

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності**

Кафедра матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**Розробка технологічного процесу та штампового
оснащення для виготовлення деталі типу “Стакан з
фланцем” / Development of a technological process and
stamping equipment for the production of a part of the
“Glass with a flange” type**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ-41
ДЕМЧИНСЬКИЙ Віталій Андрійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Фещук Юрій Петрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“ ____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Демчинському Віталію Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка технологічного процесу та штампового оснащення для виготовлення деталі типу “Стакан з фланцем” / Development of a technological process and stamping equipment for the production of a part of the “Glass cup with flange”*
керівник роботи *Фещук Юрій Петрович, к.т.н., доцент*,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *31.12.25* року № *540/01-02*

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи « *23* » *травня* 202*6* р.

3. Вихідні дані до роботи *ескіз стакана з фланцем, базовий технологічний процес, програма випуску N=30 000 шт.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; розділ 1 технічне обґрунтування; розділ 2 дослідна частина; розділ 3 технологічна частина; розділ 4 конструкторська частина висновки та практичні рекомендації; список використаних джерел; додатки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Мета та завдання дослідження - 1л. ф.А4.

2.Завдання бакалаврської атестаційної роботи - 1л. ф.А4.

3. Ескіз стакана та властивості сталі DC05 - 1л. ф.А4.

4. Аналіз розподілу напружень - 1л. ф.А4.

5. Аналіз небезпеки руйнування за FLD-діаграмою - 1л. ф.А4.

6. Ілюстрація технологічного процесу - 1 л.ф.А4.

7. Конструкція штампа для витягування - 1л. ф.А4.

8. Висновки та практичні рекомендації - 1л. ф.А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ.</i>	<i>05.05.26</i>	
	<i>Розділ 1 Технічне обґрунтування</i>		
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Дослідна частина</i>	<i>12.05.26</i>	
	<i>Розділ 3 Технологічна частина</i>		
<i>3</i>	<i>Розділ 4 Конструкторська частина</i>	<i>19.05.26</i>	
	<i>Висновки та практичні рекомендації</i>		
	<i>Список використаних джерел</i>		

Здобувач вищої освіти _____ *Демчинський В.А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Фещук Ю.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Демчинський Віталій Андрійович. Розробка технологічного процесу та штампового оснащення для виготовлення деталі типу “Стакан з фланцем”.
Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет.
Луцьк, 2026.

У роботі розроблено технологічний процес виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем» методом холодного листового штампування та виконано обґрунтування вибору матеріалів для заготовки й штампового оснащення.

Проведено аналіз конструкції деталі та особливостей процесу глибокого витягування. Обґрунтовано вибір холоднокатаної низьковуглецевої сталі DC05 як матеріалу заготовки, що забезпечує високі показники пластичності та придатності до холодного формоутворення.

Виконано розрахунок основних параметрів технологічного процесу, визначено розміри вихідної заготовки, зусилля витягування та параметри штампового оснащення. За допомогою програмного комплексу FormingSuite проведено дослідження напружено-деформованого стану заготовки в процесі формоутворення, проаналізовано розподіл напружень, деформацій та зміну товщини матеріалу.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка містить 52 сторінки формату А4, 8 рисунків, 6 таблиць та 17 літературних джерел. Графічна частина містить 8 аркушів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: холодне листове штампування, глибоке витягування, сталь DC05, термічна обробка, FormingSuite

					БР 0826.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Демчинський				Розробка технологічного процесу та штампового оснащення для виготовлення деталі типу “Стакан з фланцем”	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Фещук						3	52
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ-41		
Н. Контр.	Мисковець							
Затв.	Імдірович							

ANNOTATION

Demchynskyi Vitalii Andriiovych. Development of a technological process and stamping equipment for the production of a part of the “Glass with a flange” type. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The thesis presents the development of a technological process for manufacturing a “Cup with Flange” type part by means of cold sheet metal stamping and provides justification for the selection of materials for both the blank and the die tooling.

An analysis of the part design and the specific features of the deep drawing process for axisymmetric thin-sheet products was carried out. The selection of DC05 cold-rolled low-carbon steel as the blank material was justified due to its high plasticity and suitability for cold forming operations.

The main technological parameters of the manufacturing process were calculated, including the dimensions of the initial blank, drawing force, and die tooling parameters. Using the FormingSuite software package, the stress-strain state of the blank during forming was investigated. The distribution of stresses and strains, as well as the variation in material thickness during the forming process, were analyzed.

The bachelor's qualification thesis consists of a written report and a graphical part. The written report contains 52 A4 pages, 8 figures, 6 tables, and 17 references. The graphical part includes 8 A4 sheets presented in the appendices A.

Keywords: cold sheet metal stamping, deep drawing, DC05 steel, heat treatment, FormingSuite.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	8
1.1. Характеристика деталей типу стакан з фланцем	8
1.2. Особливості холодного листового штампування деталей осесиметричної форми.....	9
1.3. Матеріали для холодного витягування та їх технологічні властивості.....	12
1.4. Інструментальні сталі для виготовлення штампового оснащення	14
1.5. Методи підвищення стійкості штамсів шляхом термічної та поверхневої обробки.....	16
1.6. Мета роботи та основні завдання	19
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	21
2.1. Мета та завдання комп'ютерного моделювання	21
2.2. Побудова геометричної моделі.....	22
2.3. Вихідні дані для моделювання	23
2.4. Аналіз розподілу напружень.....	24
2.5. Аналіз пластичних деформацій	25
2.6. Аналіз зміни товщини матеріалу	26
2.7. Аналіз небезпеки руйнування за FLD-діаграмою.....	28
2.8. Оптимізація параметрів технологічного процесу.....	29
2.9. Висновки	29
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	31
3.1. Аналіз конструкції деталі	31
3.2. Визначення рівня технологічності конструкції деталі.....	32
3.3. Основні технологічні розрахунки та вибір обладнання.....	35
РОЗДІЛ 4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	41
4.1. Розробка конструкції штампа для виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем»	41

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2. Аналіз умов роботи деталей матрично-пуансонної групи.....	42
4.3. Вибір матеріалу деталей матрично-пуансонної групи.....	43
4.4. Розробка режиму термічної обробки	44
4.5. Поверхнєве зміцнення робочих елементів штампа	44
4.6. Аналіз мікроструктури та прогноз довговічності штампа.....	45
ВИСНОВКИ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51
ДОДАТКИ	

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасне машинобудування характеризується широким використанням деталей, виготовлених методами холодного листового штампування. Однією з поширених деталей такого типу є стакани з фланцем, які застосовуються у вузлах автомобільної техніки, сільськогосподарських машин, приладобудуванні, вентиляційному обладнанні та інших галузях промисловості. Холодне витягування забезпечує високу продуктивність виробництва, економне використання металу та отримання виробів з високою точністю геометричних розмірів.

Якість і економічність процесу штампування значною мірою визначаються правильністю вибору матеріалу заготовки, конструкцією штампового оснащення та довговічністю його робочих елементів. Особливого значення набуває підвищення стійкості штампів за рахунок використання сучасних інструментальних сталей, раціональних режимів термічної обробки та поверхневого зміцнення. У багатьох випадках традиційно застосовувані інструментальні сталі типу У12А не забезпечують необхідного ресурсу роботи при серійному та масовому виробництві.

Важливим напрямком удосконалення технологічних процесів є використання сучасних систем комп'ютерного моделювання, які дозволяють дослідити напружено-деформований стан матеріалу, визначити можливі дефекти формоутворення та оптимізувати параметри технологічного процесу без проведення значної кількості дорогих експериментів.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення технологічного процесу виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем», дослідження напружено-деформованого стану матеріалу за допомогою програмного комплексу FormingSuite, а також вибір матеріалів штампового оснащення та розроблення ефективних режимів їх термічної й поверхневої обробки для підвищення довговічності інструменту.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

1.1. Характеристика деталей типу стакан з фланцем

У сучасному машинобудуванні значна кількість деталей виготовляється методами холодного листового штампування. Одними з найбільш поширених деталей є тонкостінні осесиметричні вироби, отримані шляхом витягування листових заготовок. До таких виробів належать стакани, ковпаки, корпуси, втулки, кожухи, резервуари, патрубки та інші конструктивні елементи. Особливе місце серед них займають деталі типу «стакан з фланцем», які поєднують у собі циліндричну оболонку та плоский периферійний фланець, що використовується для кріплення або з'єднання з іншими елементами конструкції.

Подібні деталі широко застосовуються в автомобільній промисловості, сільськогосподарському машинобудуванні, приладобудуванні, електротехнічній галузі, вентиляційних системах та побутовій техніці. До типових прикладів належать корпуси підшипникових вузлів, захисні ковпаки, елементи паливних систем, корпуси датчиків, деталі гідравлічних систем та численні конструктивні елементи побутового обладнання.

Основною перевагою деталей такого типу є можливість отримання складної просторової форми без механічної обробки значної частини поверхонь. Завдяки цьому забезпечується висока продуктивність виготовлення, зменшуються втрати металу та підвищується точність готових виробів.

Геометрія стакана з фланцем характеризується такими параметрами:

- зовнішній діаметр виробу;
- висота циліндричної частини;
- товщина стінки;
- діаметр та ширина фланця;

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– радіуси переходів між елементами конструкції.

Особливістю даних деталей є наявність зон концентрації напружень у місцях переходу дна в стінку та стінки у фланець. Саме в цих областях під час формоутворення виникають максимальні пластичні деформації, що можуть призводити до локального стоншення металу або утворення тріщин [1].

У процесі проектування технології необхідно забезпечити рівномірний розподіл деформацій по всьому об'єму заготовки. Це досягається правильним вибором геометрії інструмента, величини притискного зусилля, коефіцієнта витягування та мастильних матеріалів.

В умовах серійного та масового виробництва виготовлення деталей типу «стакан з фланцем» здійснюється переважно методами холодного листового штампування. Даний спосіб забезпечує високу точність, добру якість поверхні та мінімальні витрати металу порівняно з литтям або механічною обробкою з суцільної заготовки.

Сучасні тенденції розвитку штампувального виробництва спрямовані на підвищення точності моделювання процесів формоутворення та збільшення довговічності штампового оснащення. Це особливо актуально для деталей складної форми, де помилки проектування можуть призводити до появи дефектів вже на етапі першого запуску виробництва.

1.2. Особливості холодного листового штампування деталей осесиметричної форми

Холодне листове штампування являє собою технологічний процес пластичної деформації металу без попереднього нагрівання заготовки. Формоутворення відбувається під дією зовнішніх сил, прикладених до заготовки через робочі елементи штампа.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для деталей типу «стакан з фланцем» основною операцією є витягування. Витягуванням називають процес перетворення плоскої листової заготовки у порожнистий виріб без істотної зміни товщини стінки.

Під час витягування метал переміщується від периферійних ділянок заготовки до центральної частини. При цьому в різних зонах виробу виникають різні схеми напруженого стану.

У фланцевій частині заготовки переважають радіальні розтягувальні та окружні стискальні напруження. Саме внаслідок дії окружних стискальних напружень виникає небезпека утворення складок. Для їх запобігання використовують притискач заготовки.

