. За даними, наведеними в роботах [2, 3, 5, 9], використання алюмінію в якості модельного матеріалу дозволяє отримати адекватні результати, оскільки алюміній при холодній обробці має майже такі ж самі механічні властивості, що і більшість конструкційних сталей в умовах гарячого деформування. Хімічний склад алюмінію марки 1050А наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад алюмінію марки 1050А (АД-0)

Вміст елементів, %, не більше						
Al	Fe	Si	Zn	Mn	Cu	Mg
≤99,5	0,17	0,1	≤0,06	0,01	0,1	0,02

У роботі досліджувались наступні процеси обробки тиском: висадка напівсферичного фланця при відсутності втрати стійкості заготовки за один технологічний перехід (мається на увазі відсутність вигину вісі заготовки); висадка за декілька технологічних переходів в умовах обмеженої втрати стійкості в залежності від відносної довжини заготовки, яка піддається висаджуванню. Імовірно, при таких умовах проведення висадки можливе отримання сприятливої симетричної волокнистої структури поковки.

Механічні властивості алюмінію марки 1050А у відпаленому стані наведено в табл. 2.2. У чисельнику наведено результати випробувань на розтягування по ГОСТ 1497-84, у знаменник – довідкові дані [4].

На рис. 2.1 наведене 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.

При моделюванні процесу формоутворення поковок у системі DEFORM вирішуються системи диференціальних рівнянь (1.2) - (1.7). При цьому завдання мінімізації функціоналу (1.8) вирішується шляхом визначення швидкості переміщень вузлів кінцевих елементів вісесиметричної сітки.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості алюмінію марки 1050А (АД-0)

Тимчасовий опір σ_s , МПа	Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне подовження після розриву δ_5 , %	Відносне поперечне звуження після розриву φ , %	Модуль пружності 1-го роду E, 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.					

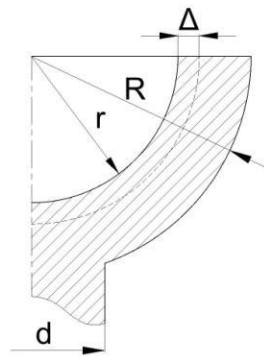


Рисунок 2.1 – Прийняті позначення розмірів поковки

Для проведення імітаційного моделювання процесу формоутворення поковки достатньо задати:

1. Конфігурацію робочих порожнин штампів.
2. Початкову форму заготовки.
3. Криву деформаційного зміщення матеріалу заготовки.
4. Фактор тертя між заготовкою та штампом (по моделі тертя Амантона-Кулона або Зібеля).
5. Зміну швидкості руху механізму головного виконавчого преса.

Для визначення розподілу волокон у діаметральній площині поковки використовували вертикальні лінії Лагранжа (функція Flownet), які імітують волокнисту структуру поковки і «деформуються» одночасно з поковкою.

Для дослідження напружено-деформованого стану та енергосилових параметрів висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем використовували поля розподілу деформацій, швидкостей деформацій, опору деформації у заздалегідь визначених перетинах та по зовнішній поверхні поковки, а також графіки зміни сили та роботи деформування, отримані безпосередньо в системі DEFORM.

Основні результати імітаційного моделювання: картина заповнення робочої порожнини штампа матеріалом, що деформується; поле волокнистої текстури поковок по кожному технологічному переходу; поля розподілу деформацій, швидкостей деформацій, напруг; графіки зміни сил і робіт деформування.

Вихідні дані для моделювання:

- двовимірна геометрична модель інструменту і заготовки;
- характеристики обладнання: гідравлічний прес, $V_{\text{деф}} = 60$ мм/хв;
- матеріал заготовки - алюміній 1050А;
- модель тертя Зібеля, фактор тертя $m = 0,3$;
- температура заготовки та інструменту в процесі деформації 20°C ;
- відсутність теплообміну.

Властивості матеріалу задавались у табличному вигляді з використанням кривих деформаційного зміцнення матеріалу заготовки (табл. 2.3) при температурі 20°C .

На рис. 2.2 в якості прикладу наведено геометричну модель заготовки і деформуючого інструменту при висадці напівсферичного фланця за один технологічний перехід. Волокна вихідної структури спрямовані вздовж поздовжньої вісі заготовки.

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

Якщо висадка виконується за декілька технологічних переходів, існує можливість варіювати способи виконання цих переходів з метою отримання

оптимальної орієнтації волокон. Тому на початковому етапі дослідження необхідно було обрати схему штампування.

Таблиця 2.3 – Опір деформації алюмінію марки 1050А (АД-0)

накопичена деформація ($\bar{\epsilon}$), мм/мм	Напруга течії (σ_s), МПа
0	55,158054
0,2	73,77391
0,3	83,42652
0,4	91,01079
0,5	97,21607
0,6	102,7318
0,7	107,5582
0,8	111,6950
0,9	115,8319
1	119,279
1,1	119,279

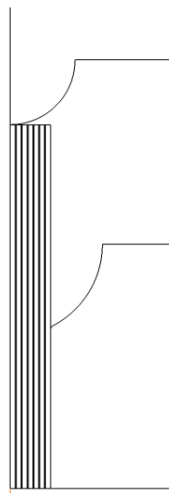


Рисунок 2.2 – Модель заготовки і деформуючого інструменту

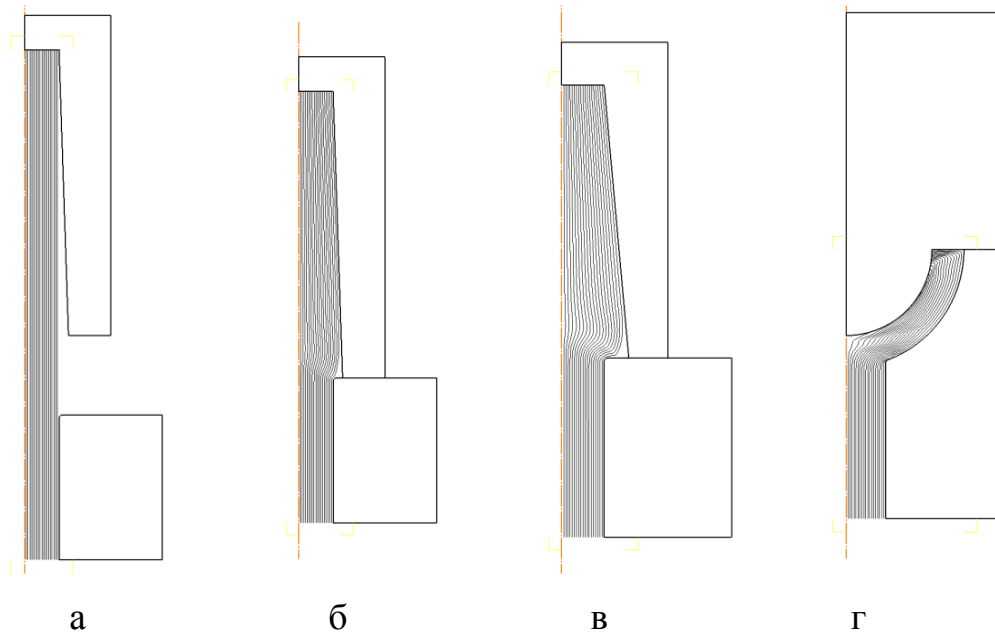


Рисунок 2.3 – Комп'ютерне моделювання комбінованої висадки за 2 технологічні переходи при $\psi = 5,4$, $\gamma = 1,9$: а – вихідна заготовка; б – перший перехід; в – другий перехід; г – остаточна висадка

Оцінку схем штампування здійснювали на основі показників орієнтації волокон поковки, в якості яких вибрали кути β_1 і β_2 між дотичними, проведеними до робочої поверхні пуансона в точці виходу волокон на робочу поверхню пуансона (рис. 2.4). Кут β_1 вимірювали між дотичними на відстані по дузі у 5° від верхньої кромки фланця, кут β_2 вимірювали між точками дотику, розташованими від вісі симетрії поковки на відстані, що дорівнює радіусу заготовки.

Вибір саме цих критеріїв обумовлюється конструктивними особливостями контактної пари кульового пальця і кульової опори. Найчастіше верхню частину сферичної поверхні кульового пальця видаляють обробкою різанням, а в нижній частині кульової опори виконують 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 взяти саме кут β_2 в якості показника орієнтації волокон.

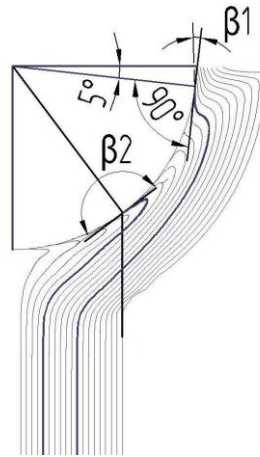


Рисунок 2.4 – Схема вимірювання кутів орієнтації волокон β_1 і β_2

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, вочевидь, що поряд з віссю півсфери, у даному місці відбувається найбільш інтенсивне пластичне деформування на заключній стадії формування півсфери. Ця обставина може суттєвим чином вплинути на волокнисту текстуру поковки. У зв'язку з цим оцінка орієнтації волокон в цьому місці також є доцільною. Відступ у 5° від верхньої кромки фланця обумовлений можливою обробкою цієї кромки різанням.

В якості інтегрального показника, який характеризує кут виходу волокон на контактну поверхню було обрано β_{cp} – середнє арифметичне кутів β між дотичними, проведеними по контуру пуансона в зоні вимірювання між кутами β_1 і β_2 . Надалі кути β_1 , β_2 , β_{cp} і β будемо називати кутами орієнтації волокон. Кут орієнтації волокон β_{cp} обчислюється за наступною формулою:

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

де n – кількість волокон у зоні вимірювання.

