

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет літакобудування

Кафедра технології виробництва літальних апаратів

Пояснювальна записка

ДО дипломної роботи
(тип кваліфікаційної роботи)
магістра
(освітній ступінь)

на тему «Дослідження технологічних параметрів поверхнево-пластичного деформування силових деталей літака ударно-барабанним методом»

ХАІ.104.1-96А1.24В.134.142-9/19ПЗ

Виконав: здобувач(ка) 2 курсу групи № 1-96А1
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
(код та найменування)

Спеціальність 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»
(код та найменування)

Освітня програма «Технології виробництва та ремонту літальних апаратів»
(найменування)

Пруденко М. Д.
(прізвище та ініціали здобувача (ки))

Керівник: Юрій Д'ЯЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

Рецензент: Юрій ЧОРНИЙ
(ім'я та прізвище)

Харків – 2024

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет _____ літакобудування _____
Кафедра _____ технології виробництва літальних апаратів _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Галузь знань _____ 13 «Механічна інженерія» _____
(код та найменування)
Спеціальність _____ 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» _____
(код та найменування)
Освітня програма _____ «Технології виробництва та ремонту літальних апаратів» _____
(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



(підпис)

Катерина МАЙОРОВА

(ім'я та прізвище)

« _____ » _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пруденко Максим Дмитрович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Дослідження технологічних параметрів поверхнево-пластичного деформування силових деталей літака ударно-барабанним методом

керівник кваліфікаційної роботи Д'яченко Юрій Веніамінович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом Університету № 506-уч від « 01 » 04 2024 року.





2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи 16.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломної практики; літературний огляд та патентний пошук на тему кваліфікаційної роботи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати): аналіз методів поверхнево-пластичного деформування деталей літальних апаратів; теоретичні основи ударно-барабанного методу зміцнення ППД; розробка математичної моделі процесу поверхневого зміцнення ударами кульок; інженерна методика моделювання поверхневого зміцнення ударами кульок; залишкові деформації в осьовій зоні; залишкові напруження в осьовій зоні.

5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал завданням не передбачено.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		
		завдання видав	завдання прийняв	
1	Д'яченко Ю. В., професор каф. 104	22.04.24		4.05.24
2		26.04.24		16.05.24
3		28.04.24		28.05.24
4		29.04.24		9.06.24

Нормоконтроль 
(підпис)


Юрій Д'ЯЧЕНКО «14» 06 2024 р.
(ім'я та прізвище)

7. Дата видачі завдання «22» 04 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз методів поверхнево-пластичного деформування деталей літальних апаратів	4.05.24	
2	Теоретичні основи ударно-барабанного методу зміцнення ППД	16.05.24	
3	Розробка математичної моделі процесу поверхневого зміцнення ударами кульок	28.05.24	
4	Інженерна методика моделювання поверхневого зміцнення ударами кульок	9.06.24	
5	ДОДАТОК А Залишкові деформації в осьовій зоні	10.06.24	
6	ДОДАТОК Б Залишкові напруження в осьовій зоні	12.06.24	

Здобувач


(підпис)

Пруденко М. Д.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи


(підпис)

Юрій Д'ЯЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОВЕРХНЕВО-ПЛАСТИЧНОГО	
ДЕФОРМУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	8
1.1. Вплив поверхневого зміцнення на ресурс деталей ЛА.....	9
1.2. Класифікація технологічних методів ППД деталей літака	10
1.3. Пневмодинамічний метод зміцнювання	12
1.4. Віброударний метод зміцнювання довгомірних деталей літака.....	14
1.5. Дробоструминний метод зміцнювання	15
1.6. Технологічні особливості віброзміцнювання	16
1.7. Струминно-механічний метод зміцнювання	17
1.8. Ударно-барабанний метод зміцнювання.....	18
1.9. Технологічні методи забезпечення ресурсу літака	19
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДАРНО-БАРАБАННОГО	
МЕТОДУ ЗМІЦНЕННЯ ППД.....	24
2.1 Режимні параметри ударно-барабанного методу зміцнення ППД.....	25
2.2 Параметри напружено-деформованого стану поверхневого шару	28
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ	
ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ УДАРАМИ КУЛЬОК.....	30
3.1 Види моделей та методи їх використання у розрахунках	31
3.2 Опис моделі поверхневого зміцнення ударами кульок	31
3.3 Результати моделювання поверхневого зміцнення ударами кульок	34
4 ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ	
ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ УДАРАМИ КУЛЬОК.....	39
4.1 Визначення індексу деформації поверхні при одиничному	
ударі кулькою	40
4.2 Особливості багатоударної зміцнюючої обробки	42
4.3 Визначення глибини пластично деформованого шару.....	43
4.4 Визначення напружень пластично деформованого шару	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	51
ДОДАТОК А Залишкові деформації в осьовій зоні	52
ДОДАТОК Б Залишкові напруження в осьовій зоні	55

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячено дослідженню технологічних параметрів поверхнево-пластичного деформування (ППД) силових деталей літака з використанням ударно-барабанного методу.

Основну увагу приділено дослідженню впливу цього методу на фізико-механічні властивості поверхневого шару матеріалів деталей, а також на підвищення їхньої експлуатаційної довговічності.

У роботі розглянуто основні принципи та механізми формування залишкових напруг стиснення у поверхневому шарі деталей при ППД. Проведено комплексний аналіз технологічних режимів обробки та їх вплив на параметри напружено-деформованого стану (НДС) оброблюваних деталей. Розроблено математичну модель, яка описує процес формування стискаючих напруг при ударному впливі сферичних елементів.

Теоретичні дослідження проводилися з використанням сучасних обчислювальних пакетів на основі методу кінцевих елементів для моделювання та аналізу НДС.

INTRODUCTION

The qualification work is devoted to the study of technological parameters of surface plastic deformation (SPD) of aircraft power components using the shot-peening method.

The main focus is on the study of the influence of this method on the physical and mechanical properties of the surface layer of component materials, as well as on the increase of their operational durability.

The work considers the basic principles and mechanisms of formation of residual compressive stresses in the surface layer of parts during SPD. A comprehensive analysis of technological processing modes and their influence on the parameters of the stress-strain state (SSS) of the processed parts is carried out. A mathematical model is developed that describes the process of formation of compressive stresses under the impact of spherical elements.

Theoretical studies were conducted using modern computational packages based on the finite element method for modeling and analysis of SSS.

ВСТУП

Фізико-механічні властивості поверхневого шару матеріалу деталі суттєво відрізняються від внутрішніх. Ці відмінності обумовлені спадковістю обробки та впливом експлуатаційних умов.

Навіть у разі ретельної механічної обробки важко запобігти мікроскопічним подряпинам на поверхні, які є місцем концентрації напружень.

Найбільш сприятливий мікрорельєф поверхні деталі може бути поверхневим зміцненням, що створює на ній залишкові стискувальні напруження. У результаті підвищуються твердість, міцність, опір відриву та утомна міцність поверхневого шару.

Поверхнєве зміцнення завдяки стабільним залишковим напруженням стискування, наклепу та сприятливому мікропрофілю поверхні підвищує витривалість деталей порівняно з механічною обробкою у 2 – 2,5 разу і більше, частково або повністю знижує шкідливий для витривалості деталей вплив конструктивних концентраторів напружень, покриттів і корозійних середовищ.