У зоні переходу від фланця до стінки спостерігається найбільш складний напружено-деформований стан. Метал одночасно зазнає розтягу, стиску та згину. Саме ця область є критичною з точки зору появи руйнувань.

Стінка стакана переважно працює в умовах осьового розтягу. Тут можливе виникнення локального стоншення металу при перевищенні допустимих деформацій.

На дні виробу деформації мінімальні, оскільки ця зона контактує з торцем пуансона та переміщується практично як жорстке тіло.

Основними дефектами, що виникають при витягуванні, є:

- утворення складок;
- розрив заготовки;
- надмірне стоншення стінки;
- нерівномірність висоти виробу;
- поява рисок та задирок;
- підвищена шорсткість поверхні.

Імовірність виникнення зазначених дефектів визначається коефіцієнтом витягування, який є одним із найважливіших технологічних параметрів процесу.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для низьковуглецевих сталей коефіцієнт першого витягування зазвичай становить 1,8...2,2. Якщо необхідна глибина виробу перевищує допустимі значення, застосовують багатоопераційне витягування.

На якість процесу істотно впливають:

- механічні властивості матеріалу;
- анізотропія листа;
- товщина заготовки;
- радіуси матриці та пуансона;
- швидкість деформування;
- величина притискного зусилля;
- умови тертя.

Особливо важливу роль відіграє технологічна пластичність матеріалу. Чим вищі значення відносного видовження та коефіцієнта нормальної анізотропії, тим більші деформації може витримати матеріал без руйнування.

Для оцінки придатності листових сталей до глибокого витягування використовують такі показники:

- границя текучості;
- тимчасовий опір розриву;
- відносне видовження;
- коефіцієнт зміцнення n ;
- коефіцієнт нормальної анізотропії r .

Високі значення параметрів n та r сприяють більш рівномірному розподілу деформацій та зменшенню небезпеки локального стоншення.

На сучасному етапі розвитку технологій все ширше застосовуються методи комп'ютерного моделювання процесів формоутворення. Такі програмні комплекси, як FormingSuite, AutoForm, PAM-Stamp та DYNAFORM, дозволяють ще на стадії проектування оцінити розподіл деформацій, визначити можливі дефекти та оптимізувати параметри процесу.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання цифрових моделей значно знижує витрати на виготовлення дослідних штамів та дозволяє підвищити якість кінцевої продукції.

1.3. Матеріали для холодного витягування та їх технологічні властивості

Вибір матеріалу заготовки є одним із найважливіших етапів проектування технології холодного штампування. Властивості матеріалу визначають максимально допустимі деформації, якість поверхні виробу, стабільність технологічного процесу та економічну ефективність виробництва.

Для виготовлення деталей методом глибокого витягування використовуються переважно низьковуглецеві сталі, нержавіючі сталі, алюмінієві сплави, латуні та інші пластичні матеріали. Найбільшого поширення в автомобільній та машинобудівній промисловості набули низьковуглецеві холоднокатані сталі.

У даній роботі для виготовлення деталі обрана сталь DC05 відповідно до стандарту EN 10130. Дана марка належить до групи сталей для особливо глибокого витягування.

Сталь DC05 є сучасним аналогом сталей типу 08Ю та характеризується низьким вмістом вуглецю, високою чистотою за неметалевими включеннями та підвищеною пластичністю [1...3].

Типовий хімічний склад сталі DC05 наведено в таблиці 1.1 [1].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі DC05

Хімічний елемент	C	Mn	P	S
Вміст, %	$\leq 0,06 \%$	$\leq 0,30 \%$	$\leq 0,025 \%$	$\leq 0,025 \%$

Мікроструктура після рекристалізаційного відпалу представлена переважно рівновісним феритом із незначною кількістю цементиту.

Завдяки дрібнозернистій структурі забезпечуються високі показники пластичності та рівномірності деформації [2].

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фізико-механічні властивості сталі DC05 наведені в таблиці 1.2 [1].

Таблиця 1.2

Властивість	Величина
Границя текучості	140...180 МПа;
Тимчасовий опір	270...350 МПа;
Відносне видовження понад	38...40 %;
Коефіцієнт анізотропії r	понад 1,8;
Коефіцієнт зміцнення n	близько 0,22...0,25.

Поєднання зазначених характеристик робить сталь DC05 одним із найкращих матеріалів для виготовлення виробів складної форми методом холодного витягування.

Особливу цінність для процесів глибокого витягування має високий коефіцієнт нормальної анізотропії. Чим вищий цей показник, тим менша схильність металу до стоншення стінок виробу.

Дослідження сучасних виробників автомобільних кузовних деталей показують, що застосування сталі DC05 дозволяє збільшити допустиму глибину витягування на 15...25 % порівняно зі звичайними низьковуглецевими сталями.

Для оцінки можливості виготовлення деталі без руйнування використовують діаграми граничних деформацій (FLD). Саме ці діаграми будуть використані при подальшому моделюванні процесу в програмному комплексі FormingSuite.

У результаті аналізу властивостей різних листових матеріалів встановлено, що сталь DC05 повністю відповідає вимогам до виготовлення деталі типу «стакан з фланцем» методом холодного глибокого витягування.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4. Інструментальні сталі для виготовлення штампового оснащення

Ефективність процесів холодного листового штампування значною мірою визначається експлуатаційними характеристиками штампового оснащення. Робочі елементи штампа – пуансони, матриці, притискачі та калібрувальні деталі – працюють в умовах високих контактних навантажень, інтенсивного тертя та циклічної дії напружень. Унаслідок цього до матеріалів штампового оснащення висувається комплекс вимог, що включає високу твердість, зносостійкість, міцність, достатню в'язкість та стабільність структури в процесі експлуатації.

Традиційно для виготовлення штампів холодного деформування широко застосовувалася інструментальна вуглецева сталь У12А. Після гартування та низького відпуску вона забезпечує твердість 60–63 HRC та характеризується задовільною зносостійкістю. Однак через відсутність значної кількості легувальних елементів ця сталь має обмежену прокаліюваність, підвищену схильність до деформацій під час термічної обробки та недостатню довговічність при виготовленні великосерійної продукції.

У сучасному штамповому виробництві дедалі ширше використовуються високохромисті інструментальні сталі, які характеризуються підвищеним вмістом карбідоутворюючих елементів. До таких матеріалів належать сталі X12МФ, X153CrMoV12 (D2) та X165CrMoV12. Завдяки високому вмісту хрому, молібдену та ванадію вони забезпечують значно вищу зносостійкість порівняно з вуглецевими інструментальними сталями [2...7].

Для деталей матрично-пуансонної групи в даній роботі прийнято сталь X165CrMoV12. Відповідно до європейської класифікації вона належить до групи високовуглецевих високохромистих інструментальних сталей для холодного деформування.

Типовий хімічний склад сталі X165CrMoV12 наведено в таблиці 1.3.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Хімічний склад легуючих елементів в сталі X165CrMoV12

Хімічний елемент	C	Cr	Mo	V	Si	Mn
Вміст, %	1,50–1,70	11,0–12,5	0,6–0,8	0,7–1,0	до 0,6	0,6

Підвищений вміст вуглецю забезпечує формування великої кількості твердих карбідів, а хром, молібден і ванадій сприяють підвищенню зносостійкості та теплостійкості матеріалу.

У стані постачання мікроструктура сталі складається з феритно-карбідної матриці з великою кількістю первинних та вторинних карбідів хрому. Карбіди розташовуються у вигляді окремих частинок або карбідних скупчень, рівномірно розподілених у металевій основі.

Після гартування структура сталі представлена високолегованим мартенситом, залишковим аустенітом та дисперсними карбідами. Саме така структура забезпечує поєднання високої твердості та підвищеної зносостійкості.

Високий вміст карбідів типу Cr_7C_3 та $Cr_{23}C_6$ значно збільшує опір абразивному зношуванню. Водночас присутність карбідів ванадію сприяє збереженню ріжучих та формоутворюючих кромek протягом тривалого часу.

Для деталей штампового оснащення особливо важливими є такі характеристики сталі X165CrMoV12:

- твердість після термічної обробки 60...64 HRC;
- висока контактна міцність;
- підвищений опір схоплюванню;
- висока зносостійкість;
- добра прокаліюваність;
- стабільність розмірів після термічної обробки.

Порівняно зі сталлю У12А довговічність штампового оснащення зі сталі X165CrMoV12 може бути більшою у 2...5 разів залежно від умов експлуатації. Найбільша перевага спостерігається під час штампування тонколистових

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низьковуглецевих сталей, де основним механізмом руйнування інструмента є абразивне та адгезійне зношування робочих поверхонь.

Додатковою перевагою є можливість використання сучасних методів поверхневого зміцнення, які добре поєднуються з високохромистими інструментальними сталями та дозволяють ще більше збільшити ресурс роботи штампів.

Таким чином, аналіз властивостей інструментальних матеріалів показує, що сталь X165CrMoV12 є перспективним матеріалом для виготовлення матриці та пуансона штампа для холодного витягування деталі типу «стакан з фланцем». За комплексом характеристик вона перевищує традиційну сталь У12А та здатна забезпечити підвищену довговічність штампового оснащення.

1.5. Методи підвищення стійкості штампів шляхом термічної та поверхневої обробки

Одним із найбільш ефективних способів підвищення довговічності штампового оснащення є застосування раціональної термічної та поверхневої обробки. Саме структура поверхневих шарів визначає інтенсивність зношування, опір контактним навантаженням та стабільність геометричних розмірів робочих елементів інструмента.

Основною метою термічної обробки інструментальних сталей є формування структури, яка забезпечує максимально можливу твердість при збереженні достатньої в'язкості та тріщиностійкості. Для сталі X165CrMoV12 традиційно застосовують гартування з температур 1020...1050 °С з наступним подвійним або потрійним відпуском [8...16].

Під час нагрівання під гартування частина карбідів розчиняється в аустеніті, внаслідок чого підвищується його легованість. Після швидкого охолодження утворюється високолегований мартенсит із високою твердістю та значною кількістю дисперсних карбідів.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після гартування твердість матеріалу може перевищувати 64 HRC, однак у структурі залишається певна кількість залишкового аустеніту. Для його стабілізації застосовують багаторазовий відпуск за температури 180...250 °С.

Під час відпуску відбувається частковий розпад пересиченого мартенситу та виділення дрібнодисперсних карбідів. Це забезпечує підвищення стабільності структури та зменшення внутрішніх напружень.

Останніми роками значний інтерес викликає застосування кріогенної обробки після гартування. Суть процесу полягає в охолодженні інструменту до температур від мінус 80 до мінус 196 °С. При цьому додаткова частина залишкового аустеніту перетворюється на мартенсит, а в процесі подальшого відпуску формується більш дрібнодисперсна карбідна структура.

За даними численних досліджень, кріогенна обробка дозволяє підвищити зносостійкість інструментальних сталей на 15...40 % залежно від режимів термообробки та умов експлуатації.

Окрім об'ємної термічної обробки, важливе значення має зміцнення поверхневих шарів інструмента. Найбільш поширеними методами є азотування, карбонітрування та нанесення зносостійких покриттів.