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

Вочевидь, якщо штампування проводиться у гарячому стані, радіуси внутрішньої та зовнішньої півсфер поковки будуть відрізнятись від радіусів внутрішньої та зовнішньої півсфер деталі на величину припуску на механічну обробку. Це може призвести як до погіршення показників β_1 , β_2 і β_{cp} в деталі у порівнянні з аналогічними показниками у поковці, так і до їхнього покращання. У зв'язку з цим доцільним є вимір кутів β_1 , β_2 і β_{cp} не тільки на робочій поверхні пуансона, але й на деякому радіусі $r + \Delta$, де Δ визначається величиною припуску на механічну обробку (рис. 2.1).

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

При комп'ютерному моделюванні були випробувані рекомендовані в довідковій літературі [5] схеми штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем. Розглянуто три схеми: витяжка півсфери з плоского фланця (рис. 2.5, а), зворотне видавлювання півсфери з прутка за один перехід (рис. 2.5, б) або видавлювання півсфери після попередньої конічної висадки, видавлювання півсфери після попереднього формоутворюючого переходу (рис. 2.5, в).

Аналіз орієнтації волокон в готовому виробі дозволив зробити висновок про необхідність виконання попереднього формоутворюючого переходу (рис. 2.5, в), оскільки саме ця схема формоутворення забезпечує найоптимальнішу волокнисту текстуру поковки.

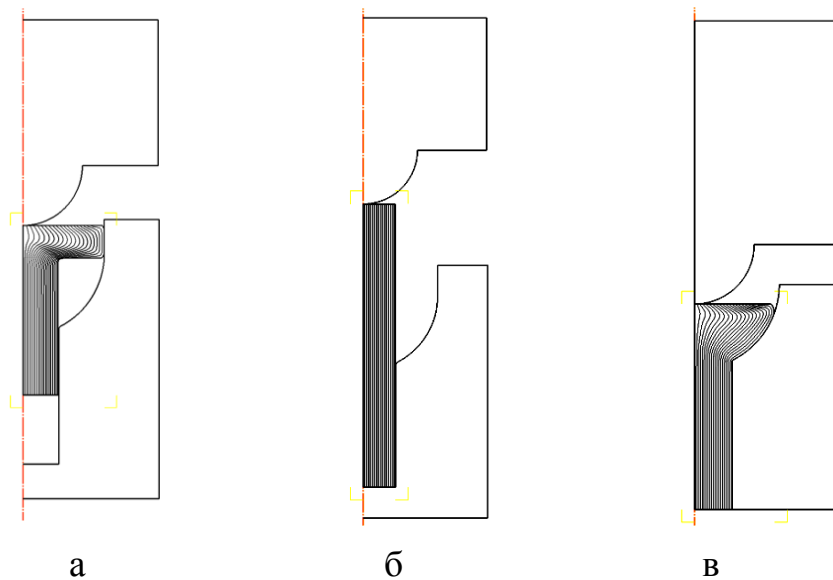


Рисунок 2.5 – Схеми штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем

В результаті витягування півсфери з плоского фланця досягається значне ущільнення волокон в місці переходу від стрижня до фланця, при цьому спостерігається вихід волокон на робочу поверхню пуансона під кутами, близькими до 90° (рис. 2.6, а). При зворотному видавлюванні півсфери з прутка волокниста структура є більш рівномірною у порівнянні зі способом, що був розглянутий вище. Однак при цьому у верхній частині півсфери спостерігається вихід волокон на робочу поверхню пуансона під кутами, близькими до 90° (рис. 2.6, б). Найоптимальніша орієнтація волокон та найбільш рівномірний їх розподіл досягаються при виконанні попереднього формоутворюючого переходу (рис. 2.6, в). При цьому волокна рівномірно та плавно огинають робочу поверхню пуансона.

На першому етапі розрахунків досліджували формоутворення поковки при висадці вихідної заготовки плоским пуансоном у матрицю; у цьому випадку форма поковки повністю відповідає формі робочої порожнини матриці на кінцевому переході.

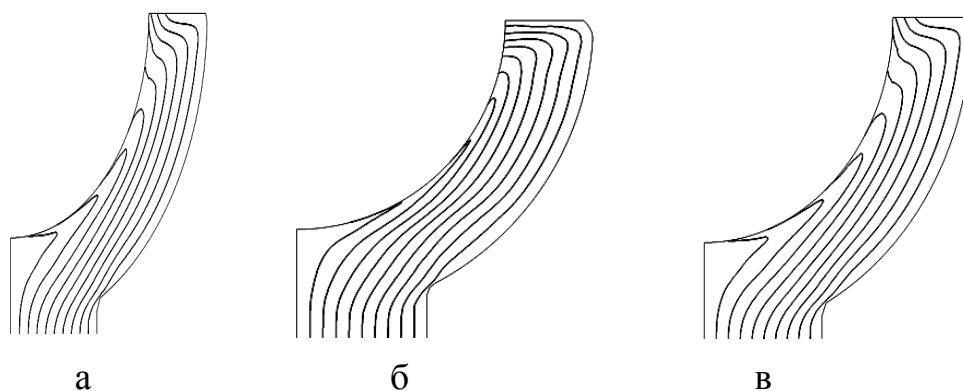


Рисунок 2.6 – Волокниста структура поволок типу стрижня з напівсферичним фланцем при різних схемах деформування

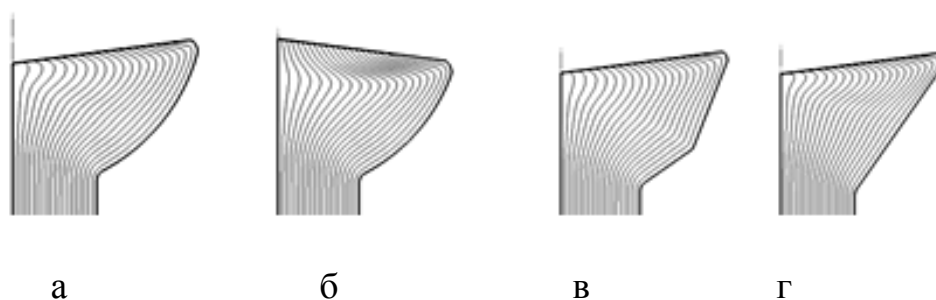


Рисунок 2.7 – Різновиди волокнистої структури поволок після попереднього штампування у додатковому формувальному струмку

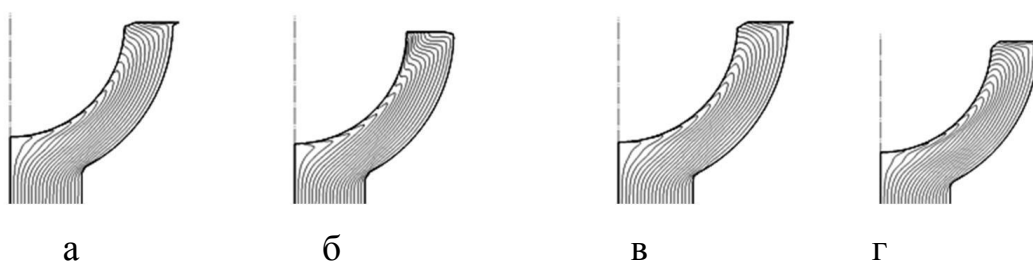


Рисунок 2.8 – Волокниста структура поволок типу стрижня з напівсферичним фланцем при різних схемах деформування

На додаток до вищенаведеного дослідження було проведене дослідження впливу форми пуансона при виконанні додаткового штампувального

формоутворюючого переходу. На рис. 2.7 наведено результати моделювання формоутворення поковки при виконанні додаткового штампувального формоутворюючого переходу для різних форм пуансона та матриці, а на рис. 2.8 – волокнисту структуру поковки на завершальному етапі формоутворення.

Результати моделювання показують, що варіювання форми матриці (рис. 2.7, в і г) не призводить до покращення волокнистої структури поковки у порівнянні зі схемами, представленими на рис. 2.5, в та 2.7, а, б. Крім того, дивлячись на результати моделювання, отримані для різної форми пуансона, можна зробити висновок про те, що кути нахилу волокон до робочої поверхні пуансона визначається співвідношенням між об'ємами металу, який деформується у матриці та при контакті з пуансоном.

Результати, представлені на рис. 2.6 і 2.8, свідчать про те, що при штампуванні стрижня з напівсферичним фланцем за всіма схемами деформування волокна плавно огинають зовнішній контур півсфери, в той час як внутрішній контур, що працює на стирання, волокна огинають значно гірше. Це обумовлено тим, що швидкість течії матеріалу по пуансону значно перевищує швидкість течії матеріалу у матриці. Для аналізу цієї гіпотези в ході чисельного експерименту були заміряні положення і швидкості руху частинок матеріалу в кінці ходу деформування (рис. 2.9, 2.10). Слід пояснити, що рис. 2.10 представляє собою шість графіків зміни швидкостей матеріальних точок металу в кінці ходу деформування в залежності від віддаленості початкової координати x_0 даної точки від вісі заготовки. Кожен з 6 графіків відповідає певному початковому положенню точок по висоті вихідної заготовки (від $y = 43$ мм до $y = 147$ мм).

Також необхідно зазначити, що кут нахилу деформуючою поверхні пуансона α при попередньому штампуванні у додатковому формувальному струмку (рис. 2.7, а, б) суттєво впливає на кут нахилу волокон до поверхні пуансона в чистовому струмку (рис. 2.8, а, б).