Одним з найпоширеніших методів підвищення витривалості металів і сплавів є поверхнево-пластичне деформування (ППД), внаслідок якого поверхневий шар матеріалу зазнає значних пластичних деформацій, що супроводжується зміною його механічних властивостей і виникненням залишкових напружень стиснення.

Сутність ППД полягає у створенні нерівномірної деформації поверхневого шару конструкції у пружно-пластичній та пластичній сферах, після якої в процесі розвантаження в цьому шарі виникають напруження стискування високої інтенсивності. Ці напруження врівноважуються залишковими напруженнями розтягування низької інтенсивності в серединних шарах матеріалу.

Тривалими дослідженнями встановлено, що довговічність, а отже, і ресурс деталей із конкретного матеріалу визначають станом поверхневого шару та його пошкодженням і меншою мірою станом внутрішніх шарів матеріалу деталей. Тому одним із основних питань, які необхідно вирішити під час проектування та виготовлення конструкцій, є забезпечення високої опірності поверхневого шару.

Оброблення деталей динамічними методами ППД дає змогу більш вигідно впливати на матеріал деталі, обробляти фасонні профілі, забезпечуючи при цьому необхідну точність і якість поверхневого шару при високій продуктивності.

Метою дослідження в даній роботі є удосконалення існуючого методу визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) деталі при поверхневому зміцненні кульовими ударами та розробка методу визначення параметрів поверхневого зміцнення з використанням комп'ютерних технологій.

Завдання дослідження, які необхідно вирішити для досягнення поставлених цілей:

1. Розробка математичної моделі створення стискаючих напруг від ударів сферичного робочого середовища.

2. Розробка методики визначення параметрів НДС оброблюваної деталі за результатами математичного моделювання.

Предметом дослідження є методи розрахунку технологічних параметрів ППД поверхонь, що не сполучаються, деталей літальних апаратів на основі математичного моделювання процесу зміцнення кульовими ударами.

В якості інструментарію дослідження використано сучасні обчислювальні пакети на основі методу скінченних елементів та програми для розрахунків та інженерних розрахунків.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОВЕРХНЕВО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1 Вплив поверхневого зміцнення на ресурс деталей ЛА

У процесі експлуатації конструкції планера ЛА зазнають високих навантажень, що багаторазово повторюються. За цих умов механізм впливу поверхневого зміцнення на конструкційну міцність матеріалів суттєво відрізняється від того, який діє в області невисоких напружень, характерних для умов звичайної втоми. Утворення залишкових стискальних напружень у поверхневому шарі має вирішальне значення для підвищення опірності втоми деталей ЛА [1].

У малоцикловій області при високих навантаженнях, що повторюються, найважливішим чинником, який зумовлює підвищення довговічності високоміцних матеріалів, є радикальне покращання мікрорельєфу поверхні.

Унаслідок наклепу ліквідуються гострі надрізи, забезпечується найбільш сприятливий мікрорельєф поверхні й цим підвищується опірність утомі поверхневого шару деталі [1].

Для алюмінієвих сплавів В93, В95 і Д16 ефект наклепу при високих навантаженнях, що повторюються, є дуже значимим. Для високоміцних алюмінієвих сплавів В93 і В95 через їхню велику чутливість до стану поверхні ефект наклепу сильніший, ніж для менш міцного сплаву Д16 [1].

Зміцнювальному обробленню методами поверхнево-пластичного деформування (ППД) можуть піддаватися деталі різних форм і розмірів, виготовлених із різних металів. Існує велика група малотвердих деталей на зразок панелей, стінок, дуг, профілів, які виконано з високоміцних сталей алюмінієвих і титанових сплавів. Силові деталі, наприклад, панелі, циліндри, балки, стояки, вали, кронштейни, виконані з високоміцних легированих сталей, а також титанових сплавів, можна зміцнювати поверхневим наклепом як по всіх, так і по окремих поверхнях [2, 3].

Форма зміцнюваної поверхні впливає на вибір способу, засобів і режимів оброблення методами ППД. Тому вона може бути використана як основний параметр для систематизації технології місцевого зміцнення. Від геометрії поверхні залежить також ступінь концентрації напружень [1, 3].

Після зміцнювального оброблення деталі методами ППД змінюється мікрогеометрія або шорсткість поверхні. При цьому використання деяких способів зміцнювання зменшує шорсткість обробленої поверхні (розкочування отворів), використання інших – збільшує її (дробоструминна обробка), але у всіх випадках параметри початкової й кінцевої шорсткості взаємозв'язані. Чим менша шорсткість поверхні деталей перед зміцненням, тим ефективніший процес зміцнювання. Залежно від форми, розмірів і матеріалу деталі, вимог до геометричних параметрів і якості поверхні, виробничих та інших умов можна використовувати різні способи зміцнювального оброблення методами ППД [4].

У процесі експлуатації конструкції планера ЛА зазнають високих навантажень, що багаторазово повторюються. За цих умов механізм впливу поверхневого зміцнення на конструкційну міцність матеріалів суттєво відрізняється від того, який діє в області невисоких напружень, характерних для умов звичайної втоми (рисунок 1.1).

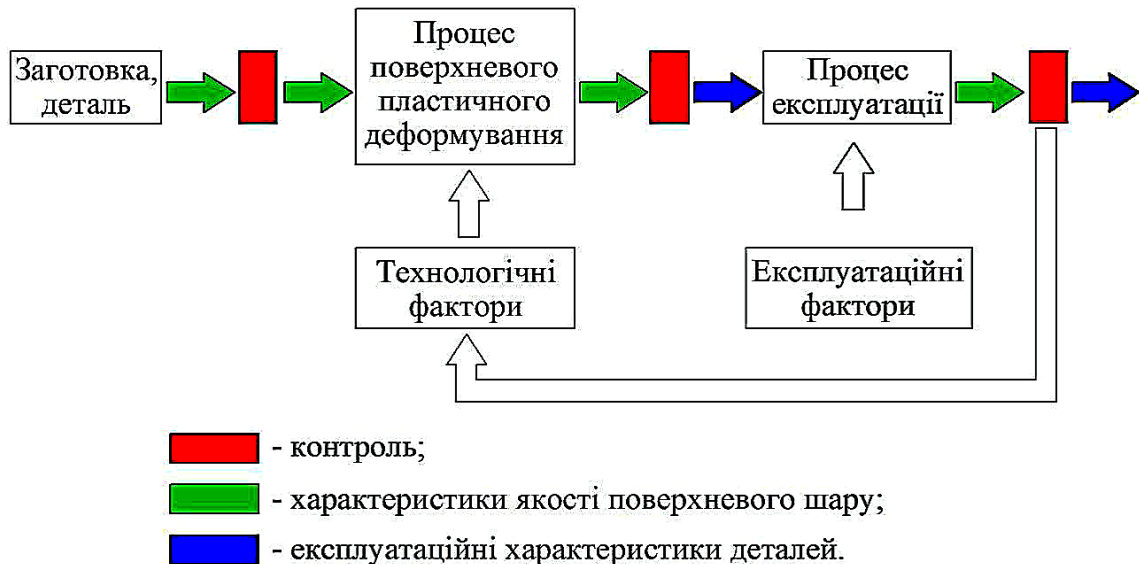


Рисунок 1.1 – Взаємозв'язок процесів експлуатації та ППД деталей ЛА

Переваги поверхневого пластичного деформування:

- під час обробки деталей відбувається зміцнення поверхневого шару, що дозволяє не порушити волокна металу та сприяє утворенню дрібнозернистої структури сплаву;
- відсутність шаржування оброблюваної поверхні абразивними частинками шліфувальних кругів;
- відсутність термічних дефектів;
- сприятлива мікрогеометрія обробленої поверхні (унаслідок обробки досягаються мінімальні параметри шорсткості поверхні);
- виникнення сприятливих стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі;
- плавне та стабільне підвищення мікротвердості поверхні [4, 5, 6].