Газове азотування полягає в насиченні поверхні азотом за температури 500...550 °С. У результаті дифузії азоту утворюються нітриди легувальних елементів, які значно підвищують твердість поверхневого шару.

Для високохромистих інструментальних сталей твердість азотованого шару може досягати 1000...1200 HV. При цьому серцевина інструмента зберігає необхідну в'язкість, що позитивно впливає на довговічність виробу.

Більш сучасним методом є плазмове (іонне) азотування. Перевагами цього процесу є можливість точного регулювання товщини зміцненого шару, скорочення тривалості обробки та зменшення деформацій інструмента.

Останнім часом широкого поширення набули вакуумні покриття, отримані методами фізичного осадження з парової фази (PVD). Найбільш відомими серед них є покриття TiN, TiCN, CrN та AlTiN [14].

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Покриття TiN характеризується золотистим кольором та твердістю близько 2200...2500 HV. Воно забезпечує зменшення коефіцієнта тертя та підвищення зносостійкості інструмента.

Покриття TiCN має ще вищу твердість, яка може перевищувати 3000 HV. Завдяки цьому воно ефективно працює в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Покриття CrN відзначається підвищеною корозійною стійкістю та добрими антиадгезійними властивостями. Воно ефективно запобігає налипанню металу заготовки на поверхню штампа.

Для холодного листового штампування низьковуглецевих сталей особливо перспективним є комбінований підхід, який передбачає застосування гартування, багаторазового відпуску, плазмового азотування та нанесення PVD-покриття.

У такому випадку формується багаторівнева структура зміцнення. Серцевина забезпечує необхідну міцність та в'язкість, азотований шар підвищує контактну міцність, а тонке вакуумне покриття зменшує тертя та інтенсивність зношування.

Результати досліджень показують, що поєднання азотування з покриттям TiN або TiCN дозволяє збільшити ресурс роботи штампового оснащення у 3...8 разів порівняно з традиційними технологіями термічної обробки.

Для умов виготовлення деталі типу «стакан з фланцем» доцільним є застосування сталі X165CrMoV12 після гартування з температури 1030...1040 °C, подвійного відпуску за температури 200...220 °C та подальшого плазмового азотування. Така технологія забезпечує твердість робочих поверхонь понад 62 HRC, високу контактну міцність та підвищену стійкість до абразивного й адгезійного зношування.

Отже, використання сучасних методів термічного та поверхневого зміцнення дозволяє суттєво підвищити довговічність штампового оснащення. Найбільш перспективним для даної роботи є комплексне застосування сталі

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

X165CrMoV12, раціональної термічної обробки та плазмового азотування, що забезпечує значно вищий ресурс роботи порівняно з традиційними штампами зі сталі У12А.

1.6. Мета роботи та основні завдання

Мета роботи – розроблення технологічного процесу холодного листового штампування деталі типу «Стакан з фланцем», дослідження напружено-деформованого стану заготовки засобами комп’ютерного моделювання та обґрунтування вибору матеріалів, термічної і поверхневої обробки деталей штампового оснащення для забезпечення підвищеної стійкості інструменту.

Об’єкт дослідження – процес холодного листового штампування деталі типу «Стакан з фланцем» із низьковуглецевої листової сталі.

Предмет дослідження – закономірності формування напружено-деформованого стану під час холодного витягування, а також вплив матеріалу, термічної та поверхневої обробки деталей штампа на його експлуатаційну стійкість.

Завдання дослідження:

- провести аналіз літературних джерел щодо технології холодного листового штампування деталей типу «стакан з фланцем»;
- обґрунтувати вибір матеріалу заготовки для процесу холодного витягування;
- розробити технологічний процес виготовлення деталі;
- виконати розрахунок параметрів процесу штампування;
- побудувати цифрову модель процесу у програмному комплексі FormingSuite;
- дослідити розподіл напружень і деформацій у заготовці;
- визначити критичні ділянки можливого руйнування або утворення складок;

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробити конструкцію штампового оснащення;
- провести аналіз умов роботи основних деталей штампа;
- обґрунтувати вибір матеріалів пуансона та матриці;
- розробити режими термічної обробки деталей штампа;
- обґрунтувати вибір технології поверхневого зміцнення;
- провести аналіз мікроструктури та механічних властивостей запропонованих матеріалів;
- виконати порівняння запропонованих рішень із традиційним використанням сталі У12А.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1. Мета та завдання комп'ютерного моделювання

Одним із сучасних напрямків удосконалення процесів холодного листового штампування є використання програмних комплексів для чисельного моделювання процесів формоутворення. Застосування таких систем дозволяє ще на стадії проєктування оцінити напружено-деформований стан заготовки, визначити можливість виникнення дефектів та оптимізувати параметри технологічного процесу без проведення великої кількості натурних експериментів [1].

У даній роботі для дослідження процесу витягування деталі типу «Стакан з фланцем» використано програмний комплекс FormingSuite.

Основною метою моделювання є:

- оцінка розподілу напружень у заготовці;
- визначення характеру пластичних деформацій;
- аналіз зміни товщини матеріалу;
- виявлення зон можливого руйнування;
- оцінка небезпеки утворення складок;
- перевірка можливості виготовлення деталі за один технологічний перехід;
- визначення оптимальних параметрів штампового оснащення.

Використання чисельного моделювання дозволяє значно скоротити час розроблення технології та знизити витрати на виготовлення дослідних штампів.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Побудова геометричної моделі

Для проведення розрахунків у програмному комплексі FormingSuite була створена тривимірна модель деталі типу «Стакан з фланцем».

В основу моделі покладено геометричні параметри виробу:

- діаметр фланця – 120 мм;
- діаметр циліндричної частини – 80 мм;
- висота стакану – 50 мм;
- товщина листа – 1 мм.

Ескіз стакану наведено на рисунку 2.1

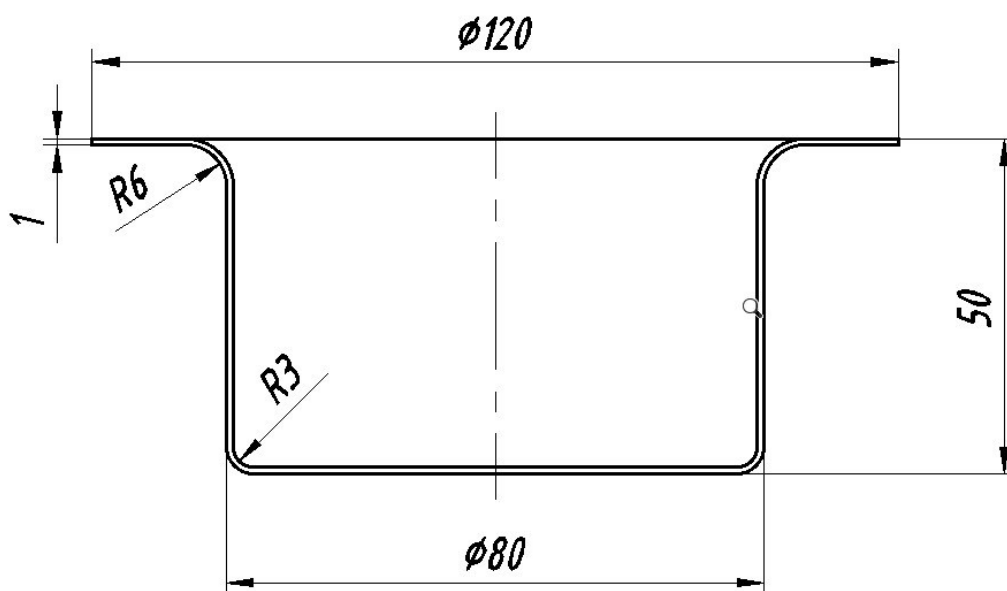


Рисунок 2.1 – Ескіз стакану

Для забезпечення коректності розрахунків також були побудовані геометричні моделі основних елементів штампа: пуансона; матриці; притискача.

Радіус заокруглення матриці прийнято рівним 6 мм.

Радіус заокруглення пуансона прийнято рівним 3 мм.

Зазор між матрицею та пуансоном становить 1,1 мм.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для опису поведінки листового матеріалу використано оболонкові скінченні елементи, які забезпечують високу точність моделювання процесів листового формоутворення при відносно невеликих витратах обчислювальних ресурсів.

2.3. Вихідні дані для моделювання

Матеріалом заготовки обрано сталь DC05 відповідно до стандарту EN 10130 [1].

У модель було введено основні механічні характеристики матеріалу.

Таблиця 4.1 – Вихідні характеристики сталі DC05

Показник	Значення
Границя текучості	160 МПа
Тимчасовий опір	310 МПа
Відносне видовження	40 %
Коефіцієнт анізотропії r	1,9
Коефіцієнт зміцнення n	0,23
Товщина листа	1,0 мм

Відповідне вікно програми подано на рисунку 2.2

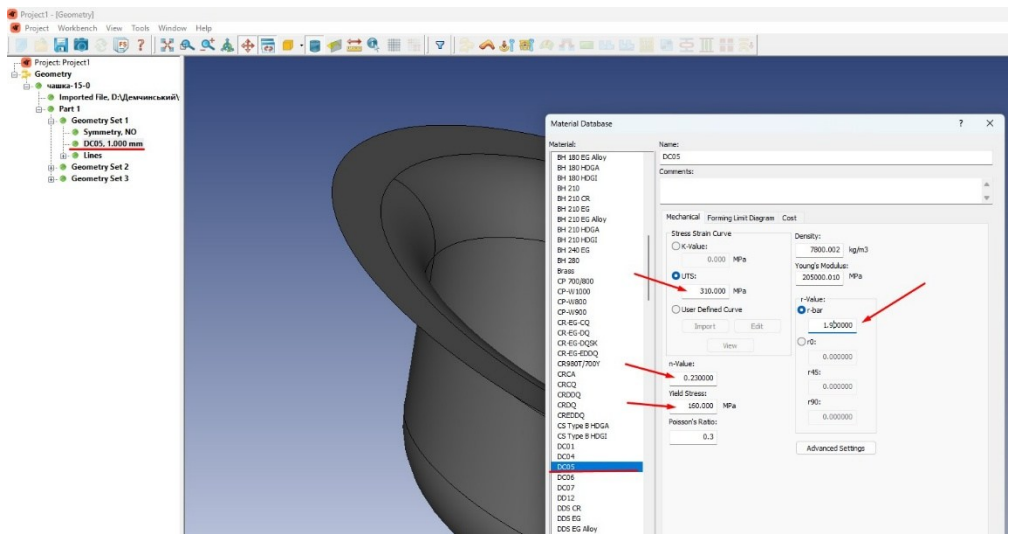


Рисунок 2.2 – Введення реальних параметрів матеріалу

У процесі моделювання було враховано:

- геометрію інструмента;
- силу притискання;
- контактні взаємодії;
- коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом;
- механічні властивості сталі.

Коефіцієнт тертя прийнято рівним 0,008...0,10, що відповідає використанню сучасних технологічних мастил для глибокого витягування при холодному штампуванні.

2.4. Аналіз розподілу напружень

У процесі витягування в різних ділянках заготовки формується складний напружений стан.