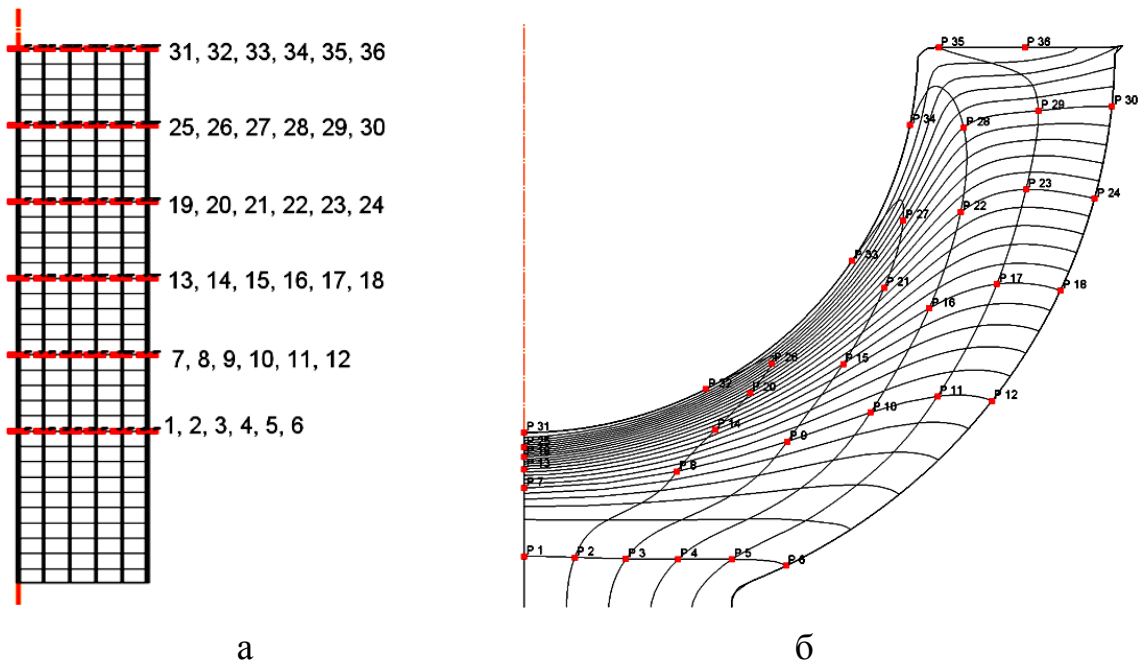


Рисунок 2.9 – Положення частинок матеріалу при штампуванні за один перехід поковки типу стрижня з напівсферичним фланцем:
 а – в заготівлі; б – в готовій поковці

Швидкість деформації, мм/с

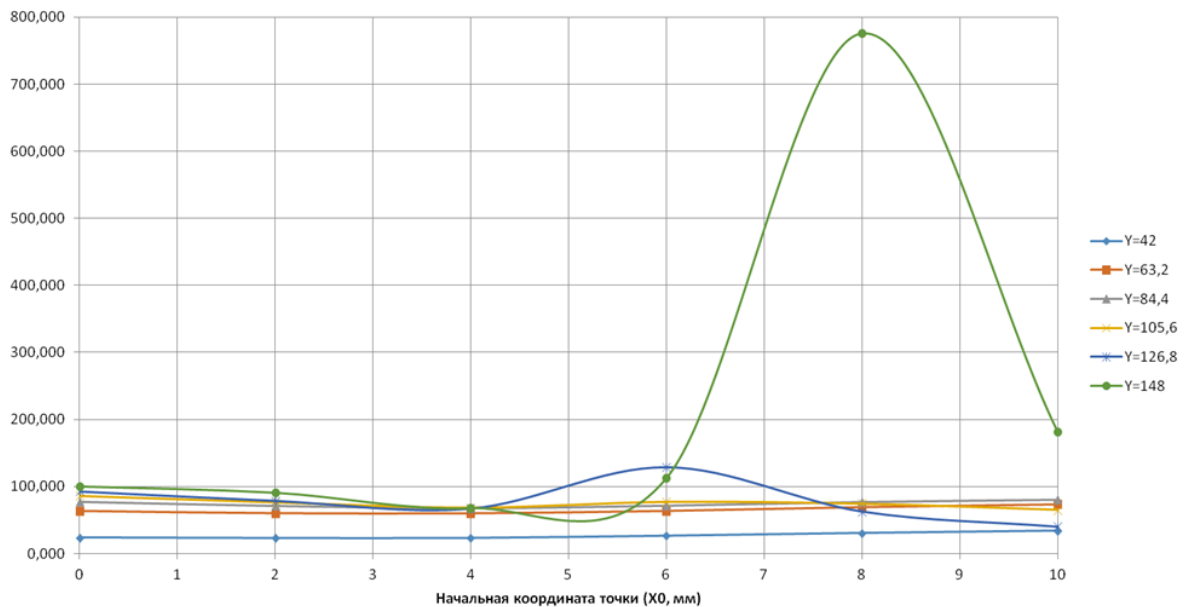


Рисунок 2.10 – Значення швидкостей матеріальних точок в кінці ходу деформування

2.4 Визначення кореляційної залежності між показниками орієнтації волокон у поковках з алюмінію АД 0 та сталі 45

Для перевірки можливості застосування результатів комп'ютерного 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 провели комп'ютерне моделювання процесу холодної висадки поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з алюмінію марки АД-0 і гарячої висадки аналогічної поковки зі сталі 45 [7] при $\psi = 2,5$; $\alpha = 0^\circ$ і $\gamma = 0,337$. Температура нагрівання сталеві заготовки становила 1100°C . Фактор тертя по моделі тертя Зібеля: $m = 0,3$. В табл. 2.4 наведені дані по опору пластичної деформації сталі 45 [8].

Таблиця 2.4 – Опір пластичної деформації сталі марки 45

Накопичена деформація (ε), мм / мм	Напруга течії (σ_s), МПа	
	При інтенсивності швидкості деформації $\varepsilon = 1.6 \text{ c}^{-1}$	При інтенсивності швидкості деформації $\varepsilon = 40 \text{ c}^{-1}$
0	86,35	114,775
0,1	88,64	126,713
0,2	90,94	138,651
0,3	92,21	146,095
0,4	93,33	152,235
0,5	94,33	156,878
0,6	94,60	160,389
0,7	95,52	164,054
0,8	95,70	166,493

На рис. 2.11 показані лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон для сталевий і алюмінієвої поковок.

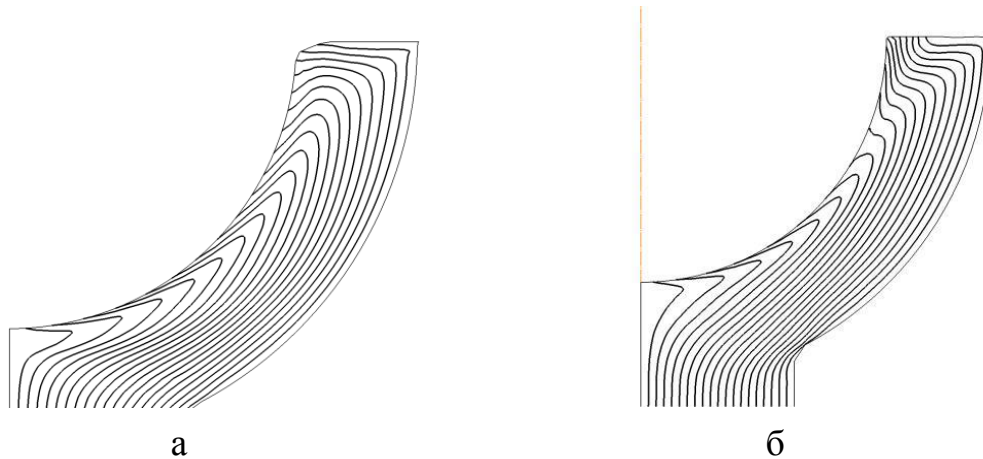


Рисунок 2.11 – Лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон для сталевий (а) і алюмінієвої (б) поковок

За методикою, наведеною в параграфі 2.2, було визначено кути β , що характеризують орієнтацію волокон (по всій контактній поверхні пуансона) (табл. 2.5).

Використовуючи програмне забезпечення Microsoft Excel для розрахунку коефіцієнта кореляції, визначили, що коефіцієнт парної кореляції r за 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 (об'єм вибірки);

x і y – значення кутів β в сталевий і в алюмінієвої поковках відповідно.

Для перевірки значимості коефіцієнтів кореляції використовували розподіл Ст'юдента [2]:

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

де r – коефіцієнт кореляції;

N – об'єм вибірки;

t_T – табличний критерій Ст'юдента.

Таблиця 2.5 – Значення кутів β , що характеризують орієнтацію волокон в сталевій та в алюмінієвій поковці

Номер волокна	β , град.	
	Сталь 1045	Алюміній 1050А
1	169,3	170,9
2	171,4	166,1
3	173,5	174,8
4	173,6	177,0
5	174,5	178,9
6	171,6	174,3
7	171,8	175,9
8	169,7	177,5
9	170,5	177,6
10	163,4	177,3
11	163,4	168,6
12	160,9	50,46
13	157,4	13,95
14	105,5	9,34
15	98,34	12,5

Якщо нерівність виконується, тобто розрахунковий критерій Ст'юдента більше табличного, то гіпотезу про кореляційної зв'язку приймають. Табличний критерій Ст'юдента визначають з числа ступенів свободи f , яке дорівнює об'єму вибірки, зменшеному на дві одиниці, тобто $f = N - 2 = 15 - 2 = 13$, при рівні значущості $q = 5\%$. З таблиці, представленої в роботі [2] при $f = 13$ та $q = 5\%$, маємо $t_T = 2,16$. Розрахунковий критерій Ст'юдента становить 5,17, отже, між

кутами орієнтації волокон поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем із сталі і алюмінію існує прямий кореляційний зв'язок.

Єдиною відмінністю комп'ютерної моделі висадки вихідної заготовки з алюмінію марки АД-0 та сталі 45 була реологічна модель матеріалу (модель опору пластичній деформації). З цього стає очевидним, що основною причиною виникнення незначної розбіжності у волокнистій будові напівсферичного фланця в поковці з алюмінію і та зі сталі є зміцнення матеріалу в процесі пластичного деформування. Для більш детального вивчення впливу цього ефекту була побудована комп'ютерна модель процесу гарячої висадки заготовки зі сталі 45, для якої реологічна модель зміцнення може бути представлена у наступному вигляді:

$$\sigma_s = c|\dot{\varepsilon}|^n|\varepsilon|^m + y, \quad (2.4)$$

де σ_s – напруга течії матеріалу;

c – інтенсивність швидкості деформації;

$|\varepsilon|$ – накопичена деформація;

y , c , n і m – поправочні коефіцієнти.