1.2 Класифікація технологічних методів ППД деталей літака

Незалежно від варіантів технологічної схеми існують два види поверхневого зміцнювання деталей:

- значне пластичне деформування поверхневого шару без знімання металу (поверхнєве зміцнювання способами вібронаклепу, пневмодинамічного, віброударного, дробоструминного або гідродробоструминного наклепу);
- незначне пластичне деформування зі зніманням металу завглибшки

0,01...0,3 мм при малій глибині наклепаного шару (поверхнєве зміцнювання способами віброшліфування або гідроабразивного шліфування й полірування).

Форма зміцнюваної поверхні високонавантажених деталей літака впливає на вибір способу, технологічного обладнання і режимів оброблення методами ППД [7, 8]. Тому вона може бути використана як основний параметр для систематизації технології місцевого зміцнення (рисунок 1.2).

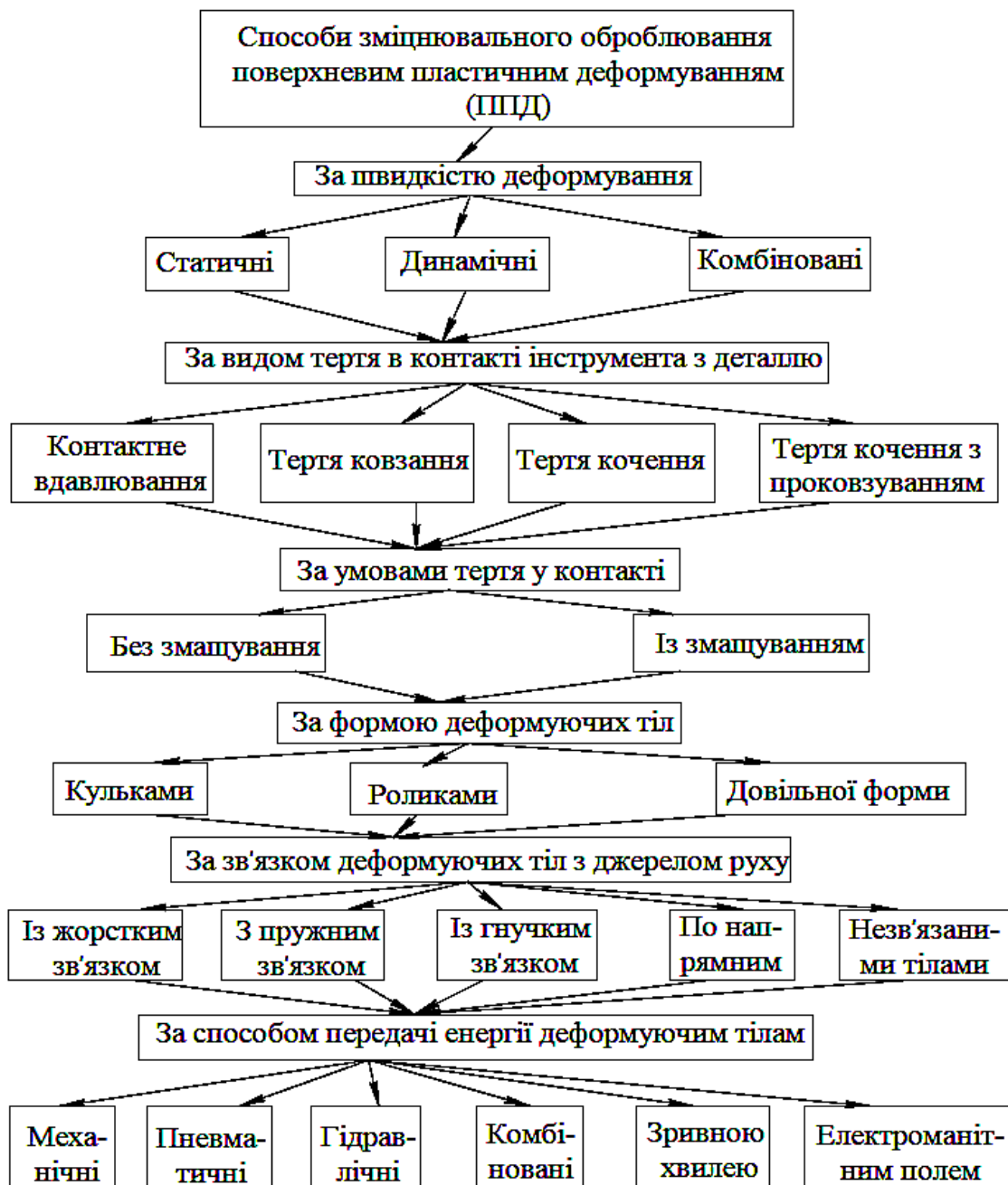


Рисунок 1.2 – Класифікація методів ППД

У технології авіабудування ударні методи зміцнювання вибирають залежно від форми та розмірів силових деталей літака, умов її роботи та стану поверхнєвого шару, технологічних можливостей методу (рисунок 1.3).

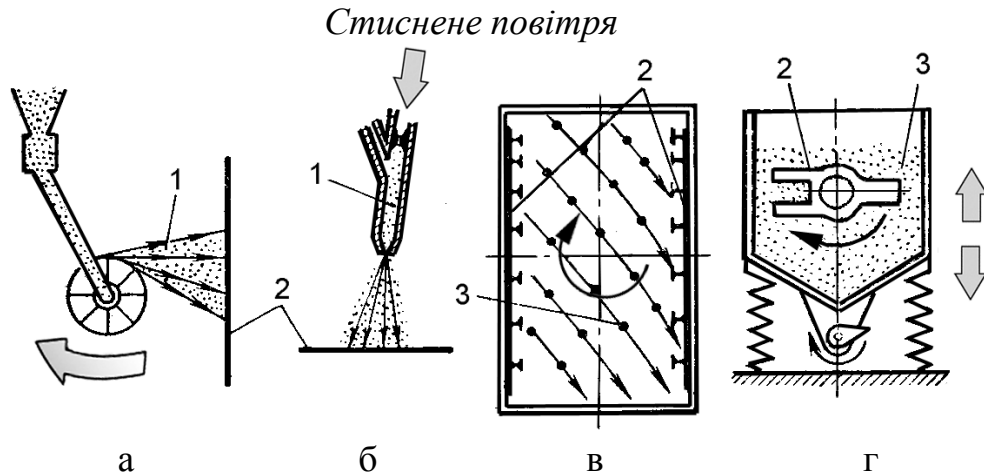


Рисунок 1.3 – Ударні методи зміцнювання: а – струминно-механічний; б – струминно-пневматичний; в – ударно-барабанний; г – вібраційний; 1 – дріб; 2 – деталь; 3 – гранули або кульки

При оброблюванні динамічними методами ППД робочі середовища здійснюють вплив на поверхню деталей багаторазовими зіткненнями з нею [5, 9].