Найбільші напруження виникають у зоні переходу дна у стінку стакану. Саме ця область зазнає найбільш інтенсивної пластичної деформації та є найбільш небезпечною щодо виникнення руйнування.

На рисунку 2.3 наведено карту еквівалентних напружень за Мізесом, отриману в результаті моделювання.

Аналіз результатів показав, що максимальні значення напружень локалізуються:

- на радіусі матриці;
- у зоні переходу дна в стінку;
- на початковій стадії формування циліндричної оболонки.

У фланцевій частині заготовки переважають стискальні напруження, які можуть сприяти утворенню складок при недостатньому притискному зусиллі.

У центральній частині дна виробу напруження залишаються відносно невеликими, оскільки ця зона деформується найменше.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

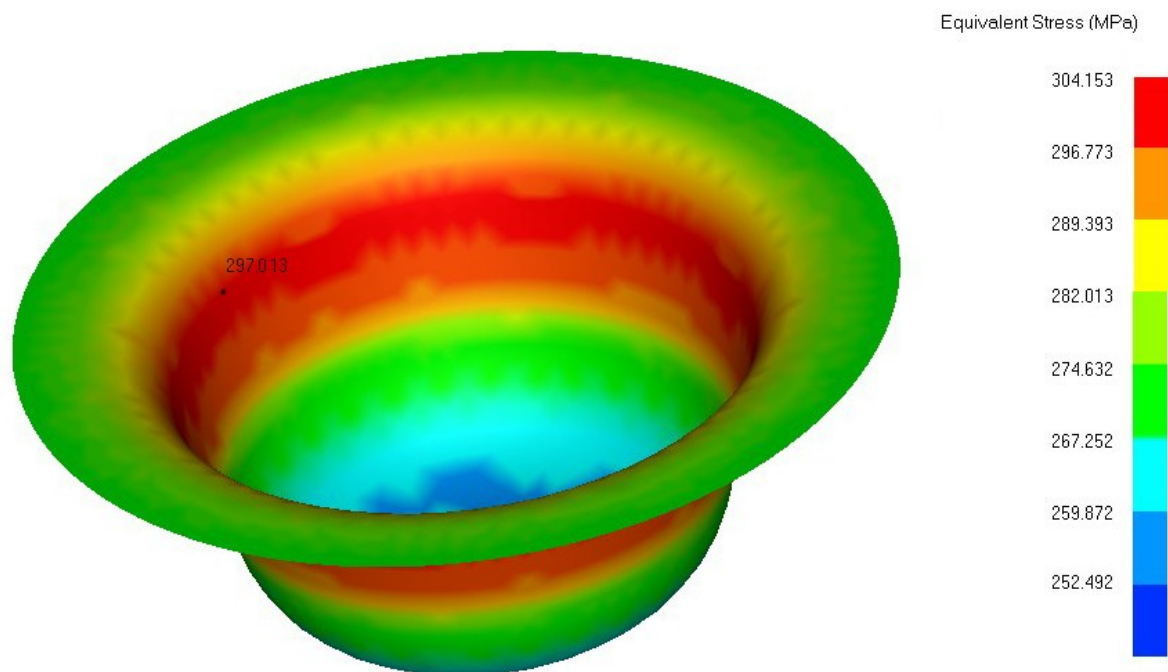


Рисунок 2.3 – Розподіл еквівалентних напружень у заготовці

Максимальні еквівалентні напруження діють на радіусній частині між фланцем і циліндричною частиною і складають 297 МПа.

Отриманий характер розподілу напружень відповідає теоретичним закономірностям процесу глибокого витягування.

2.5. Аналіз пластичних деформацій

Під час витягування листова заготовка зазнає значних пластичних деформацій.

На рисунку 2.4 наведено карту накопичених пластичних деформацій.

Максимальні деформації спостерігаються:

- у зоні радіуса матриці;
- у верхній частині стінки;
- на переході між фланцем і циліндричною частиною.

У процесі формування відбувається поступове переміщення металу від периферії заготовки до центральної частини.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

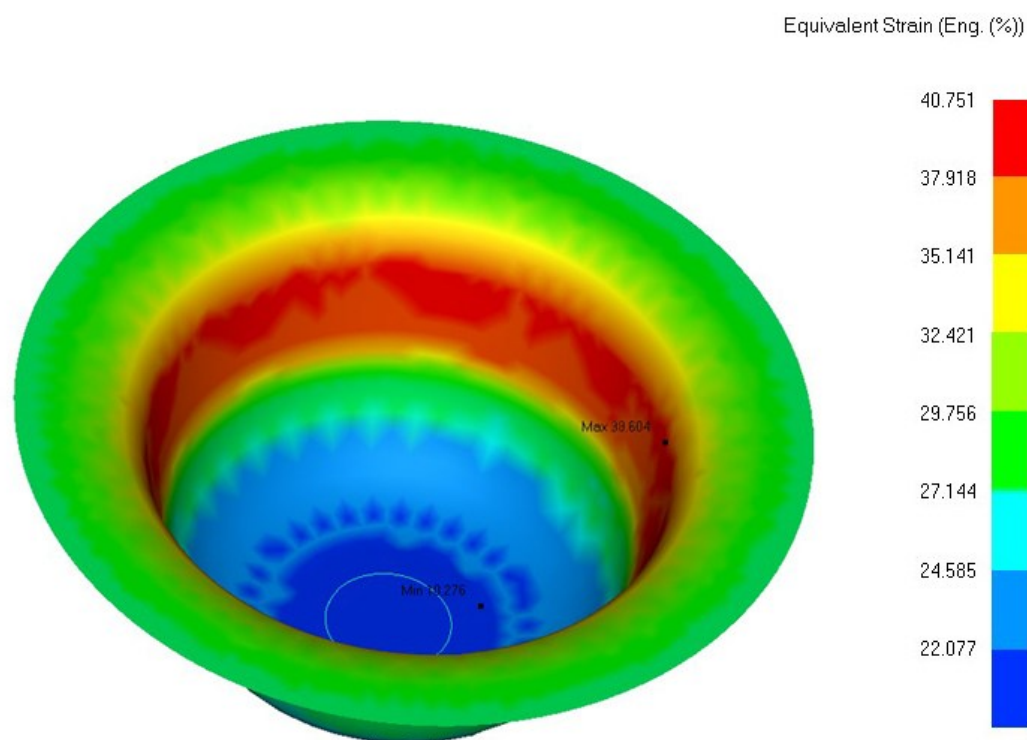


Рисунок 2.4 – Розподіл пластичних деформацій у заготовці

Найбільші еквівалентні деформації становлять 38,6 %.

Найменші деформації зафіксовані в центральній зоні дна виробу (10,2 %).

Аналіз результатів показав відсутність різких локальних концентраторів деформації, що свідчить про достатньо рівномірний перебіг процесу формоутворення.

Рівномірність розподілу деформацій є важливою умовою забезпечення високої якості виробу та мінімізації ризику утворення тріщин.

2.6. Аналіз зміни товщини матеріалу

Одним із найважливіших показників якості виробів, отриманих методом витягування, є зміна товщини стінки.

На рисунку 2.5 наведено карту розподілу товщини заготовки після завершення процесу формоутворення.

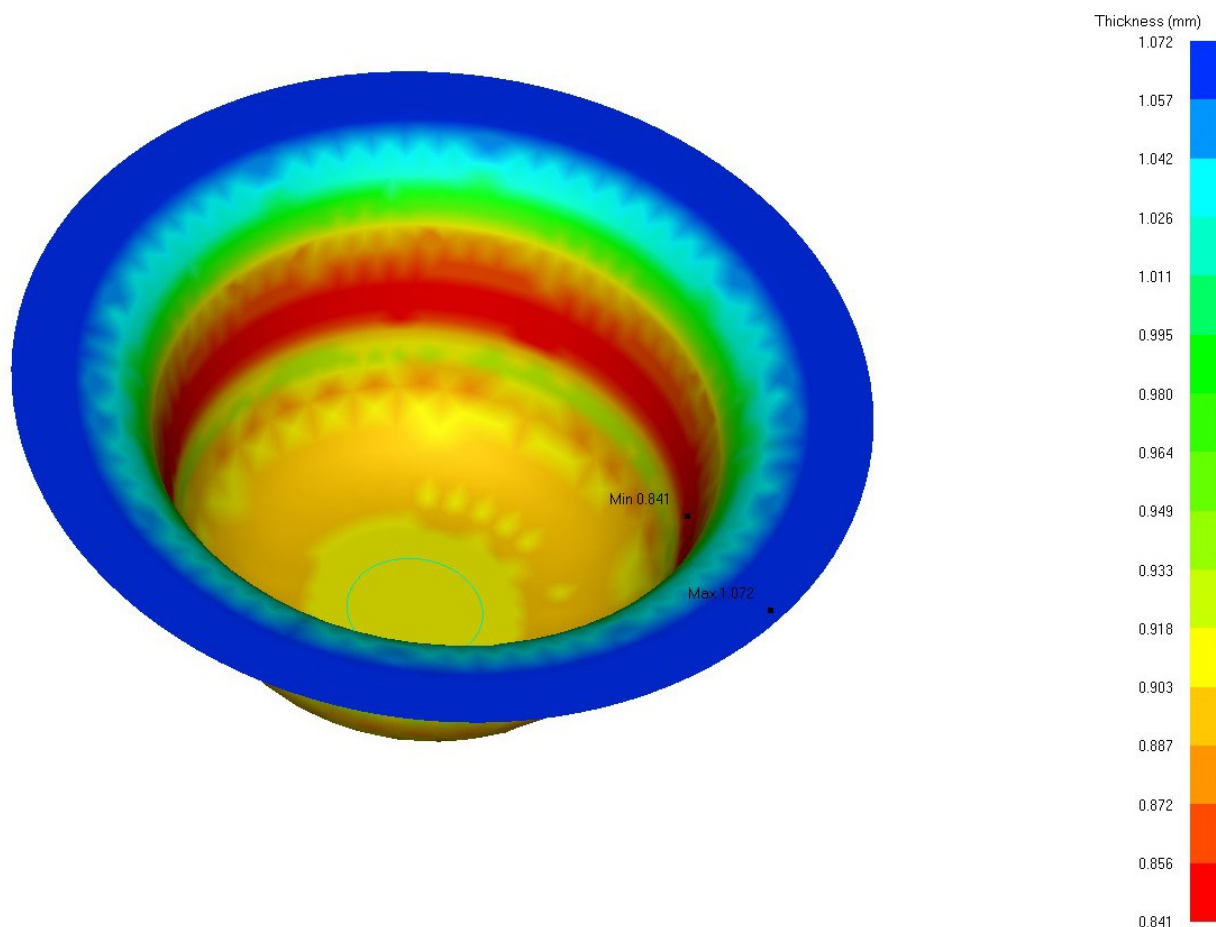


Рисунок 2.5 – Розподіл товщини матеріалу після витягування

Аналіз результатів показує, що найбільше стоншення матеріалу виникає в зоні циліндричної стінки.

Мінімальна товщина матеріалу становить приблизно 0,84...0,90 мм, що відповідає зменшенню товщини на 10...16 % відносно початкового значення.