Для більш точного урахування ефекту зміцнення матеріалу на процес утворення волокнистої текстури у напівсферичному фланці коефіцієнти рівняння (2.4) визначали за довідниковими даними [11]. Значення коефіцієнтів рівняння (2.4) для різних сталей, в тому числі для сталі 45, отримані апроксимацією даних, наведених у роботі [11] (табл. 2.6).

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 урахуванням опору пластичному деформуванню, наведено на рис. 2.12.

Таблиця 2.6 – Коефіцієнти рівняння (2.4), що характеризують динаміку зміцнення конструкційних матеріалів по мірі накопичення в них пластичних деформацій при $T=1100^{\circ}\text{C}$

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

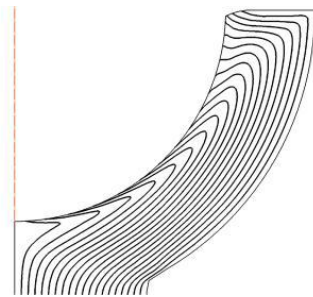


Рисунок 2.12 – Лінії Лагранжа, що характеризують орієнтацію волокон в поковці зі сталі45 з урахуванням її можливого зміцнення при збільшенні швидкості деформування

Візуальне порівняння результатів моделювання, отриманих з використанням реологічної моделі, представленої в табл. 2.4, яка враховує як ефект деформаційного зміцнення матеріалу, так і ефект зміцнення матеріалу при зростанні швидкості деформації (рис. 2.11, а), і з використанням реологічної моделі, представленої в табл. 2.6, яка враховує лише зміцнення

матеріалу при збільшенні швидкості деформування (рис. 2.12), дозволяє констатувати схожість розподілу ліній Лагранжа в обох випадках. Більш точне визначення кутів виходу волокон на внутрішній радіус півсфери показує, що відхилення значень кутів β , отриманих з використанням двох вищевказаних реологічних моделей, не перевищує 5 % (для сталі 45).

Надалі було досліджено виключно вплив зміцнення матеріалу поковки при збільшенні швидкості деформування на розподіл волокон. З табл. 2.6 видно, що для різних сталей коефіцієнт m , котрий визначає ступінь зміцнення матеріалу, що деформується, залежно від швидкості деформування, знаходиться в межах від 0,15 до 0,3. Однак для більш точної оцінки впливу зміцнення матеріалу поковки, обумовленого зростанням швидкості деформування, на розподіл волокон, коефіцієнтом m варіювали на чотирьох рівнях: $m = 0$ ($\sigma_s = 90$ МПа), $m = 0,1$; $m = 0,25$ та $m = 0,5$. Інші коефіцієнти, що входять до рівняння (2.4), брали без змін – такими, як вони вказані в табл. 2.6. Лінії Лагранжа, отримані при різних значеннях коефіцієнта m , наведено на рис. 2.13.

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 .

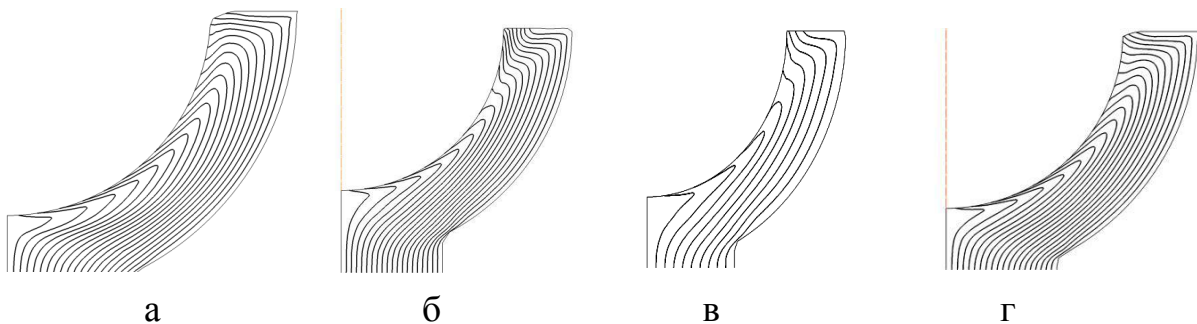


Рисунок 2.13 – Лінії Лагранжа при: а – $m=0$; б – $m=0.1$; в – $m=0.25$; г – $m=0.5$

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

В якості цільової функції для імітаційного експерименту було обрано кути нахилу волокон β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$.

Відбір факторів, котрі впливають на значення вищезначених кутів, проводили, спираючись на результати комп'ютерного моделювання процесу формоутворення поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем з алюмінієвого сплаву АД-0. При цьому варіювалися наступні параметри в наступних межах: відносна довжина заготовки, яка піддається висадці (ψ) – л від 2,5 до 5,4; кут нахилу робочої поверхні пуансона на попередньому (додатковому) штампувальному переході α – від -15° до $+15^\circ$; відносна товщина стінки півсфери γ – від 0,337 до 0,475; фактор тертя m за моделлю тертя Зібеля – від 0,1 до 0,5. Вплив вищеназваних параметрів на значення кутів β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ наведено на рис. 2.14 - 2.17.

Комп'ютерне моделювання показало нелінійну залежність кутів орієнтації волокон β_1 , β_2 і $\beta_{\text{ср}}$ від таких параметрів заготовки та поковки як відношення довжини тієї частини заготовки, що піддається висадці, до її діаметру Ψ , від розмірів сферичної частини поковки γ , від кута нахилу α робочої поверхні пуансона на попередньому штампованому переході і від фактору тертя m . Вочевидь, що в умовах масового і великосерійного виробництва варіювання фактором тертя для отримання в поковках направленої волокнистої структури є недоцільним, оскільки збільшення фактору тертя зменшує стійкість штампового інструменту. У зв'язку з цим в подальшому усі розрахунки проводились при постійному факторі тертя $m = 0,3$. Це значення фактору тертя є характерним для гарячого об'ємного штампування більшості конструкційних сталей [8].

Крім того, в ході аналізу впливу перерахованих вище факторів на формування волокнистої структури поковок, було встановлено наступне: якщо кут нахилу робочої поверхні пуансона при виконанні попереднього штампувального переходу дорівнюватиме $+15^\circ$, при формоутворенні півсфери є

висока ймовірність витікання матеріалу на плоску поверхню матриці (рис. 2.18).

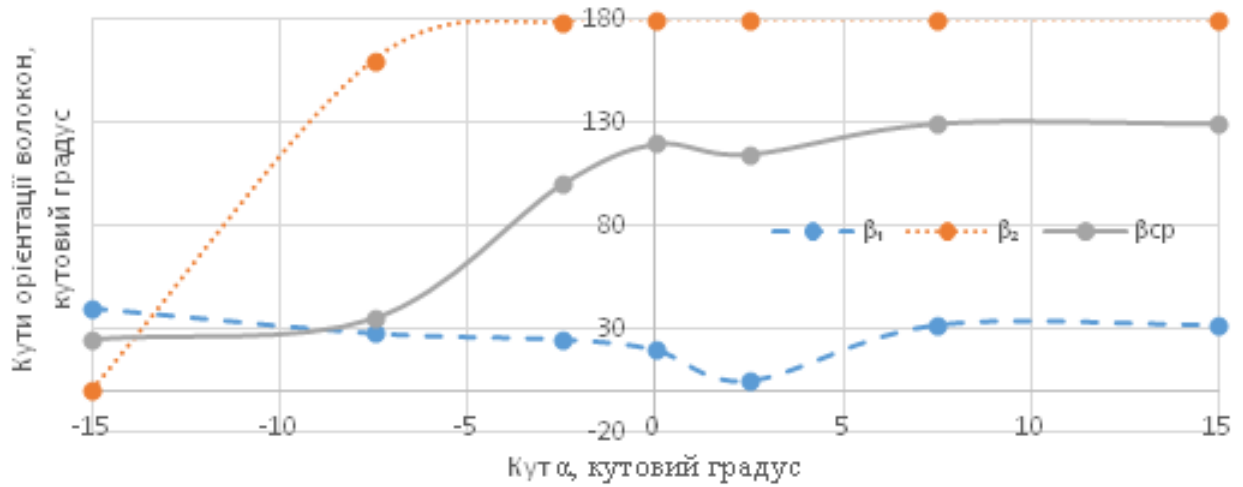


Рисунок 2.14 – Залежність кутів орієнтації волокон β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ від кута нахилу робочої поверхні пуансона α при виконанні попереднього штампованого переходу: $\Psi = 2,5$, $m = 0,3$ і $\gamma = 0,337$

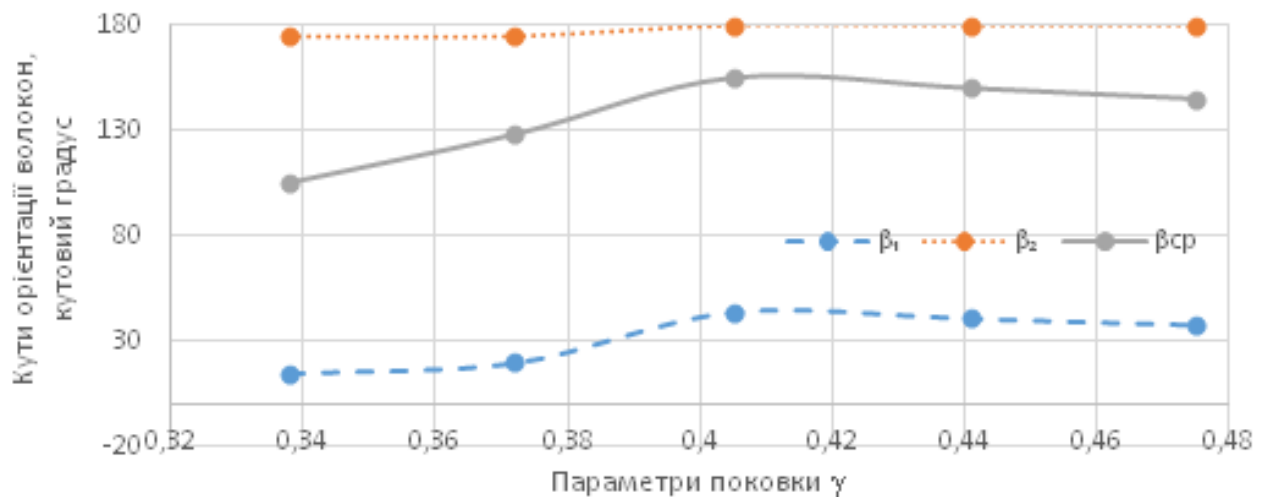


Рисунок 2.15 – Залежність кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ орієнтації волокон від параметра поковки γ при $\alpha_0 = 2,5^0$, $m = 0,3$ і $\Psi = 2,5$