1.3 Пневмодинамічний метод зміцнювання

Пневмодинамічний метод зміцнювання ґрунтується на використанні кінетичної енергії кульок або дробу, яку задає їм струмінь повітря, що подається у робочу камеру під тиском 0,3...0,6 МПа. Основні параметри пневмодинамічного методу зміцнювання: тиск повітря; матеріал і діаметр кульок (дробу), їх твердість; відстань від щілини сопла до оброблюваної поверхні; довжина робочої зони камери; питома навантаження кульок (дробу); час оброблення. Пневмодинамічному зміцнюванню піддають деталі з алюмінієвих сплавів із товщиною стінок не менше 4 мм і сталеві – з товщиною стінок не менше 2,5 мм [9].

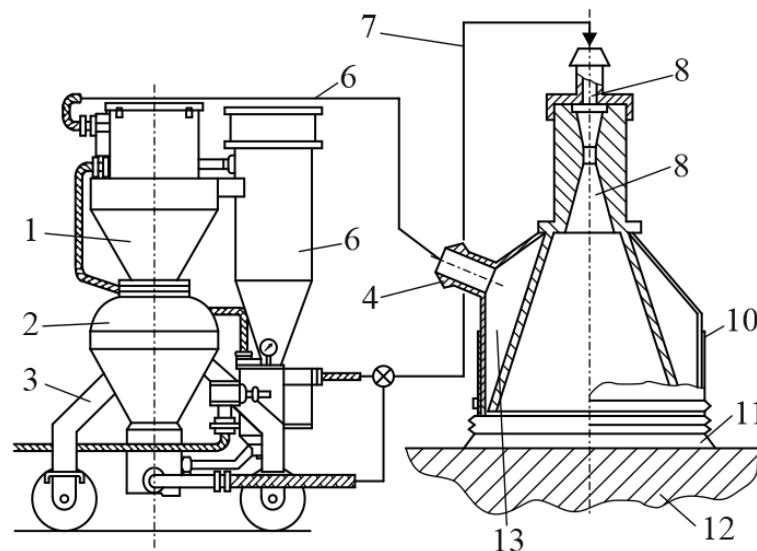
Для зміцнювального оброблення пневмодинамічним способом застосовують установку моделі БДУ-Е2М (рисунок 1.4, а). Установка складається із систем подачі 2, збирання 1 та очищування 5 дробу й робочої камери 10, з'єднаної з основними системами за допомогою рукавів подачі дробоповітряної суміші 7 і відсмоктування дробу 6. Маса завантаженого дробу – до 100 кг.

Робоча камера складається зі штуцера 8, сопла 9, що подає дріб на поверхню заготовки 12, і порожнини розрідження 13, через штуцер 4 якої дріб відводиться із камери. Щоб уникнути вилітання дробу з камери, передбачено щіткове ущільнення 11. Установку змонтовано на візку 3, і її можна транспортувати. Деформувальні тіла – дріб діаметром до 2 мм.

Сучасне обладнання для пневмодинамічного зміцнення (рисунок 1.4, б) виготовляє компанія SONATS (Франція).

Пневматичний переносний пристрій (рисунок 1.5) широко використовується як засіб місцевого зміцнювального оброблення методами ППД.

Пристрій складається з корпусу 1 і ручки 2. Робоча камера пристрою є каналом у корпусі між профільованим центральним тілом 6 і бічною кришкою 8. Для зберігання кульок до задіяння пристрою й збирання їх після роботи в корпусі передбачено вловлювач 3 із заслінкою 4.



а



б

Рисунок 1.4 – Схема пневмодинамічної установки моделі БДУ-Е2М (а) та загальний вигляд переносного пристрою (б) компанії SONATS (Франція)

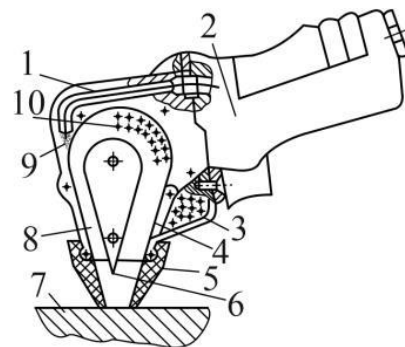


Рисунок 1.5 – Схема пневматичного переносного пристрою для місцевого зміцнювального оброблення

Пристрій має комплект пружних гумових насадок 5, конфігурація яких залежить від форми поверхонь 7, що зміцнюються. Стиснене повітря підводиться в робочу камеру через сопло 9, відпрацьоване повітря відводиться через отвори 10 у бічних кришках. Після завершення роботи пристрою відкривається заслінка 4, що перекриває профільований канал, кульки прямують до вловлювача 3, при цьому відпрацьоване повітря виходить через бічні отвори вловлювача [10].

1.4 Вібродударний метод зміцнювання довгомірних деталей літака

Суть вібродударного зміцнювання полягає в деформуванні поверхневого шару металу внаслідок співударяння деталі з насипаними на її поверхню сталевими кульками. Цей метод зміцнювання здійснюється на спеціальній вібраційній установці (рисунок 1.6), призначеній для одночасного оброблення зовнішніх і внутрішніх поверхонь довгомірних деталей, наприклад лонжеронів крила, лонжеронів лопатей гвинтів вертольота[10].

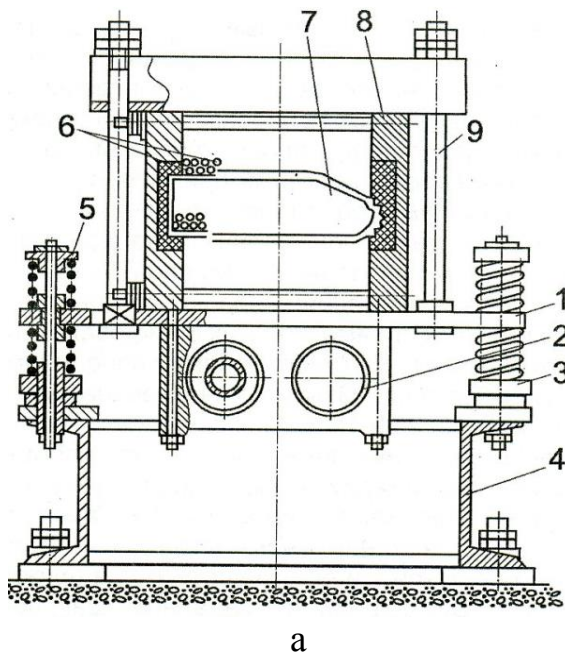


Рисунок 1.6 – Схема (а) та загальний вигляд вібростенда (б) для поверхневого зміцнення лонжерона лопаті вертольота

Процес зміцнення здійснюють шляхом масованого нанесення ударів сталевими загартованими кульками діаметром від 4 до 6 мм по внутрішній та зовнішній поверхнях лонжерона лопаті, поміщеного в контейнер. На жорсткій платформі 1 закріплені регульовані дебалансні вібратори 2. Платформа 1 за допомогою пружних підвісок 3, 5 встановлена на рамі 4, закріпленій на фундаменті.