У фланцевій частині виробу спостерігається незначне потовщення металу до 1,03...1,07 внаслідок дії стискальних напружень (до 7 % початкової товщини).

Отримані значення перебувають у допустимих межах для сталі DC05 та не призводять до втрати працездатності деталі.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7. Аналіз небезпеки руйнування за FLD-діаграмою

Для оцінки технологічної придатності процесу використано діаграму граничних деформацій (FLD).

На рисунку 2.6 наведено FLD-діаграму, отриману в середовищі FormingSuite.

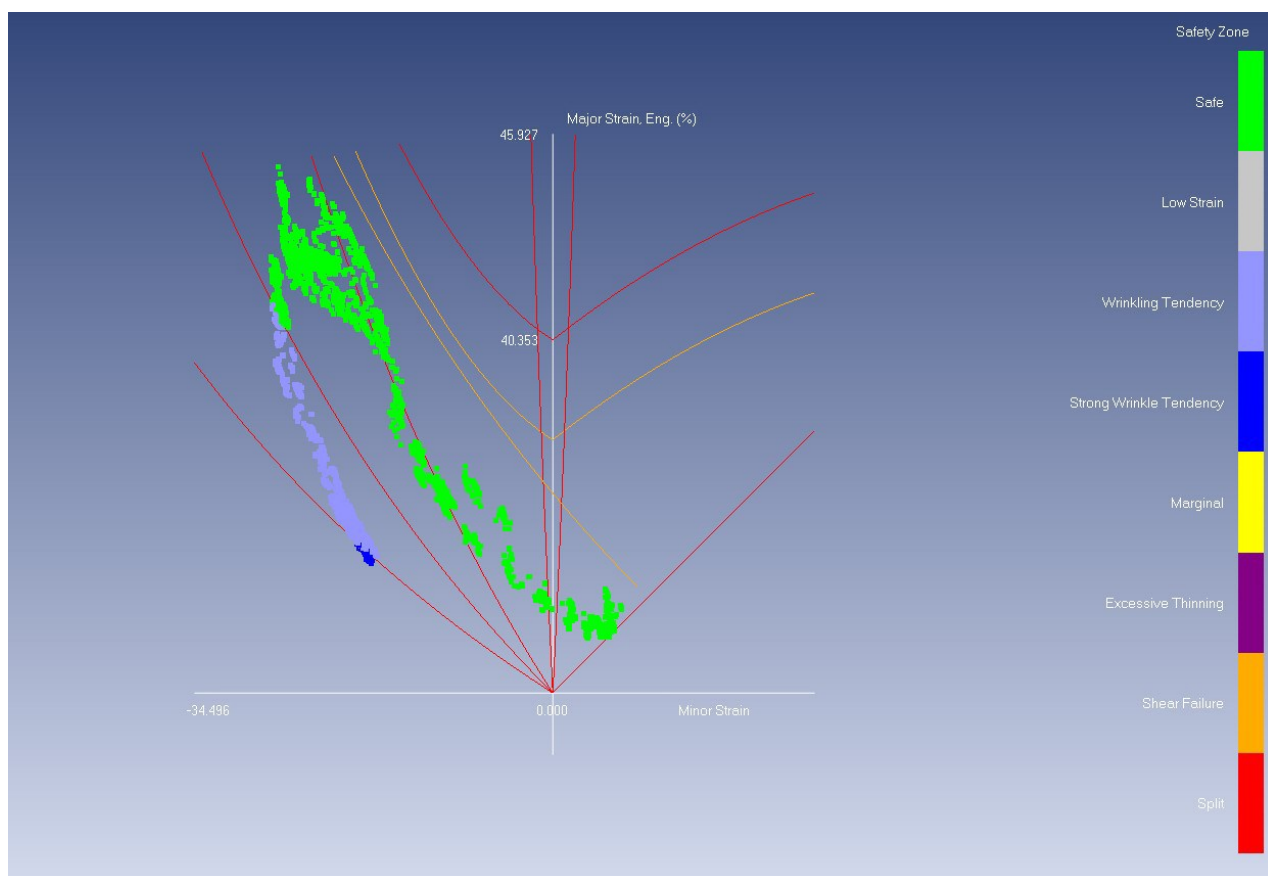


Рисунок 2.6 – Діаграма граничних деформацій FLD

Аналіз положення розрахункових точок показує, що всі елементи заготовки розташовані нижче кривої руйнування.

Лише окремі точки в зоні максимальних стискальних деформацій (синій колір: в нижній лівій області) наближаються до граничної межі.

При цьому жодна з розрахункових точок не перетинає межу руйнування.

Отже, процес витягування може бути реалізований без утворення тріщин, складок та розривів матеріалу.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.8. Оптимізація параметрів технологічного процесу

На основі проведеного моделювання було виконано оцінку впливу основних параметрів процесу на якість виробу.

Встановлено, що найбільший вплив мають:

- радіус матриці;
- радіус пуансона;
- притискне зусилля;
- коефіцієнт тертя;
- товщина заготовки.

Збільшення радіуса матриці сприяє зменшенню максимальних напружень та підвищенню рівномірності деформацій.

Застосування мастильних матеріалів дозволяє знизити сили тертя та зменшити небезпеку руйнування.

Найкращі результати отримано при таких параметрах:

- радіус матриці – 8 мм;
- радіус пуансона – 4 мм;
- притискне зусилля – 17 кН;
- коефіцієнт тертя – 0,10.

2.9. Висновки

У результаті комп'ютерного моделювання процесу холодного витягування деталі типу «Стакан з фланцем» встановлено можливість її виготовлення зі сталі DC05 за прийнятих технологічних параметрів.

Максимальні напруження та деформації локалізуються в зоні переходу фланця у стінку виробу. Мінімальна товщина після деталі становить близько 0,84...0,90 мм, що відповідає допустимому рівню стоншення.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз FLD-діаграми показав відсутність зон руйнування матеріалу. Результати дослідження підтвердили правильність вибору матеріалу заготовки та параметрів штампового оснащення.

Отримані результати використані при обґрунтуванні конструкції штампа та виборі матеріалу деталей матрично-пуансонної групи.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Аналіз конструкції деталі

Об'єктом дослідження є деталь типу «Стакан з фланцем», що належить до класу тонкостінних осесиметричних виробів, які виготовляються методами холодного листового штампування.

Конструкція деталі (рисунок 2.1) складається з:

- плоского круглого фланця;
- циліндричної оболонки;
- перехідної радіусної ділянки між фланцем та стінкою;
- донної частини виробу.

Основними конструктивними параметрами є зовнішній діаметр фланця, діаметр циліндричної частини, висота стакана та товщина стінки.

Особливістю конструкції є наявність плавних переходів між окремими елементами виробу, що сприяє рівномірному розподілу деформацій під час формоутворення. Відсутність гострих кутів дозволяє зменшити концентрацію напружень та підвищити технологічність деталі.

З точки зору технології листового штампування деталь належить до групи виробів, що можуть бути виготовлені методом глибокого витягування із плоскої круглої заготовки.

Основними вимогами до деталі є:

- відсутність тріщин та надривів;
- відсутність складок у фланцевій зоні;
- стабільність геометричних розмірів;
- рівномірна товщина стінки;
- мінімальна шорсткість поверхні.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи відносно невелику товщину стінки та значну глибину виробу, визначальним фактором успішного виготовлення є забезпечення високої пластичності матеріалу та раціональний вибір параметрів процесу витягування.

3.2. Визначення рівня технологічності конструкції деталі

Технологічність конструкції деталі характеризує ступінь її пристосованості до виготовлення із застосуванням найбільш раціональних технологічних процесів за мінімальних витрат матеріалів, праці та виробничих ресурсів при забезпеченні необхідної якості готового виробу.

Для деталей, що виготовляються методами холодного листового штампування, технологічність визначається відповідністю конструктивних параметрів можливостям процесів вирубування, витягування, обрізання та калібрування. Високий рівень технологічності дозволяє зменшити трудомісткість виготовлення, підвищити продуктивність праці та забезпечити стабільність якості продукції.

Об'єктом дослідження є деталь типу «Стакан з фланцем», виготовлення якої передбачається методом холодного глибокого витягування зі сталі DC05 товщиною 1 мм. Основними геометричними параметрами деталі є зовнішній діаметр фланця 120 мм, діаметр циліндричної частини 80 мм та висота стакану 50 мм.

Під час аналізу технологічності встановлено, що форма виробу є осесиметричною та не містить складних просторових елементів, які потребують застосування спеціальних операцій формоутворення. Конфігурація деталі забезпечує можливість виготовлення з круглої листової заготовки без додаткових операцій механічної обробки.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструкція виробу відповідає основним вимогам технологічності деталей, що отримуються методом холодного витягування:

- контур заготовки має просту геометричну форму (форма осесиметрична, умова виконується);
- конструкція допускає використання стандартного штампового оснащення (так, допускає);
- відсутні піднутрення та елементи, які ускладнюють видалення деталі зі штампа (так, форма проста);
- перехід між дном і стінкою виробу виконано плавним радіусом (радіус плавний і становить 3 товщини стінки, умова виконується);
- відсутні локальні концентратори напружень у вигляді гострих кутів (деталь осесиметрична, кути відсутні);
- товщина стінки по всій висоті виробу є однаковою (так, штампування з потоншенням стінки не передбачено);
- забезпечується можливість отримання виробу без проміжного відпалу (штампування здійснюється за одну операцію завдяки використанню сталі для глибокого витягування).

Оскільки всі показники виконуються - деталь технологічна з точки зору процесу витягування

Важливим показником технологічності є співвідношення висоти стакану H до його діаметра d .

Згідно рисунка 2.1 для досліджуваної деталі: $H = 50$ мм, $D = 80$ мм.

Тоді:

$$H / D = 50 / 80 = 0,625$$

Отримане значення відповідає діапазону, характерному для деталей, які можуть бути виготовлені методом холодного витягування без значного ризику втрати стійкості стінок або утворення складок.

Наступним критерієм технологічності є коефіцієнт витягування:

$$m = d / D = 80 / 120 = 0,67$$

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане значення є близьким до гранично допустимого для сталі DC05, проте використання матеріалу з високою пластичністю та застосування комп'ютерного моделювання дозволяють забезпечити успішне виконання процесу формоутворення.

Особливу увагу приділено аналізу радіусів переходів між окремими елементами деталі. У виробках, отриманих методом витягування, надто малі радіуси можуть призводити до локальної концентрації деформацій та виникнення тріщин.

Для даної конструкції прийнято:

- радіус матриці ($R_m=6$) мм;
- радіус пуансона ($R_p=3$) мм.

Такі значення перевищують мінімально допустимі для листового матеріалу товщиною 1 мм та забезпечують відносно плавний перерозподіл деформацій у процесі витягування.

З точки зору використання матеріалу конструкція також є технологічною. Заготовка має форму круглого диска, що дозволяє застосовувати ефективні схеми розкрою листового прокату та забезпечувати високий коефіцієнт використання матеріалу.