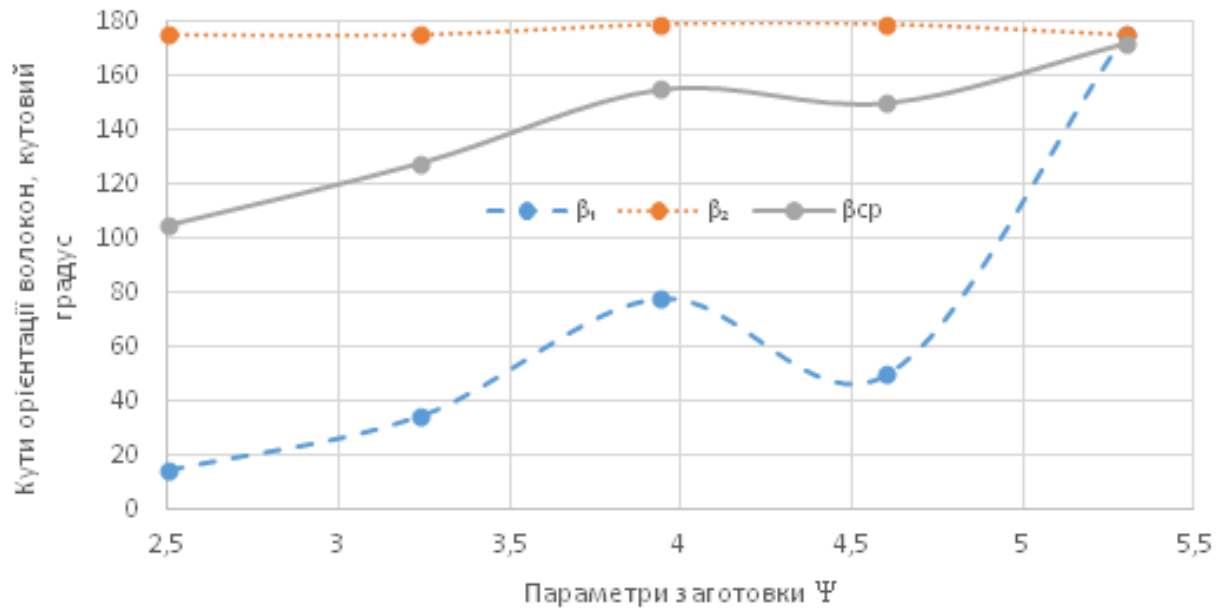


Рисунок 2.16 – Залежність кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ орієнтації волокон від параметра заготовки Ψ при $\alpha = 2,5^0$, $m = 0,3$ і $\gamma = 0,337$

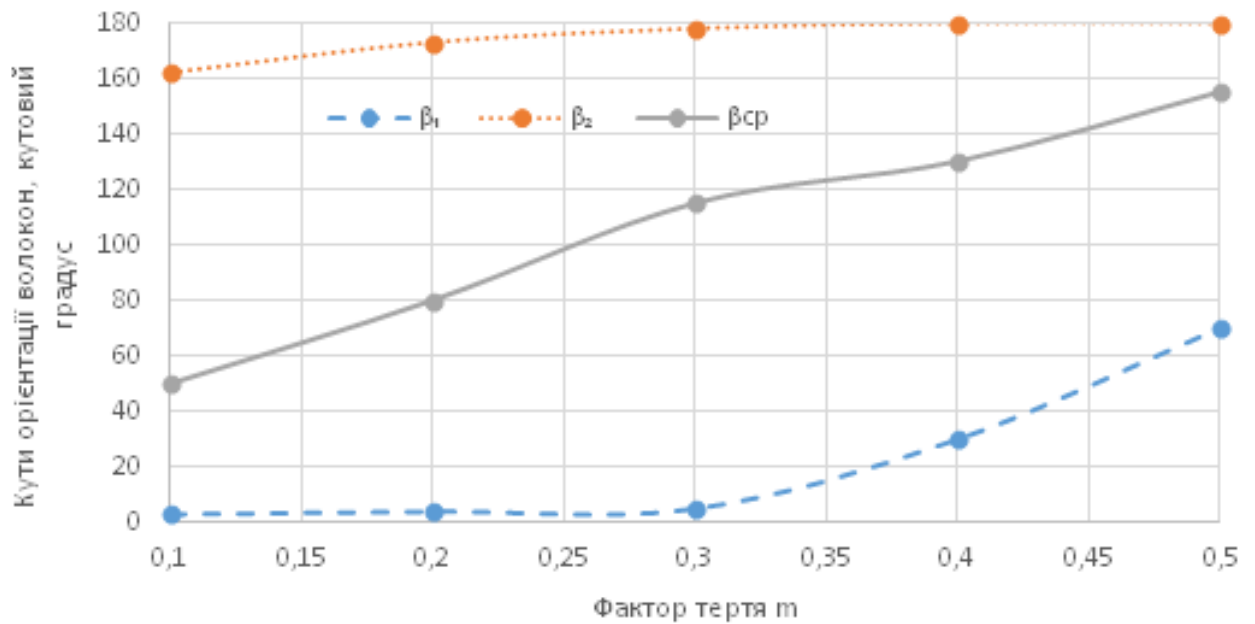


Рисунок 2.17 – Залежність кутів β_1 , β_2 і $\beta_{ср}$ орієнтації волокон від фактору тертя при $\alpha = 2,5^0$, $\Psi = 2,5$ і $\gamma = 0,337$

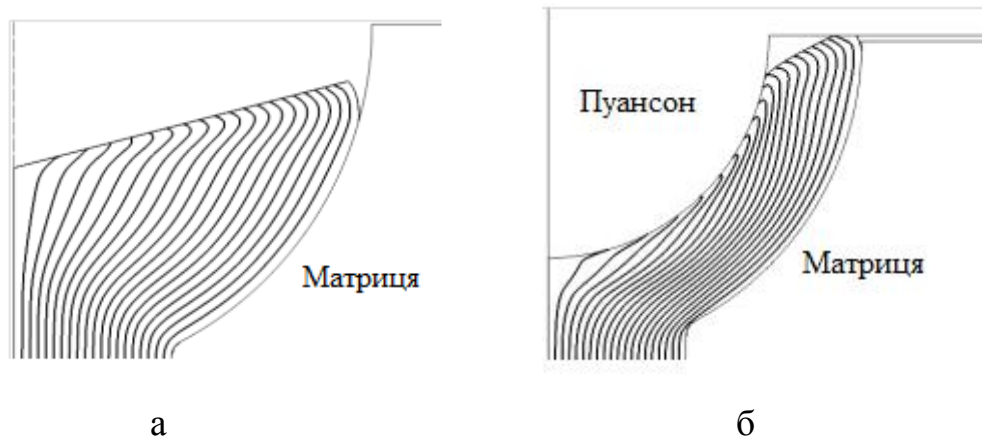


Рисунок 2.18 – Волокниста будова поковки при $\Psi = 2,5$, $\gamma = 0,337$ і $\alpha = +15$;
 а – після попереднього штампувального переходу;
 б – момент торкання торця півсфери до робочої поверхні пуансона

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 по розділу 2

1. Створена вісесиметрична модель об'єкта дослідження, що включає в себе двовимірну геометричну модель інструменту і заготовки, реологічну модель модельного матеріалу заготовки (алюмінієвого сплаву 1050А і сталі 45) і модель тертя Зібеля між заготівлею та інструментом.

2. Для оцінки орієнтації волокон в поковках запропоновані три показника: кути β_1 і β_2 між дотичними, проведеними у точках виходу волокон на робочу поверхню пуансона, і середній кут $\beta_{\text{ср}}$.

3. Проаналізовано відомі схеми штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем. Запропоновано нову схему штампування, котра забезпечує ефективне керування деформацією металу і, як наслідок,

формування необхідної волокнистої структури. Досліджено вплив форми пуансона при виконанні попереднього штампувального переходу на розташування волокон в готовій поковці. Встановлено, що кут нахилу робочої поверхні пуансона при виконанні попереднього штампувального переходу суттєвим чином впливає на орієнтацію волокон відносно робочої поверхні пуансона на завершальному етапі деформування.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИСАДКИ ПОКОВОК ТИПУ СТРИЖНЯ З НАПІВСФЕРИЧНИМ ФЛАНЦЕМ НА ОСНОВІ ЧИСЕЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

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 β_{cp} , 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 [2-6]. При цьому, при побудові математичної моделі у вигляді рівняння регресії, коефіцієнти рівняння повинні бути підібрані таким чином, щоб точність передбачення значень досліджуваної змінної була однакою в будь-якому напрямку факторного простору. Зазначені вимоги сформульовані як умови ортогональності і рототабельності (точність передбачення значень функції відгуку однакою на рівній відстані від центру і не залежить від напрямку обходу [6]):

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

Всім перерахованим вище умовам відповідають матриці плану повного факторного експерименту (ПФЕ), в тому числі ПФЕ 2^3 (варіювання трьох факторів на двох рівнях) з кількістю дослідів $N = 8$ [2].