Лонжерон 7 поміщають у спеціальний контейнер 8, на поверхні, що підлягають обробленню, насипають сталеві кульки 6. Щоб кульки не висипалися, торці контейнера закривають заглушками. Контейнер з лонжероном та кульками прикріплюють до платформи спеціальними шпильками 9. Вібратори 2 синхронно обертаються електродвигуном постійного струму. За допомогою поверхневої деформації, спричиненої ударами сталевих кульок з амплітудою до 2,5 мм і частотою 20 Гц, поверхневий шар лонжерона набуває стискального напруження. Вібродударне зміцнювання дає можливість довести глибину шару наклепу до 0,6 мм як по зовнішній, так і по внутрішній поверхнях лонжерона.

Для зміцнення всіх поверхонь лонжерона передбачено чотири технологічні переходи: – носової частини та внутрішньої поверхні задньої стінки лонжерона; – зовнішньої поверхні задньої стінки лонжерона; – зовнішньої поверхні нижньої дуги та внутрішньої поверхні верхньої дуги лонжерона; – зовнішньої поверхні верхньої дуги та внутрішньої поверхні нижньої дуги лонжерона.

1.5 Дробоструминний метод зміцнювання

Дробоструминний метод зміцнювання ґрунтується на використанні кінетичної енергії робочого сипучого тіла (сталевих або фарфорових кульок, скло-сфер, дробу), які під тиском стисненого повітря подаються на поверхню оброблюваної деталі (рисунок 1.7).

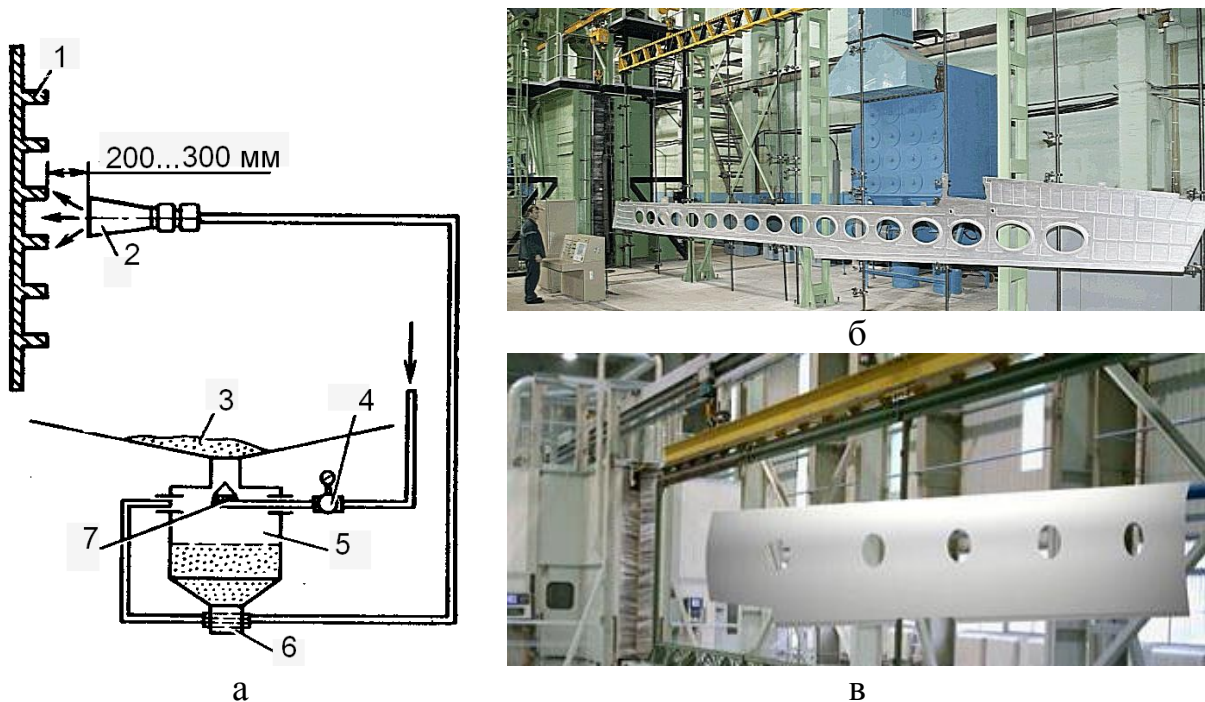


Рисунок 1.7 – Схема дробоструминного оброблення (а) та етап завантаження панелей у камеру (б, в): 1 – панель; 2 – сопло; 3 – збірник дробу; 4 – редуктор; 5 – робочий бункер; 6 – приймальний штуцер; 7 – перепускний клапан

Дробоструминне зміцнювальне оброблення довгомірних деталей без формоутворення здійснюється в спеціальних установках, що мають вигляд великих камер, при вертикальному положенні деталі [10]. Як оброблювальне середовище застосовують сталевий литий дріб марки ДСЛ діаметром 0,8...1,2 мм, сталеві кульки з конструкційної сталі марки ШХ-15 діаметром 0,8...3,0 мм. Відстань від сопла до оброблюваної поверхні становить 200...250 мм, сопло переміщається поперек ребер жорсткості зі швидкістю 0,5...0,9 м/хв [10].

1.6 Технологічні особливості віброзміцнювання

Суть процесу віброзміцнювання полягає в такому. Робоче середовище, що складається з абразивних або металевих частинок (гранул, кульок), та оброблювані деталі, розміщені в контейнері віброустановки (рисунок 1.8), здійснюють механічні коливання з прискореннями (10...15) g .

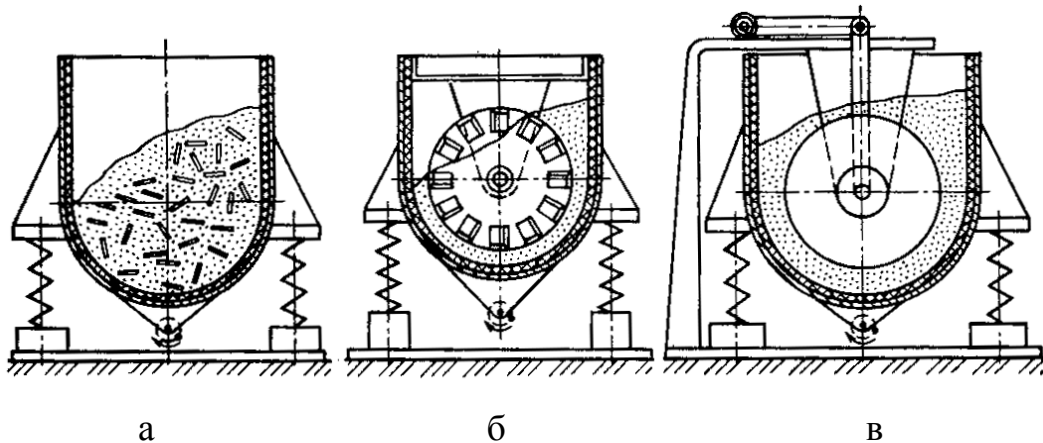


Рисунок 1.8 – Способи завантаження деталей під час віброзміцнювання:
 а – вільне розташування; б – закріплення в резервуарі;
 в – закріплення на ізольованій опорі

Під впливом цих коливань частинки робочого середовища набувають енергії, якої достатньо для здійснення пластичного деформування поверхневого шару деталі.