Для виготовлення виробу обрана холоднокатана низьковуглецева сталь DC05, яка характеризується високими показниками пластичності, коефіцієнтом нормальної анізотропії понад 1,8 та коефіцієнтом деформаційного зміцнення близько 0,23. Такі характеристики є сприятливими для процесів глибокого витягування та забезпечують рівномірний розподіл деформацій по всій поверхні виробу.

Аналіз конструкції показав, що виготовлення деталі не потребує застосування спеціального обладнання або нестандартних технологічних операцій. Усі переходи технологічного процесу можуть бути реалізовані на універсальному обладнанні для холодного листового штампування із використанням стандартних штампів та пресового оснащення.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3. Основні технологічні розрахунки та вибір обладнання

Для виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем» прийнято такі вихідні дані: матеріал заготовки – DC05; товщина листа – $s = 1,0$ мм; діаметр циліндричної частини – $d = 80$ мм; висота стакану – $h = 50$ мм; діаметр фланця – $D_f = 120$ мм; діаметр вихідної заготовки $D_0 = 180$ мм (за даними програми FormingSuite); тимчасовий опір сталі DC05 – $\sigma_b = 310$ МПа; опір зрізу – $\tau_{зр} = 280$ МПа.

Оптимальний варіант технологічного процесу виготовлення деталі має такий вигляд:

005 Розкрій листового матеріалу на штаби.

010 Вирубкування круглої заготовки діаметром 180 мм.

015 Витягування стакану з фланцем.

020 Обрізання нерівного краю фланця.

025 Калібрування.

030 Контрольна операція.

Операція 005 – розкрій листового матеріалу

Розкрій листового матеріалу виконується на гідравлічних гільйотинних ножицях з похилим ножом.

Технологічне зусилля різання на ножицях визначаємо за формулою:

$$P_p = 0,5 \frac{s^2}{\operatorname{tg} \varphi} \sigma_{зр} = 0,5 \frac{1^2}{\operatorname{tg} 1,5} \cdot 280 = 5344 \text{ Н},$$

де $s = 1,0$ мм – товщина листа;

$\sigma_{зр} (\tau_{зр}) = 280$ МПа — опір зрізу сталі DC05;

$\varphi = 1,5$ — кут нахилу ножа.

З урахуванням можливого притуплення ножів приймаємо коефіцієнт запасу 1,3:

$$P_{005} = 1,3 P_p = 1,3 \cdot 5344 = 6947 \text{ Н}.$$

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, розрахункове зусилля різання становить:

$$P_{005} \approx 7 \text{ кН.}$$

Для виконання операції розкрою доцільно застосувати сучасні гідравлічні гільйотинні ножиці з ЧПК DERATECH VAC-6×4050 CNC Hydraulic Guillotine Shear. Ножиці цього типу забезпечують різання листа товщиною до 6 мм при довжині різку 4050 мм, мають регульований кут нахилу ножа 0,5...2,5° та потужність головного двигуна 15 кВт. Такі параметри значно перевищують потреби для різання сталі DC05 товщиною 1 мм і забезпечують необхідний технологічний запас.

Операція 010 – вирубування круглої заготовки

На цій операції виконується вирубування круглої заготовки діаметром $D_0 = 180 \text{ мм}$:

Довжина контуру вирубування:

$$L = \pi D = 3,14 \cdot 180 = 565 \text{ мм.}$$

Зусилля вирубування визначаємо за формулою:

$$P_{\text{вир}} = \omega F \sigma_{\text{зр}} = \omega L s \sigma_{\text{зр}} = 1,3 \cdot 565 \cdot 1 \cdot 280 = 205660 \text{ Н} \approx 206 \text{ кН},$$

де

$\omega = 1,3$ – коефіцієнт, що враховує притуплення робочих кромek;

$L = 565 \text{ мм}$ – довжина контуру вирубування;

$s = 1,0 \text{ мм}$ – товщина матеріалу;

$\sigma_{\text{зр}} (\tau_{\text{зр}}) = 280 \text{ МПа}$ – опір зрізу.

Зусилля притискання під час вирубування приймаємо 5 % від зусилля вирубування:

$$P_{\text{пр}} = L s q = \pi D_0 s q = 3,14 \cdot 180 \cdot 1 \cdot 10 = 5652 \text{ Н} \approx 6 \text{ кН.}$$

Зусилля зняття штаби з пуансона приймаємо 10 % від зусилля вирубування:

$$P_{\text{зн}} = P_{\text{вир}} \cdot K_{\text{зн}} = 206 \cdot 0,1 = 20,6 \approx 21 \text{ кН.}$$

Загальне технологічне зусилля операції 010:

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{010} = P_{вир} + P_{пр} + P_{зн} + \approx 206 + 6 + 21 = 233 \text{ кН}.$$

З урахуванням коефіцієнта запасу 1,2:

$$P'_{010} = 1,2 \cdot P_{010} = 279,6 \approx 280 \text{ кН}.$$

Отже, для операції вирубкування необхідне зусилля преса не менше:

Операція 015 – витягування стакану з фланцем

Перевіримо можливість виконання витягування.

Коефіцієнт витягування:

$$m = d / D = 80 / 120 = 0,67.$$

Для сталі DC05, яка належить до сталей для глибокого витягування, таке значення є близьким до граничного. Тому остаточна оцінка можливості виготовлення за один перехід повинна виконуватися за результатами моделювання у FormingSuite.

Зусилля витягування визначаємо за формулою:

$$P_B \approx \xi \sigma_B L s = 0,4 \cdot 310 \cdot 565 \cdot 1 = 70060 \approx 70 \text{ кН},$$

де $\xi = 0,4$ – розрахунковий коефіцієнт витяжки;

Зусилля притискання заготовки приймаємо 20 % від зусилля витягування:

$$P_{пр} \approx 0,2 P_B = 0,2 \cdot 70 = 14 \text{ кН}.$$

Загальне технологічне зусилля операції витягування:

$$P_{015} = P_{вин} + P_{пр} = 70 + 14 = 84 \text{ кН}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу 1,3:

$$P_{пр015} = 1,3 \cdot P_{015} = 1,3 \cdot 84 = 109,2 \approx 109 \text{ кН}$$

Отже, для операції витягування необхідне зусилля преса не менше:

Радіус матриці приймаємо $r_M = 6$ мм; радіус пуансона $r_{II} = 3$ мм;

Односторонній зазор між пуансоном і матрицею:

$$z = 1,1 \cdot s = 1,1 \cdot 1 = 1,1 \text{ мм}.$$

Прийняті параметри забезпечують плавне переміщення металу в зону деформації та знижують ризик виникнення тріщин у зоні переходу дна в стінку стакану.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Операція 020 – обрізання фланця

Після витягування виконується обрізання нерівного краю фланця до остаточного діаметра.

Зусилля обрізання рівне:

$$P_{обр} = \omega F_{обр} \sigma_{зр} = \omega L_{обр} s \sigma_{зр} = 1,3 \cdot 376,8 \cdot 1 \cdot 280 = 137155 \text{ Н} \approx 137 \text{ кН},$$

де

$$L_{обр} = \pi D_{обр} = 3,14 \cdot 120 = 376,8 \text{ мм.}$$

Зусилля притискання приймаємо рівним 5 % від зусилля обрізання:

$$P_{пр} = 0,05 \cdot P_{обр} = 0,05 \cdot 137 = 6,85 \text{ кН.}$$

Зусилля зняття відходу приймаємо 10 %:

$$P_{зн} = 0,10 \cdot P_{обр} = 0,10 \cdot 137 = 13,7 \text{ кН.}$$

Загальне технологічне зусилля операції 020:

$$P_{020} = P_{обр} + P_{пр} + P_{зн} = 137 + 6,85 + 13,7 = 157,55 \text{ кН} \approx 158 \text{ кН.}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу 1,2:

$$P'_{020} = P_{020} \cdot 1,2 \cdot 158 = 189,6 \approx 190 \text{ кН}$$

Отже, для операції обрізання необхідне зусилля преса не менше 190 кН.

Вибір пресового обладнання

За результатами розрахунків максимальне необхідне зусилля спостерігається на операції вирубування: $P'_{010} = 280 \text{ кН}$

Операція витягування потребує: $P_{ПР015} = 109 \text{ кН}$

Операція обрізання потребує: $P'_{020} = 190 \text{ кН}$

З урахуванням необхідного запасу за зусиллям, можливості встановлення штампового оснащення, стабільності ходу повзуна та перспективи серійного виробництва доцільно прийняти сучасний серво-механічний прес з номінальним зусиллям не менше 400...450 кН.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для реалізації технологічного процесу приймаємо прес типу AMADA TPL-45FX зусиллям 450 кН. Сучасні серво-преси дозволяють програмувати закон переміщення повзуна, знижувати швидкість у зоні інтенсивного формоутворення та підвищувати стабільність процесу листового штампування. Для серії AMADA TPL мінімальна модель TPL-45FX має номінальне зусилля 450 кН, що забезпечує достатній запас для виконання всіх розрахованих операцій.

Схема елементів кріплення стола преса наведена на рисунку 3.1 [17].

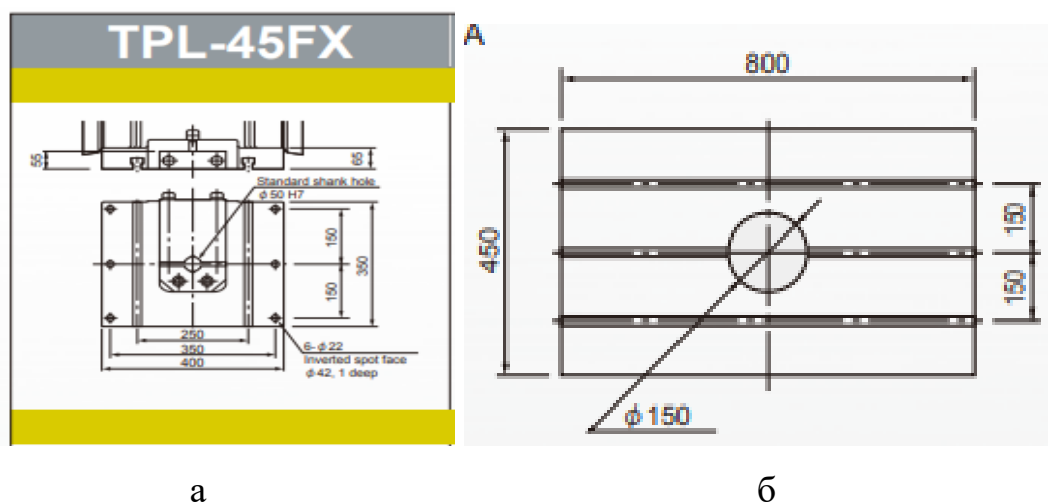


Рисунок 3.1 – Схема елементів кріплення штампів преса AMADA TPL-45FX до повзуна (а) та стола преса (б)

Порівняно з традиційними кривошипними пресами серво-преси мають такі переваги:

- можливість регулювання швидкості повзуна;
- підвищення точності формоутворення;
- зменшення ударних навантажень на штамп;
- зниження рівня шуму;
- можливість контролю зусилля в процесі штампування;
- підвищення ресурсу штампового оснащення.