Повний факторний експеримент і відповідні розрахунки проводили за методикою, викладеною в роботі [2] шляхом обчислювального експерименту на основі комп'ютерної моделі процесу гарячої висадки поковок типу стрижня з

напівсферичним фланцем. Матеріал заготовки - сталь 45. Змінні фактори були позначені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Відповідність між факторами варіювання в натуральному і кодованому масштабі

Назва фактору	Короткий опис фактору	Позначення в натуральному масштабі	Позначення в кодованому масштабі
Відносна довжина висадки	Відношення довжини тієї ділянки заготовки, яка піддається висаджуванню, до діаметру прутка вихідної заготовки (l/d)	Ψ	X_1
Кут нахилу пуансона на попередньо муштампованому 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

Основний X_0 , верхній X_v та нижній X_n рівні факторів, а так само інтервали варіювання ΔX представлені в табл. 3.2.

Кодовані значення верхнього та нижнього рівня факторів $+1$ і -1 відповідно:

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

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

Таблиця 3.2 – 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 натуральному 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

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

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (3.4)$$

Матриці планування і розширена матриця, а також результати вимірювань кутів представлені в табл. 3.3. 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 досліду ($m = 2$) 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.

Таблиця 3.3 – Матриця планування, робоча матриця і результати вимірювання кутів β_1 , β_2 и β_{cp} при $\delta = 0$

№	Матриця планування							Робоча матриця			β_1 , градус		β_2 , градус		β_{cp} , градус	
	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	X_1	X_2	X_3	Y_{11}	Y_{12}	Y_{21}	Y_{22}	Y_{31}	Y_{32}
	Ψ	α	γ					Ψ	α	γ						
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	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	0,377	83,1	83,15	166,66	166,58	119,93	119,78

Коефіцієнти b_i рівняння регресії (3.4) розраховувались за наступною формулою:

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

де N – кількість дослідів;

m – кількість паралельних дослідів;

X_{iu} – кодування значення факторів;

y_{uk} – значення досліджуваних змінних по паралельним дослідом.

За аналогічними залежностями розраховували і коефіцієнти b_{ij} і b_{ijk} .

Результати розрахунків коефіцієнтів b_i , b_{ij} і b_{ijk} рівнянь регресії при різних значеннях відносної глибини вимірювання кутів виходу волокон δ наведені в табл. 3.4.

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

Оцінку помилки дослідів (оцінку дисперсії відтворюваності).

Оцінку значущості коефіцієнтів b_i , b_{ij} і b_{ijk} .

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 дослідів S_0^2 оцінювали по паралельним дослідом. Спочатку розраховували построківі дисперсії S_u^2 і перевіряли їхню однорідність. Розрахунок рядкової дисперсій S_u^2 виконували за формулою [8]:

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

де y_u – построківі середні значення досліджуваної змінної.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків b_i , b_{ij} і b_{ijk} рівняння регресії для кутів β_1 , β_2 и β_{cp} при різних значеннях 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	14,1	-7,13	-10,94	3,34	3,47	-0,53
0.05	β_1	124,0	37,0	10,4	-14,5	-7,0	5,4	0,9	7,0
	β_2	143,0	12,7	-9,25	-30,0	-11,5	10,15	-12,8	-10,6
	β_{cp}	138,0	22,0	-3,7	-23,8	-9,0	10,15	-7,0	-5,2
0.075	β_1	122,0	34,0	-0,6	-18,4	-12,5	4,6	-6,15	-1,5
	β_2	135,0	1,25	-32,15	-35,0	-2,45	-1,2	-35,8	-1,7
	β_{cp}	132,0	15,9	-15,9	-26,4	-5,8	3,7	-18,6	-2,05
0.1	β_1	116,21	34,2	13,09	-19,03	-11,0	1,53	7,76	-9,9
	β_2	113,0	-0,16	-51,0	-15,0	-1,61	-1,56	-16,41	0,31
	β_{cp}	116,0	16,6	-31,6	-16,1	-4,95	1,8	-9,5	-4,9
0.15	β_1	116,0	8,75	-36,2	-19,8	-6,6	19,85	10,45	-12,8
	β_2	55,0	-0,13	-29,35	0,65	0,05	0,05	0,58	-0,08
	β_{cp}	80,8	9,65	-28,9	-3,0	-9,25	3,7	0,35	0,02
0.2	β_1	91,5	8,5	-16,5	-11,15	-6,1	-2,6	4,0	8,0
	β_2	23,0	0,25	0,8	6,25	-0,25	0,15	-3,4	-0,25
	β_{cp}	57,6	4,0	-8	-3,16	-3,6	-1,56	1,4	4,3

Результати розрахунків по кожній досліджуваній змінній представлені в табл. 3.5.

Однорідність порядкової дисперсії була оцінена за критерієм Кохрена. Розрахункове значення критерію Кохрена G_p визначали за наступною формулою [8]:

Таблиця 3.5 – 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

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

де $S_u^2 \max$ – максимальна дисперсія з усіх дисперсій по N рядках матриці планування.

Табличне значення критерію Кохрена G_t знаходили за даними роботи [3] 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 табл. 3.6.

Оскільки $G_p < G_t$, була прийнята гіпотеза про однорідність дисперсій і S_0^2 розраховували за формулою [2]:

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

Таблиця 3.6 – Розрахункові і табличні значення критерію Кохрена

Досліджувана змінна ($\delta = 0$)	Розрахункове 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 досліду по експериментам для кожної з досліджуваних величин представлені табл. 3.7.

Далі проводили оцінку значущості коефіцієнтів рівняння регресії.

Спочатку розраховували дисперсію $S_{b_i}^2$ коефіцієнтів за формулою [4]:

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

Таблиця 3.7 – Значення дисперсії помилки досліду при $\delta = 0$

досліджувана змінна	Розрахункове значення дисперсії помилки, S_0^2
β_1	0,0237
β_2	0,0033
β_{cp}	0,0081

Далі було вироблено обчислення розрахункового значення критерію Ст'юдента для оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Розрахункове значення t_{ip} критерію Ст'юдента визначали для кожного з коефіцієнтів за формулою [2]:

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

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

Табличне значення критерію Ст'юдента t_T визначали при $f_0 = N(m-1)$ при $q = 5\%$ згідно з даними, наведеними в [2]. При $f_0 = 8$ і $q = 5\%$ табличний критерій Ст'юдента дорівнює $t_T = 2,31$. В табл. 3.8 представлені розрахункові значення критерію Ст'юдента для коефіцієнтів рівняння регресії по кожній з досліджуваних змінних.

Всі розрахункові значення критерію Ст'юдента перевищують табличне значення критерію, тобто, отже, всі фактори визнаються значущими. далі проводили оцінку адекватності рівнянь математичних моделей по кожній з досліджуваних змінних.

В остаточному вигляді рівняння (3.4) для кутів нахилу волокон можна записати наступним чином:

$$\beta_1 = 128.7 + 37.12X_1 + 13.0X_2 - 10.16X_3 - 14.82X_1X_2 + 4.7X_1X_3 + 3.82X_2X_3 + 0.7X_1X_2X_3 \quad (3.11)$$

$$\beta_2 = 172.5 + 3.03X_1 + 3.97X_2 - 1.1X_3 - 0.23X_1X_2 + 0.12X_1X_3 + 0.35X_2X_3 + 0.17X_1X_2X_3 \quad (3.12)$$

$$\beta_{cp} = 151 + 20.55X_1 + 14.1X_2 - 7.1X_3 - 10.94X_1X_2 + 3.34X_1X_3 + 3.47X_2X_3 - 0.5X_1X_2X_3 \quad (3.13)$$

Таблиця 3.8 – Розрахункові значення критерію Ст'юдента 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	11,2	343,85
b_{13}	86,42	5,81	104,81
b_{23}	70,17	16,95	109,17
b_{123}	70,17	8,2	16,73

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

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

де l число членів рівняння регресії, що залишилися після оцінки значущості коефіцієнтів;

y_u – розраховане за рівнянням регресії значення досліджуваної змінної.

В табл. 3.9 наведені построківі експериментальні і розрахункові значення досліджуваних змінних, а в табл. 3.10 – значення дисперсії адекватності $S_{ад}^2$.

За розрахованими значеннями дисперсії адекватності та дисперсії помилки досліду визначили розрахунковий критерій Фішера F_p [2]:

Таблиця 3.9 – 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)	$(\bar{y}_1 - \tilde{y}_1)^2$	Обчислювальний експеримент	Модель (Рівняння 3.12)	$(\bar{y}_2 - \tilde{y}_2)^2$	Обчислювальний експеримент	Модель (Рівняння 3.13)	$(\bar{y}_3 - \tilde{y}_3)^2$
	\bar{y}_1	\tilde{y}_1		\bar{y}_2	\tilde{y}_2		\bar{y}_3	\tilde{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	91.0	0.0064
5	166.415	166.34	0.005625	179.72	179.73	0.0001	175.525	175.5	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

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

Для перевірки адекватності математичних моделей порівнюють розрахункове значення критерію Фішера F_p та його табличне значення F_T . Для $f_{ад} = N-l$ і $f_0 = N(m-1)$ при $q = 5\%$ $F_T = 3,44$ [2].

Розрахункові значення критерію Фішера для досліджуваних змінних наведено в табл. 3.11.

Таблиця 3.10 – Значення дисперсії адекватності $S_{ад}^2$ для рівнянь регресії досліджуваних змінних при $\delta = 0$

Досліджувана змінна	$S_{ад}^2$
β_1	0,007208
β_2	0,003283
$\beta_{ср}$	0,006833

Таблиця 3.11 – Розрахункові значення критерію Фішера F_p для рівнянь регресії досліджуваних змінних при $\delta = 0$

Досліджувана зміна	F_p
β_1	0,305
β_2	0,984
$\beta_{ср}$	0,844

Всі розраховані значення критерію Фішера менше табличного $F_p < F_T$, отже, 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 досліду).

Таблиця 3.12 – результати розрахунків b_i , b_{ij} і b_{ijk} рівняння регресії для кутів β_1 , β_2 и β_{cp} прирізних 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}
-0,670	β_1	162,6	6,53	2,59	-332,57	-0,98	47	11,05	0,93
	β_2	172,6	1,6	0,68	-20,68	-0,11	1,2	-0,16	0,23
	β_{cp}	190,2	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

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:

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

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

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

За результатами статистичного аналізу даних табл. 3.9, при нульовому значенні припуску на механічну обробку δ була сформована табл. 3.12, в якій наведено коефіцієнти рівнянь (3.16) - (3.18).