Основні параметри процесів ППД, що визначають величини наклепу, залишкового напруження й шорсткості поверхні:

- характеристики робочого середовища (матеріал і діаметр кульок; матеріал, зернистість і форма абразивного наповнювача);
- амплітуда й частота коливань, які задають швидкість і прискорення віброуючим частинкам;
- тривалість процесу зміцнювання.

Залежно від використовуваного робочого середовища віброзміцнювання можна виконувати як операцію віброшліфування або віброполірування.

Віброшліфування здійснюється абразивними гранулами із зерном розміром понад 50 мкм і призначене для зняття з поверхні деталей дефектних шарів і забезпечення шорсткості R_z 1,25. У поверхневому шарі деталей виникає високе залишкове напруження стиску з незначною глибиною поширення (до 80 мкм).

Віброполірування виконується абразивними гранулами із зерном розміром менше 50 мкм і призначене для забезпечення шорсткості поверхні деталей з параметром R_z 0,65 і вище. У поверхневому шарі деталей виникає залишкове напруження стиску з малою глибиною поширення (до 50 мкм).

Залишкове напруження стиску, що виникає внаслідок полірування сталевими кульками, порівняно із залишковим напруженням, що виникає під час віброшліфування, дещо менше за величиною, але поширюється на значно більшу глибину (понад 200 мкм).

Віброміцнювання сталевими кульками забезпечує найвище пластичне деформування, його називають *вібронаклепом* і позначають ВН. Віброміцнювання в наповнювачі з абразивних частинок забезпечує велике знімання металу при невеликому підвищенні його опірності втомі, його називають *віброшліфуванням* і позначають ВШ.

Перед зміцненням шорсткість поверхонь деталей зі сталей має бути не вище R_z 20, з алюмінієвих сплавів – не вище R_z 40. Вібронаклеп тонкостінних деталей, наприклад циліндрів, стояків шасі, рекомендується здійснювати перед остаточним шліфуванням отворів, які в цьому разі мають припуск, що дає можливість під час шліфування усунути жолоблення (овальність), якщо воно виникло в процесі оброблення методами ППД.

Вібронаклеп внутрішніх порожнин деталей виконується одночасно з обробленням зовнішніх поверхонь. Для цього внутрішню порожнину на 70 – 80 % заповнюють робочим середовищем і закривають заглушками. Віброміцнювання в одному контейнері деталей, які різко відрізняються один від одного за властивостями матеріалу, формою й масою, неприпустиме.

У процесі вібронаклепу як робоче середовище використовують сталеві кульки діаметром 4...6 мм, які мають бути полірованими, чистими, без дефектів на поверхні. Під час експлуатації кульки необхідно регулярно промивати в гасі, сортувати через 150...200 год і відбракувати. Зберігати їх слід в бункерах у водному розчині триетаноламіну.

Інтенсивність та якість процесів зміцнювання контролюють на підставі визначення деформації зразків-свідків. Зразки-свідки для всіх зміцнюваних сталевих деталей виготовляють зі сталі 30ХГСА або 30ХГСНА й обов'язково шліфують, для зміцнюваних деталей з алюмінієвих сплавів – з матеріалу, аналогічного матеріалу деталей [5, 11].

Прогин зразків-свідків у процесі однобічного зміцнювального оброблення має становити: у разі зміцнювання методом ВШ – не менше 0,4 мм, методом ВН – 1,6...3,0 мм.

1.7 Струминно-механічний метод зміцнювання

В установках для струминно-механічного методу зміцнювання дріб 1 подається на деталь 2 (див. рисунок 1.3, а) за допомогою колеса-імпелера, яке має регульовану частоту обертання від 3000 до 4000 1/хв [10].

Установка з ЧПК моделі УДП-2-3,5 (рисунок 1.9) призначена для зміцнення та формоутворення монолітних фрезерованих панелей крила та фюзеляжу сучасних літаків довжиною до 35 метрів.

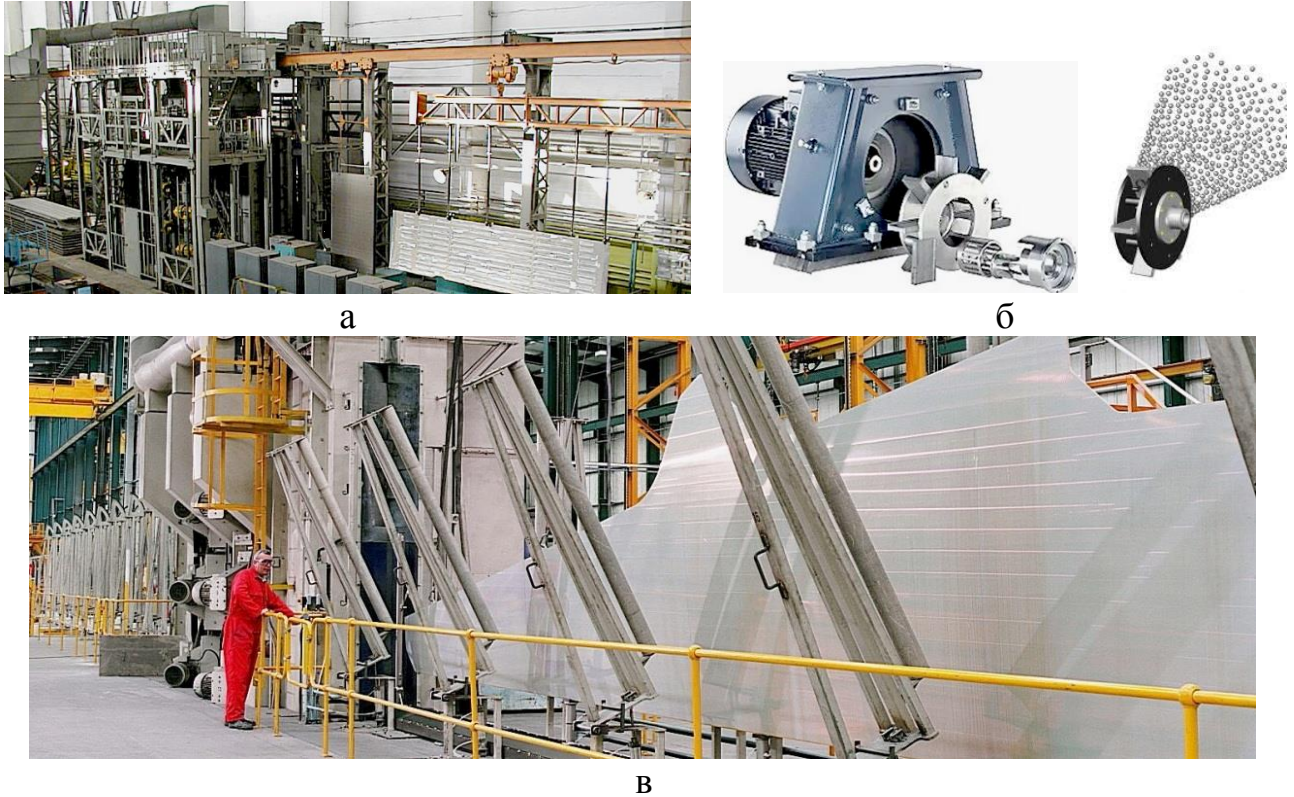


Рисунок 1.9 – Загальний вигляд установки з ЧПК моделі УДП-2-3,2 (а, в) та імпелера (б) для зміцнення панелей крила та фюзеляжу літака

Установка є щілинною камерою, всередині якої розташовані навпроти один одного 14 дробометних головок з імпелерами (див. рисунок 1.9, б). Панель у вертикальному положенні переміщається на рольгангу зі швидкістю від 0,5 до 1,5 м/хв. Технологічними параметрами процесу зміцнення є частота обертання колеса-імпелера та швидкість переміщення панелі.