Таким чином, для виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем» зі сталі DC05 рекомендується застосувати сучасний серво-механічний прес зусиллям 450 кН (таблиця 3.1). Такий вибір забезпечує необхідний технологічний запас,

підвищує стабільність процесу витягування та дозволяє ефективно використовувати штампове оснащення, основні робочі елементи якого виготовляємо зі сталі X165CrMoV12.

За результатами виконаних розрахунків встановлено, що найбільш навантаженою є операція вирубкування круглої заготовки. Прийняте пресове обладнання з номінальним зусиллям 450 кН забезпечує достатній запас міцності та дозволяє виконувати всі операції технологічного процесу без перевантаження обладнання.

Таблиця 3.1 – Ілюстрація технологічного процесу

Операція	Найменування	Розрахункове зусилля, кН	Зусилля з коефіцієнтом запасу, кН	Рекомендоване обладнання
005	Розкрій листа	5,344	7	Гільйотинні ножиці 6×4050 DERATECH VAC-6×4050 CNC Hydraulic Guillotine Shear
010	Вирубкування заготовки Ø180 мм	233	280	Серво-прес 450 кН AMADA TPL-45FX
015	Витягування стакана	84	109	Серво-прес 450 кН AMADA TPL-45FX
020	Обрізання фланця Ø120 мм	158	190	Серво-прес 450 кН AMADA TPL-45FX
025	Калібрування	40...60	60...80	Серво-прес 450 кН AMADA TPL-45FX
030	Контрольна	—	—	Стіл контролера

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1. Розробка конструкції штампа для виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем»

На основі результатів аналізу конструкції деталі, дрібносерійної програми випуску $N=40$ тис. штук деталей та розрахунків технологічного процесу холодного витягування було розроблено конструкцію штампа для виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем». Для забезпечення необхідної точності формоутворення прийнято однопозиційний штамп подвійної дії з притискачем заготовки [3]

Основними елементами штампа (рисунок 4.1) є:

- верхня плита;
- нижня плита;
- пуансон;
- матриця;
- притискач;
- напрямні колонки;
- напрямні втулки;
- виштовхувач;
- кріпильні елементи.

Під час роботи штампа заготовка встановлюється на робочу поверхню матриці та фіксується притискачем. Після початку робочого ходу повзуна преса пуансон переміщується вниз та здійснює процес витягування заготовки через отвір матриці. При цьому відбувається поступове формування циліндричної частини деталі та фланця [2, 3, 7].

Конструкція штампа забезпечує стабільність геометричних параметрів виробу та мінімізує ризик утворення складок у фланцевій зоні. Для зменшення

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактних напружень передбачено раціональні радіуси заокруглення робочих кромок матриці та пуансона.

Враховуючи застосування сталі DC05, яка характеризується високою пластичністю та низькою границею текучості, обрана схема формоутворення забезпечує отримання виробу за один перехід витягування без проміжного відпалу. Сталь DC05 належить до групи матеріалів для особливо глибокого витягування та характеризується низькою границею текучості, високим відносним видовженням і високою здатністю до пластичної деформації.

4.2. Аналіз умов роботи деталей матрично-пуансонної групи

Робочі елементи штампа працюють в умовах складного напруженого стану. Під час кожного циклу витягування на поверхні пуансона та матриці діють значні контактні навантаження, сили тертя та циклічні механічні напруження.

Основними видами руйнування штампового оснащення є:

- абразивне зношування;
- адгезійне зношування;
- контактне викришування;
- пластичне деформування кромки;
- утворення мікротріщин внаслідок циклічних навантажень.

Під час формоутворення заготовка зі сталі DC05 переміщується вздовж робочих поверхонь матриці та пуансона. Незважаючи на застосування мастильних матеріалів, повністю усунути тертя неможливо. Внаслідок цього відбувається поступове спрацювання робочих поверхонь.

Найбільші контактні напруження виникають у зоні заокруглення матриці та на переході між циліндричною частиною і торцем пуансона. Саме ці ділянки визначають ресурс штампа.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для серійного виробництва деталей необхідно забезпечити високу твердість робочих поверхонь у поєднанні з достатньою в'язкістю серцевини. Така комбінація властивостей дозволяє запобігти крихкому руйнуванню інструмента та одночасно знизити інтенсивність зношування.

4.3. Вибір матеріалу деталей матрично-пуансонної групи

Для виготовлення матриці та пуансона обрано інструментальну сталь X165CrMoV12 (DIN 1.2601).

Дана сталь належить до високовуглецевих високохромистих сталей для холодного деформування та характеризується високою твердістю, значною кількістю карбідної фази і підвищеною зносостійкістю.

Основними перевагами сталі X165CrMoV12 є:

- висока прогартовуваність;
- твердість після термообробки до 62...64 HRC;
- високий опір абразивному зношуванню;
- стабільність розмірів;
- добра контактна міцність;
- можливість застосування азотування та PVD-покриттів.

Порівняно зі сталлю Y12A матеріал X165CrMoV12 має значно вищий вміст легувальних елементів та карбідної фази. Це забезпечує суттєве підвищення ресурсу інструмента при роботі в умовах інтенсивного тертя. Дослідження холоднодеформаційних інструментальних сталей показують, що високохромисті сталі мають істотно кращу зносостійкість при однаковому рівні твердості завдяки наявності твердих карбідів хрому та ванадію.

У структурі сталі після термообробки присутні [2, 3, 5]:

- відпущений мартенсит;
- залишковий аустеніт;
- карбіди Cr₇C₃;

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- карбіди Cr_{23}C_6 ;
- карбіди ванадію.

Саме карбідна складова визначає високий опір зношуванню робочих поверхонь штампа.

4.4. Розробка режиму термічної обробки

Для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик деталей матрично-пуансонної групи запропоновано наступний режим термічної обробки:

1. Попередній підігрів до $650...700\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Другий ступінь підігріву до $850...900\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Нагрівання під гартування до $1030...1040\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Витримка залежно від перерізу деталі.
5. Охолодження в маслі або в середовищі захисного газу.
6. Подвійний відпуск при температурі $200...220\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Після гартування формується структура високолегованого мартенситу з частиною залишкового аустеніту. Подвійний відпуск забезпечує стабілізацію структури та зниження внутрішніх напружень.

Очікувана твердість після термічної обробки становить $61...63\text{ HRC}$.

У випадку, якщо програма випуску зросте, для додаткового підвищення зносостійкості можливе застосування кріогенної обробки при температурах до мінус $196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Така технологія сприяє перетворенню залишкового аустеніту в мартенсит і підвищує стабільність структури [4...7].

4.5. Поверхневе зміцнення робочих елементів штампа

Для подальшого підвищення довговічності штампа запропоновано застосування плазмового азотування.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Плазмове азотування здійснюється при температурі 500...530 °С у середовищі азотовмісної плазми. Внаслідок дифузії азоту формується зміцнений поверхневий шар, що складається з нітридів легувальних елементів.

Основними перевагами процесу є:

- підвищення поверхневої твердості;
- збільшення контактної міцності;
- підвищення опору втомному руйнуванню;
- покращення зносостійкості;
- мінімальні деформації інструмента.

Дослідження процесів плазмового азотування інструментальних сталей показують суттєве зростання поверхневої твердості та зносостійкості завдяки формуванню нітридних шарів і дифузійної зони.

Очікувана твердість азотованого шару для сталі X165CrMoV12 може перевищувати 1000 HV.

Для подальшого зменшення коефіцієнта тертя можливе нанесення покриття TiN або TiCN методом фізичного осадження з парової фази (PVD). Такі покриття забезпечують твердість понад 2000 HV та значно зменшують інтенсивність адгезійного зношування. Дослідження штампових сталей X165CrMoV12 із захисними покриттями показують суттєве збільшення ресурсу інструменту при холодному деформуванні металів [8...10].

4.6. Аналіз мікроструктури та прогноз довговічності штампа

У стані постачання структура сталі X165CrMoV12 складається з феритно-карбідної матриці з великою кількістю первинних карбідів хрому.

Після гартування та відпуску формується структура відпущеного мартенситу з рівномірно розподіленими карбідами.

Після плазмового азотування спостерігається утворення нітридного шару; дифузійної зони; мартенситної серцевини [11...16].

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Така багаторівнева структура забезпечує оптимальне поєднання високої поверхневої твердості та достатньої в'язкості серцевини.

Порівняння експлуатаційних характеристик сталей для основних робочих елементів матрично-пуансонних груп наведено наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняльний аналіз сталі У12А

Показник	У12А	X165CrMoV12
Твердість після ТО, HRC	60...62	61...64
Зносостійкість	Базова	Вища у 2...4 рази
Прокаліюваність	Низька	Висока
Стабільність розмірів	Середня	Висока
Можливість азотування	Обмежена	Висока
Можливість PVD-покриттів	Середня	Висока

На основі аналізу літературних даних та умов роботи штампа можна прогнозувати збільшення ресурсу матрично-пуансонної групи не менше ніж у 2...3 рази порівняно зі штампом зі сталі У12А, а при застосуванні плазмового азотування та PVD-покриття – до 4...6 разів.

Отже, застосування сталі X165CrMoV12 у поєднанні з раціональною термічною обробкою та плазмовим азотуванням є технічно обґрунтованим рішенням для виготовлення деталей матрично-пуансонної групи штампа для холодного витягування деталі типу «Стакан з фланцем».

Для заданої програми випуску цілком достатньо рекомендувати заміну сталі У12А на сталь X165CrMoV12.

4.7. Конструкція штампа для витягування

Штамп для витягування призначений для надавання заготовці типу диск просторової осесиметричної форми. Ускіз штампа для витягування подано на рисунку 4.1.