3.2 Порівняльний аналіз результатів математичного моделювання із експериментальними даними

Для верифікації розрахункових даних, отриманих в даній магістерській роботі, було проведено співставлення цих розрахункових даних з відомими експериментальними даними. Для співставлення були взяті експериментальні дані по вивченню волокнистої будови поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем, наведені в роботі [25]. Задля того, щоб вищезгадане порівняння було коректним за розмірами формотворного інструменту, що використовувався в роботі [25], було розраховано геометричні розміри поковки. Розміри вихідної заготовки брались таким ж самими, що і в роботі [25]. Форма заготовки – прутки зі сталі 45 та алюмінієвого сплаву АД 0. Розміри сталевих та алюмінієвих поковок, що утворюються після кування, наведено в табл. 3.13. Швидкість деформування за даними роботи [25] складала 2 мм/с. Поковку з алюмінію отримували при кімнатній температурі, зі сталі 45 – при температурі 1100°C.

Таблиця 3.13 – Розміри заготовок для фізичного моделювання

№	Розміри поковок:							
	l – довжина хвостової частини заготовки, що входить в матрицю							
	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

На рис 3.1 наведено фотографії заготовки та волокон поковки.

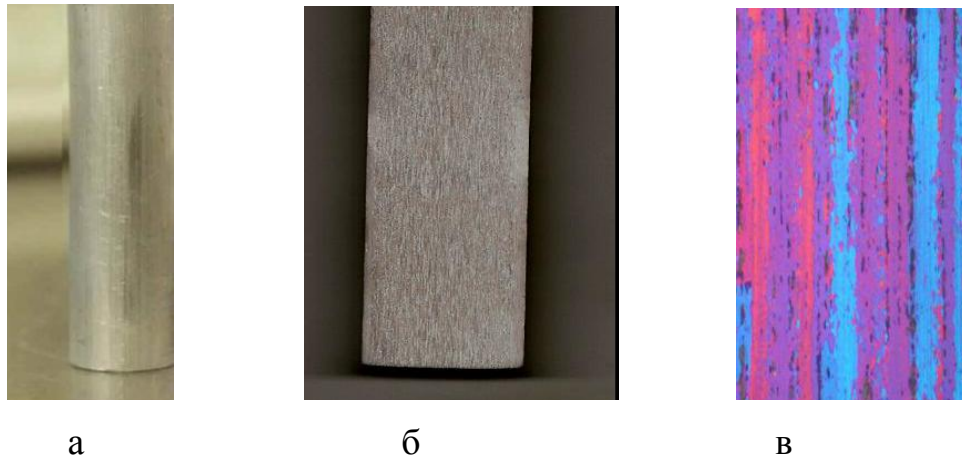


Рисунок 3.1 – Заготівля зі сплаву АД-0: а – вихідний пруток;
 б – макроструктура після глибокого травлення в кислотному розчині;
 в – макроструктура при збільшенні x250

Ескізи штампового оснащення, котре використовувалось для виготовлення алюмінієвих та сталевих поковок, наведено на рис. 3.2 4 3.4.

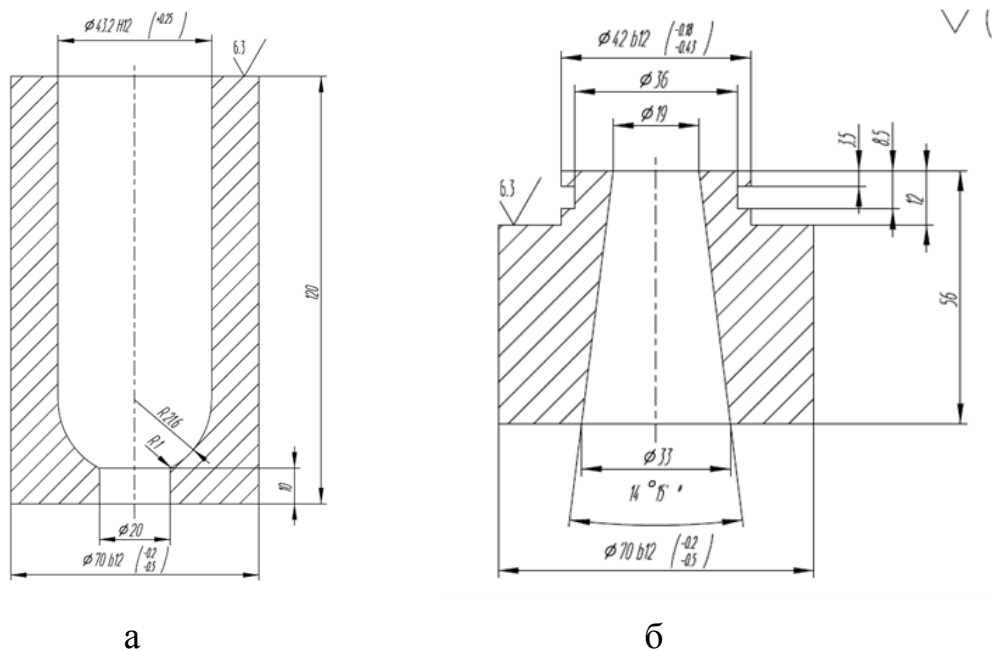


Рисунок 3.2 – Ескіз матриці для формування півсфери (а) та пуансона для формування конічної хвостової частини (б)

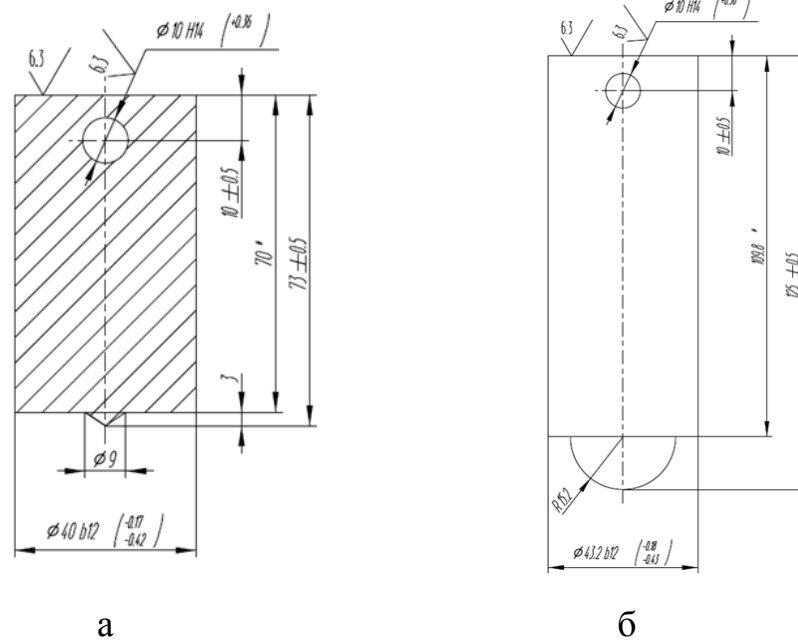


Рисунок 3.3 – Ескіз пуансона для виконання попереднього штампувального переходу; б – ескіз пуансона для формування півсфери

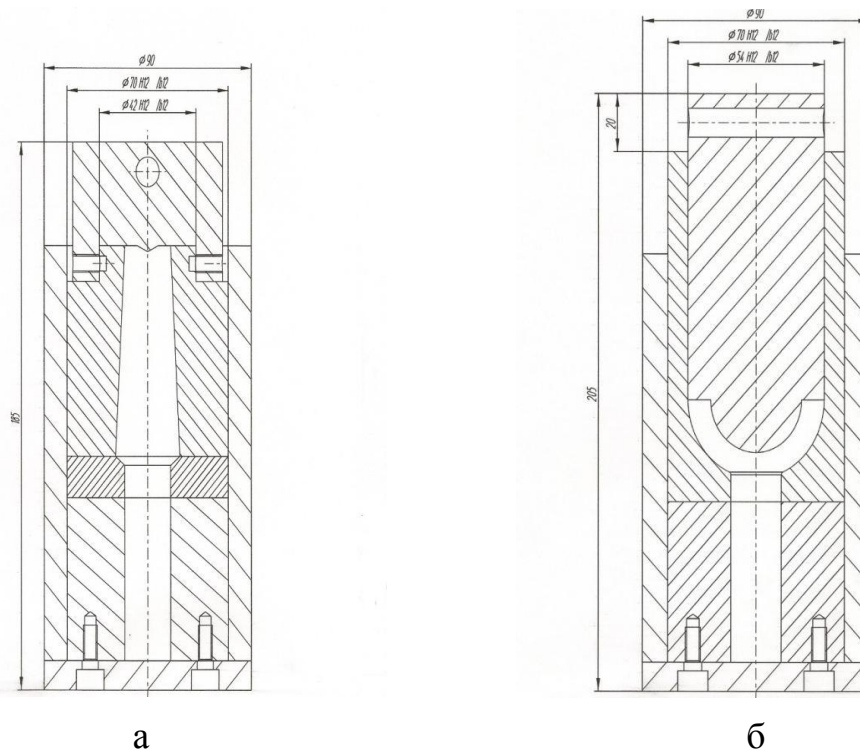


Рисунок 3.4 – Конструкції штампів:
а – штамп для попереднього штампування; б – чистовий штамп

Фотографії поковок, отриманих із алюмінієвих та сталевих заготовок, наведено на рис. 3.5 - 3.7.