1.8 Ударно-барабанний метод зміцнювання

Ударно-барабанна обробка – це ППД внаслідок зіткнення закріплених в барабані заготовок з робочими тілами, що падають внаслідок його обертання.

Ударно-барабанний метод зміцнювання застосовують для оброблення алюмінієвих, сталевих і титанових панелей, обшивок лонжеронів, поясів, нервюр, стрингерів, шпангоутів із гладкими й ребристими поверхнями [10].

Ударно-барабанне зміцнювання відбувається внаслідок співударяння гранул сипучого робочого тіла з поверхнями оброблюваних деталей. Сипуче робоче тіло отримує енергію завдяки відцентровим і гравітаційним силам унаслідок обертання барабана (див. рисунок 1.3, в).

Оброблювані деталі 3 закріплюють на знімних щитах 2 (рисунок 1.10). Під час обертання барабана 1 гранули сипкого робочого тіла 4 падають на поверхні оброблюваних деталей, поверхневий шар деталей пластично деформується, внаслідок чого відбувається зміцнення.

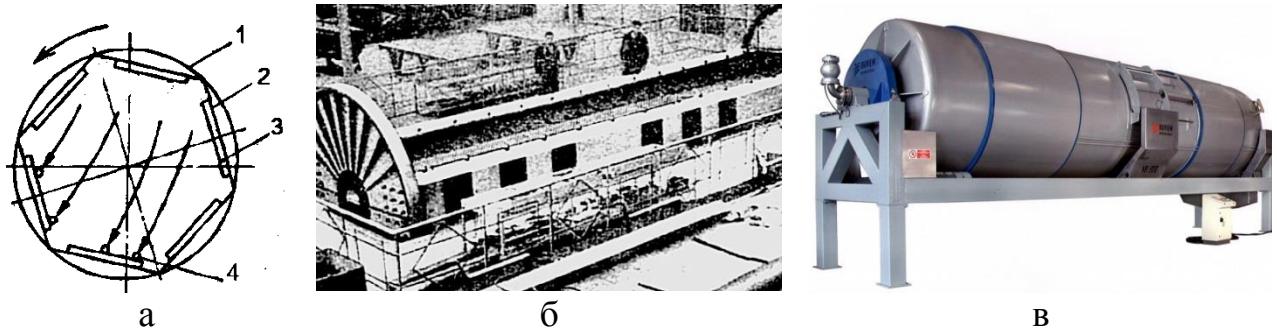


Рисунок 1.10 – Схема розміщення деталей у барабані (а) та загальний вигляд установок УБЯ 3-11 (б) та PERCUSSION DRUM 2-8 компанії SONATS (в)

Барабан установки для ударно-барабанного методу зміцнювання має циліндричну форму діаметром до чотирьох та завдовжки до 20 метрів. У моделях установок цифри позначають відповідно діаметр і довжину барабана в метрах.

Поверхні деталей внаслідок обертання барабана зміцнюються почерзі. Щоб підвищити рівномірність оброблення деталей, напрям обертання барабана періодично реверсують. Оброблення здійснюється насухо з постійною вентиляцією робочих камер барабана. Метод найбільш оптимальний для зміцнення тонкостінних деталей каркасів із алюмінієвих сплавів [9, 12].


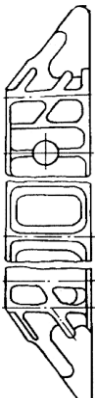
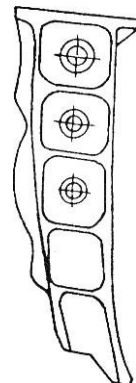
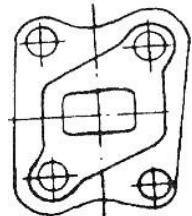
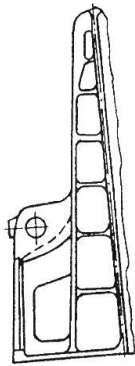
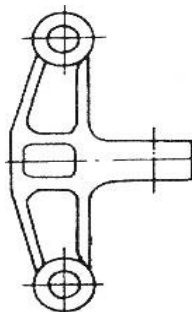
Сталеві кульки застосовують головним чином при обробленні деталей зі сталей та алюмінієвих сплавів. При обробленні деталей з титанових сплавів може виявлятися такий дефект поверхневого шару, як міжкристалітна корозія. Тому застосовують кульки з таких інертних матеріалів, як скло та фарфор.

1.9 Технологічні методи забезпечення ресурсу літака

Основним методом поверхневого зміцнення у наш час є ППД, який полягає у створенні нерівномірної деформації поверхневого шару деталі у пластичній та пружно-пластичній сферах, після чого в цьому шарі в процесі розвантаження виникають напруження високої інтенсивності. Ці внутрішні напруження потім врівноважуються залишковими напруженнями розтягування які мають низьку інтенсивність в середніх шарах матеріалу.

Як наочний приклад величезного обсягу застосування методів зміцнювання ППД в таблиці 1.1 представлені типові деталі і методи ударного зміцнювання, що застосовують для силових монолітних деталей важкого транспортного літака Ан-124 «Руслан» [10, 11].

Таблиця 1.1 – Деталі літака Ан-124 «Руслан», що піддаються зміцненню ударними методами ППД

Типові представники	Панелі, пояси	Панелі, балки, пояси, шпангоути	Балки, кронштейни, щоки	Кронштейни, накладки	Щоки, фітинги, профілі	Кронштейни, траверси, рейки
						
Метод зміцнення	Дробеметний	Ударно-барабанний	Віброшліфування		Вібронаклеп	
Максимальні габарити, мм	27000x2300x144	9400x1200x300	2500x320x220	314x230x75	1200x500x260	
Застосовувані матеріали	Д16чТ, В95пчТ2	Д16Т, 30ХГСА, ВТ22	Д16чТ, В95пчТ2, В93пчТ3, Ак-6Т1	ОТ 4-1, ВТ-22	Д16чТ, В93пчТ3, Ак-6Т1	ВТ-22, ВНС-5, 30ХГСА
Загальна кількість найменувань/деталей	63/126	153/314	432/1489	12/23	61/150	65/188
Фюзеляж	14/28	42/119	89/302	1/2	11/22	8/20
Крило	42/84	51/77	272/989	10/19	25/72	51/154
Оперення	7/14	41/84	53/148	-	25/56	-
Пілон		19/34	15/33	1/2		6/14
Модель обладнання	УДП-2-3,5	УБЯ-3-11 УБЯ-4-20	ВУД-4000 ВУД-2500	ВУД-1000	ВУД-2500 ВУД-1000	

При експлуатації дорогих виробів авіаційної техніки ключовою позицією є забезпечення ресурсу[5, 13]. Відповідно до стандартного визначення, ресурс конструкції – це напрацювання від початку експлуатації або її відновлення після ремонту до припинення або призупинення експлуатації (рисунок 1.11).