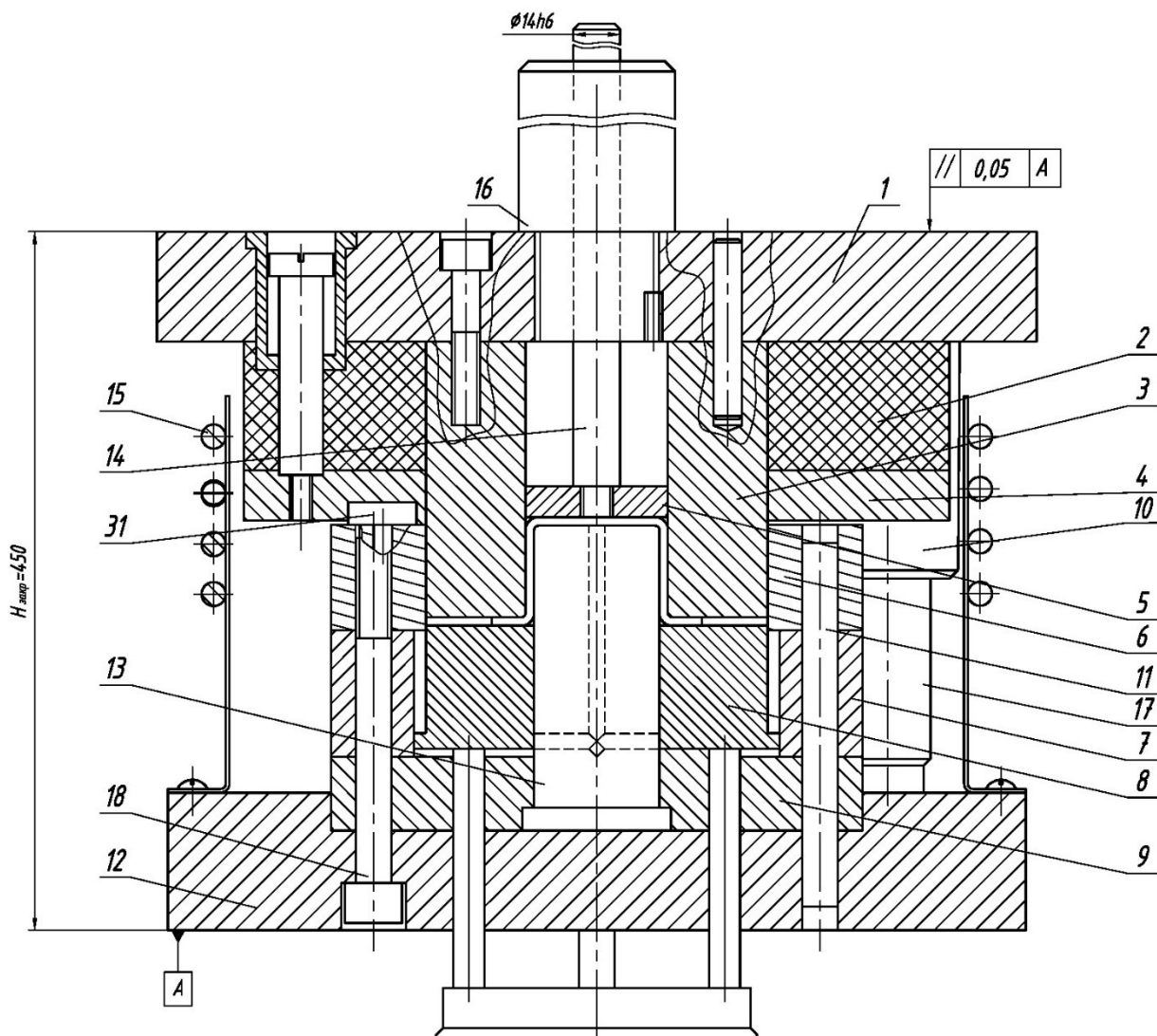


Рисунок 4.1 – Конструкція штампа для витягування:

1 – плита верхня; 2 – гумовий притискач; 3 – матриця; 4 – знімач;
5 – виштовхувач; 6 – обмежувач; 7 – направляюча притискача;
8 – притискач; 9 – пуансонотримач; 10 – направляюча втулка; 11 – штифт;
12 – плита нижня; 13 – пуансон; 14 – штовхач; 15 – огороження; 16 – хвостовик; 17 – направляюча колонка; 18 – гвинт

ВИСНОВКИ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає у розробленні технологічного процесу холодного листового штампування деталі типу «Стакан з фланцем», дослідженні напружено-деформованого стану заготовки засобами комп'ютерного моделювання та обґрунтуванні вибору матеріалів і технологій зміцнення деталей штампового оснащення.

За результатами виконаних досліджень отримано такі основні результати:

– проведено аналіз науково-технічної літератури з питань холодного листового штампування деталей осесиметричної форми та встановлено, що найбільш ефективним методом виготовлення деталей типу «Стакан з фланцем» є холодне глибоке витягування з використанням низьковуглецевих сталей підвищеної пластичності;

– обґрунтовано вибір холоднокатаної сталі DC05 як матеріалу заготовки. Встановлено, що завдяки високим показникам пластичності, коефіцієнту нормальної анізотропії та здатності до деформаційного зміцнення дана сталь забезпечує сприятливі умови для процесу глибокого витягування та отримання якісних виробів без руйнування матеріалу;

– розроблено технологічний процес виготовлення деталі типу «Стакан з фланцем», який включає операції розкрою листового матеріалу, вирубкування круглої заготовки, холодного витягування, обрізання надлишкового металу, калібрування та контролю готового виробу.

- виконано технологічні розрахунки процесу штампування. Визначено діаметр вихідної заготовки 180 мм, коефіцієнт витягування 0,67, параметри матриці та пуансона, а також розраховано зусилля основних операцій технологічного процесу;

– обґрунтовано вибір сучасного виробничого обладнання для реалізації технологічного процесу, зокрема гідравлічних гільйотинних ножиць для

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розкрою листового матеріалу DERATECH VAC-6×4050 CNC Hydraulic Guillotine Shear та серво-механічного преса AMADA TPL-45FX для виконання операцій вирубання, витягування та обрізання.

– побудовано цифрову модель процесу формоутворення в програмному комплексі FormingSuite та виконано дослідження напружено-деформованого стану заготовки в процесі холодного витягування;

– встановлено характер розподілу напружень і деформацій у різних зонах виробу. Показано, що максимальні еквівалентні напруження та пластичні деформації локалізуються в зоні переходу радіусної частини фланця у циліндричну, де реалізуються найбільш інтенсивні процеси пластичного деформування.

– за результатами аналізу зміни товщини заготовки встановлено, що найбільше стоншення матеріалу відбувається в зоні стінки під радіусною частиною дна у стінку виробу, проте отримані значення залишаються в допустимих межах для сталі DC05 та не призводять до втрати працездатності деталі.

– аналіз результатів моделювання та FLD-діаграми показав відсутність зон руйнування матеріалу та критичних областей утворення складок, що підтверджує можливість виготовлення деталі за прийнятих технологічних параметрів.

– розроблено конструкцію штампового оснащення для виготовлення деталі методом холодного витягування, яка забезпечує стабільність процесу формоутворення, необхідну точність виробу та можливість серійного виробництва;

– проведено аналіз умов роботи деталей матрично-пуансонної групи та встановлено, що основними факторами, які визначають довговічність штампа, є контактні навантаження, абразивне та адгезійне зношування, а також циклічна дія механічних напружень.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для виготовлення матриці та пуансона обґрунтовано застосування високохромистої інструментальної сталі X165CrMoV12, яка характеризується високою твердістю, значною кількістю карбідної фази, підвищеною зносостійкістю та стабільністю властивостей після термічної обробки.

Розроблено режим термічної обробки деталей штампа, що включає гартування з температури 1030...1040 °C та подвійний відпуск за температури 200...220 °C. Встановлено, що після такої обробки формується структура відпущеного мартенситу з дисперсними карбідами та забезпечується твердість на рівні 61...63 HRC.

Для підвищення довговічності штампового оснащення обґрунтовано застосування плазмового азотування робочих поверхонь. Показано, що даний метод дозволяє підвищити поверхневу твердість, контактну міцність та стійкість до зношування без суттєвого впливу на розміри деталей.

Проведено аналіз мікроструктури та механічних властивостей сталі DC05 і інструментальної сталі X165CrMoV12. Встановлено, що поєднання високої пластичності матеріалу заготовки та високої зносостійкості матеріалу штампа забезпечує ефективну реалізацію процесу холодного витягування.

Виконано порівняння запропонованого рішення зі штампами, виготовленими зі сталі Y12A. Встановлено, що використання сталі X165CrMoV12 у поєднанні з термічною обробкою та плазмовим азотуванням дозволяє підвищити ресурс штампового оснащення приблизно у 2,5...3 рази та знизити витрати на ремонт і обслуговування.

Отримані результати можуть бути використані під час проєктування технологічних процесів холодного листового штампування та розроблення штампового оснащення для виготовлення деталей осесиметричної форми в умовах серійного та масового виробництва.

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nasulea M. D., Oancea G. Influence of DC05 Deep Drawing Steel Real Material Properties on Numerical Simulation of Incremental Forming Process // MATEC Web of Conferences. 2021. Vol. 343. Article 03006. DOI: 10.1051/mateconf/202134303006.
2. Lee H.-G., Lee A., Lee S.-G., Kim C.-R., Kim J.-C., Shin S.-Y. Microstructure and Mechanical Properties of High-Strength Tool Steels // Archives of Metallurgy and Materials. 2025. Vol. 70, No. 3. P. 1181–1187. DOI: 10.24425/amm.2025.154465.
3. Roberts G., Krause G., Kennedy R. Tool Steels. 5th ed. Materials Park, Ohio : ASM International, 1998. 364 p.
4. Bombac D., Fazarinc M., Saha Podder A., Kugler G. Study of Carbide Evolution during Thermo-Mechanical Processing of AISI D2 Tool Steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 2013. Vol. 22. P. 742–747.
5. Torkamani H., Raygan S., Rassizadehghani J. Comparing Microstructure and Mechanical Properties of AISI D2 Steel after Bright Hardening and Oil Quenching // Materials and Design. 2014. Vol. 54. P. 1049–1055.
6. Das D., Dutta A. K., Ray K. K. Influence of Varied Cryotreatment on the Wear Behavior of AISI D2 Steel // Wear. 2009. Vol. 266. P. 297–309.
7. Fukaura K., Yokoyama Y., Yokoi D., Tsujii N., Ono K. Fatigue of Cold-Work Tool Steels: Effect of Heat Treatment and Carbide Morphology on Fatigue Crack Formation, Life, and Fracture Surface Observations // Metallurgical and Materials Transactions A. 2004. Vol. 35. P. 1289–1300.
8. Unterweiser P. M., Gray A. G. Source Book on Nitriding. Metals Park : ASM International, 1977. 332 p.
9. Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. Materials Park, Ohio: ASM International, 2003. 256 p.
10. Mittermeijer E. J., Somers M. A. J. Thermochemical Surface Engineering of Steels. Sawston : Woodhead Publishing, 2015. 784 p.

					<i>БР 0826.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Conci M. D., Bozzi A. C., Franco A. R. Effect of Plasma Nitriding Potential on Tribological Behaviour of AISI D2 Cold-Worked Tool Steel // Wear. 2014. Vol. 317. P. 188–193.
12. Cho K. T., Song K., Oh S. H., Lee Y. K., Lee W. B. Enhanced Surface Hardening of AISI D2 Steel by Atomic Attrition during Ion Nitriding // Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 251. P. 115–121.
13. Diaz-Guillen J. C., Naeem M., Hdz-Garcia H. M. et al. Duplex Plasma Treatment of AISI D2 Tool Steel by Combining Plasma Nitriding and Post-Oxidation // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 385. Article 125420.
14. Podgornik B., Sedlacek M., Cekada M., Jacobson S., Zajec B. Impact of Fracture Toughness on Surface Properties of PVD Coated Cold Work Tool Steel // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 277. P. 144–150.
15. X., Wang B., Sun D., Li C., Han L., Gu J. Effect of Pre-Existing VC Carbides on Nitriding and Wear Behavior of Hot-Work Die Steel // Applied Surface Science. 2019. Vol. 486. P. 179–186.
16. Duan Y., Qu S., Jia S., Li X. Evolution of the Fretting Wear Damage of a Complex Phase Compound Layer for a Nitrided High-Carbon High-Chromium Steel // Metals. 2020. Vol. 10. Article 1391.
17. https://amadapresssystem.com/wp-content/uploads/2025/02/TPL-FX_brochure_REV1.pdf

					БР 0826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		