а

б

Рисунок 3.5 – Поковки зі сплаву АД-0: а – $\Psi = 2,5$; б – $\Psi = 5,4$



Рисунок 3.6 – Поковки зі сплаву АД-0 у розрізі:

$\Psi = 2,5$ (ліворуч); $\Psi = 5,4$ (праворуч)

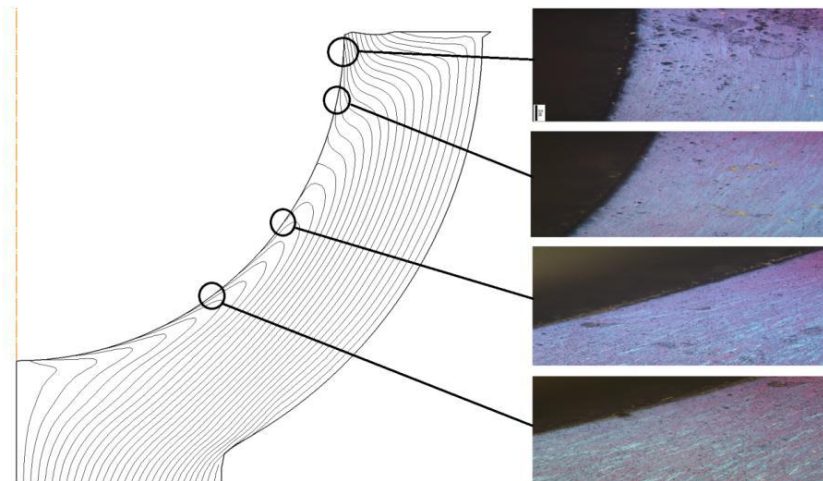


Рисунок 3.7 – Макроструктура алюмінієвої поковки № 1 ближче до внутрішньої поверхні напівсферичного фланця (ліворуч – розрахунок, праворуч – експеримент)

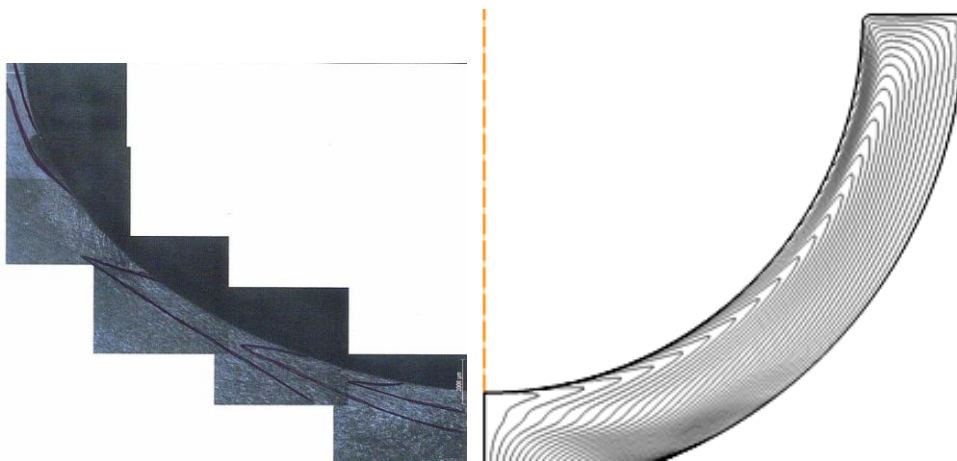


Рисунок 3.8 – Волокниста будова алюмінієвої поковки № 2 ближче до внутрішньої поверхні напівсферичного фланця

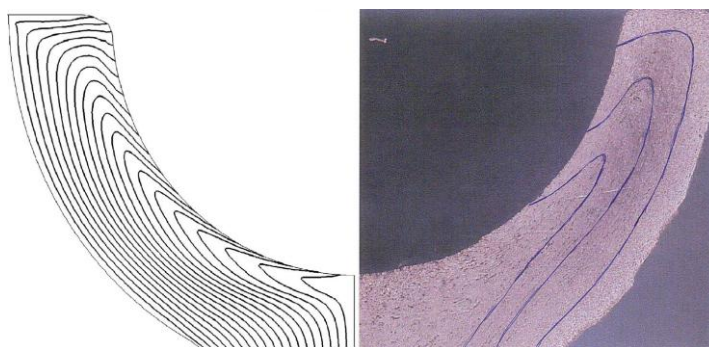


Рисунок 3.9 – Макроструктура поковки № 1 зі сталі 45 ближче до внутрішньої поверхні напівсферичного фланця (ліворуч – розрахунок, праворуч – експеримент)

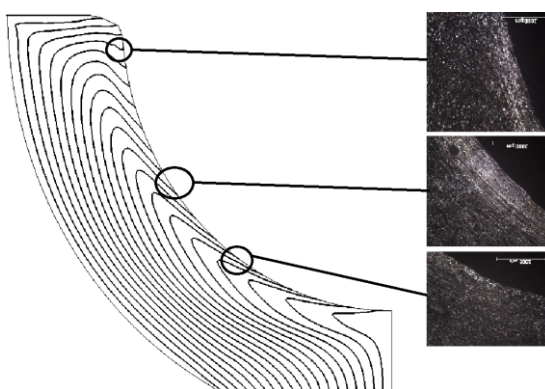


Рисунок 3.10 – Волокниста будова поковки № 2 зі сталі 45 ближче до внутрішньої поверхні напівсферичного фланця

Результати аналізу орієнтації волокон в обох зразках показали наступне: в контрольованих перетинах волокна практично огинають контактну поверхню напівсферичного фланця, відповідно кути β_1 і β_2 дорівнюють близько 170 - 180°.

3.3 Висновки по розділу 3

1. Розроблено методику чисельного моделювання формоутворення з формуванням волокнистої структури при висадці поволоки типу стрижня з напівсферичним фланцем. В результаті проведеного дослідження шляхом чисельного експерименту отримані рівняння регресії для визначення кутів нахилу волокон β_1 , β_2 , $\beta_{\text{ср}}$.

2. Проведено співставлення розрахункових кутів нахилу волокон β_1 , β_2 , $\beta_{\text{ср}}$ з відомими експериментальними даними, котрі відносяться до виготовлення деталей типу стрижня з напівсферичним фланцем. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних по кутам нахилу волокон не перевищує 10 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Для оцінки орієнтації волокон в поковках запропоновані три показника: кути β_1 і β_2 між дотичними, проведеними у точках виходу волокон на робочу поверхню пуансона, і середній кут $\beta_{\text{ср}}$.

2. Проаналізовано відомі схеми штампування поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем. Запропоновано нову схему штампування, котра забезпечує ефективне керування деформацією металу і, як наслідок, формування необхідної волокнистої структури. Досліджено вплив форми пуансона при виконанні попереднього штампувального переходу на розташування волокон в готовій поковці. Встановлено, що кут нахилу робочої поверхні пуансона при виконанні попереднього штампувального переходу суттєвим чином впливає на орієнтацію волокон відносно робочої поверхні пуансона на завершальному етапі деформування.

3. Розроблено методику чисельного моделювання формоутворення з формуванням волокнистої структури при висадці поковок типу стрижня з напівсферичним фланцем. В результаті проведеного дослідження шляхом чисельного експерименту отримані рівняння регресії для визначення кутів нахилу волокон β_1 , β_2 , $\beta_{\text{ср}}$.

4. Проведено співставлення розрахункових кутів нахилу волокон β_1 , β_2 , $\beta_{\text{ср}}$ з відомими експериментальними даними, котрі відносяться до виготовлення деталей типу стрижня з напівсферичним фланцем. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних по кутам нахилу волокон не перевищує 10 %.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Семенов Е.И., Зиновьев И.С. Общие требования к поковкам с волокнистой структурой // Вестник машиностроения. М.: 1998. №11. С. 69-71.
2. QForm – Универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки / Н.В. Биба // Кузнечнопрессовое производство. Обработка материалов давлением. М.:2021. № 1. С. 36-42.
3. Брюханов О.М. Ковка и объемная штамповка. М.: Машиностроение, 2015. 408 с.
4. Биллигман И.В. Ковка и штамповка: (Пер. з нім.). М.: Машиностроение, 1992. 467 с.
5. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах / Плд ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 1996. Т. 2. 592 с.
6. Навроцкий Г.А. Холодная объемная Штамповка: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 628 с.
7. Тюрин В.А. Теоріяковки и штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
8. Штамповка поковок с направленной волокнистой структурой / О.А. Банних [та ін.] // Вестник машиностроения. 2000. №10. С. 33-37.
9. 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.
10. Определение силовых параметров процесса изотермической раскатки ответственных деталей газотурбинных двигателей / Р.Ю. Сухоруков [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. №1. С. 116-122.
11. Use of the software deform 2D to model the process of rolling with vibration of the top work roll / М. М. Skripalenko [et al.] // Metallurgist. 2013. V. 56. №.11-12. P.844-847.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. Яковлев С. П., Кухарь В. Д. Штамповка анизотропных заготовок. М.: Машиностроение, 1996. 136 с.
16. Раузин Я.Р. Влияние макроструктуры металла на контактную выносливость и долговечность подшипников качения // Контактная прочность машиностроительных материалов: Сб. научных трудов. М.: Наука, 1994. С. 51-55.
17. Тюрин В.А. Алгоритм построения технологииковки // Известия вузов Черная металлургия. 1994. №11. С. 123-125.
18. Троп А.А., Козин В.З., Прокофьев Е.В. Управление технологическими процессами обогатительных фабрик. М.: Недра, 1996. 315 с.
19. Шейн А.С. Влияние ориентировки волокна на контактную усталостную прочность закаленной стали // МиТОМ. 1997. №12. С. 61-66.
20. Тетерин Г.П., Полухин П.И. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки. М.: Машиностроение, 1999. 284 с.
21. Унксов Е.П., Колмогоров В.Л., Огородников В.А. Теорияковки и штамповки. М.: Машиностроение, 2002. 727 с.
22. Потапкин В.Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос // Монография. Потапкин В.Ф. Краматорск: ДГМА, 2005. 315 с.
23. 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.
24. Потапкин В.Ф. Методы получения поковок с направленной структурой // Монография. Потапкин В.Ф. Краматорск: ДГМА, 2012. 263 с.
25. Брюханов О.М. Новые процессы объемной штамповки. М.: Машиностроение, 2008. 325 с.