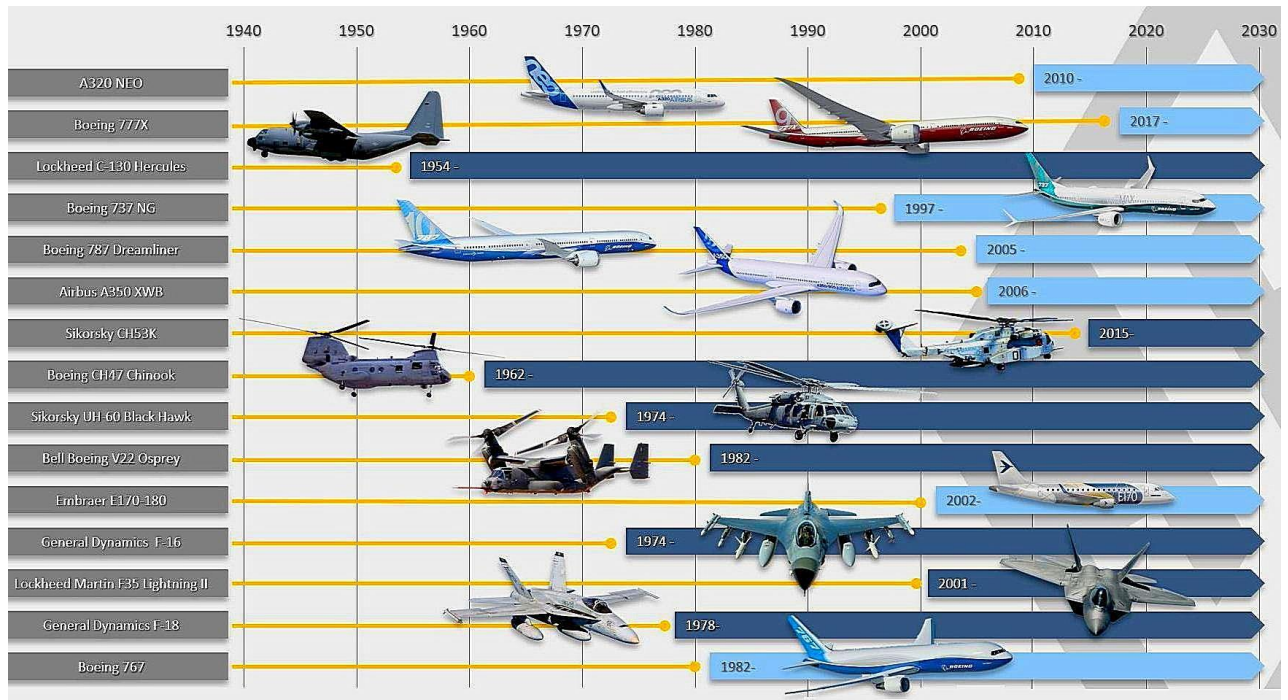


Рисунок 1.11 – Ресурс деяких літаків та вертольотів провідних світових розробників авіаційної техніки

Для порівняння, багатofункціональний винищувач F-16 здійснив свій перший політ ще в 1974 році, призначений ресурс літака перших модифікацій складав 8 тисяч годин, а вартість одного літака в цінах 1975 року становила \$5,6 мільйона доларів [1, 14].

Військово-повітряні сили США розглядає можливість продовжити ресурс літаків F-16 до 12 тисяч годин, що дозволить їм літати до 2048 року.

За закордонними вимогами ресурс сучасного пасажирського літака має досягати 60 і більше тисяч годин нальоту. Відставання у тривалості призначеного ресурсу призводить до зниження конкурентоспроможності вітчизняної авіаційної техніки, економічних втрат [10].

Втомну довговічність найбільш часто лімітують стикові вузли та з'єднання. Методи оцінки їхнього опору втомі повинні враховувати конструктивні, металургійні, технологічні та експлуатаційні особливості.

Як свідчить світова практика, значний внесок забезпечення характеристик довговічності виробів вносить технологія виробництва. Операції обробки напівфабрикатів впливають на поверхневий шар конструкції, переважно фор-

муючи його. Їх вплив на опір втоми деталей у частині утворення втомного ушкодження слід визнати вирішальним. Цей вплив реалізується через зміну властивостей і напружено деформованого стану матеріалу елементів конструкцій при зміні режимів виконання одного і того ж технологічного процесу.

Це визначає доцільність досліджень залишкових напруг різного походження в галузі типових концентраторів напруг, вивчення особливостей їх зміни при впливі експлуатаційних та технологічних факторів, оцінки впливу цих напруг на опір втоми, корозію конструктивних елементів.

Висновки до розділу 1

У розділі проведено аналіз різних методів поверхнево-пластичного деформування (ППД), що застосовуються в авіабудуванні. Особливу увагу було надано ударно-барабанному методу, його технологічним параметрам та впливу на фізико-механічні властивості поверхневого шару деталей.

Розглянуто переваги ударно-барабанного методу порівняно з іншими методами ППД, такі як можливість обробки деталей складної форми, висока продуктивність та рівномірність обробки. Відзначено, що ефективність даного методу залежить від безлічі факторів, включаючи розміри і матеріал дробу, швидкість обертання барабана, час обробки та властивості матеріалу, що обробляється.

Проведений аналіз показав, що ударно-барабанне деформування дозволяє створювати в поверхневому шарі деталей залишкові напруги стиснення, які значно підвищують їхню втомну міцність і зносостійкість. Це підтверджується результатами експериментальних досліджень, наведених у літературі [5, 9].

Розроблена математична модель та методика визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) дозволяють оптимізувати технологічні процеси ППД та адаптувати їх до конкретних умов експлуатації. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність ударно-барабанного методу для обробки силових деталей літака, що відкриває можливості для широкого застосування в авіаційній промисловості.

Для подальшого розвитку ударно-барабанного методу та його оптимізації необхідно проведення додаткових досліджень, спрямованих на розробку математичних моделей процесу обробки та визначення оптимальних режимів для різних типів силових деталей літака. Подальші дослідження та оптимізація технологічних параметрів ППД з використанням комп'ютерного моделювання та експериментальних даних сприятимуть розробці більш надійних та довговічних конструкцій для авіаційних та космічних апаратів [5, 9].

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДАРНО-БАРАБАННОГО МЕТОДУ ЗМІЩЕННЯ ПІД

2.1 Режимні параметри ударно-барабанного методу зміцнення ППД

Режими зміцнювальної обробки ударами кульок характеризуються діаметром деформувальних сипучих тіл, швидкістю їх зіткнення з поверхнею деталі, часом ударної обробки та питомою щільністю потоку кульок.

Зміна діаметра і швидкості зіткнення кульок з поверхнею деталі призводить до зміни кінетичної енергії удару, внаслідок чого можна змінювати ступінь поверхневої деформації, що спричиняється [5, 14].

Унаслідок силового впливу потоку кульок на поверхні деталі утворюються лунки. При повному покритті поверхні деталі та зразків-свідків відбитками вважають, що стиснення всіх шарів по товщині в середньому відповідатиме деформаціям осьового стиснення під одним відбитком (рисунок 2.1).

При обертанні барабана сипке робоче тіло у вигляді кульок розганяється, але у верхній точці відривається від стінки барабана і падає на поверхні деталі та зразків-свідків, що приводить до їх зміцнення.

Схему сил, що діють на кожну з кульок сипучого робочого тіла, зображено на рисунку 2.2.

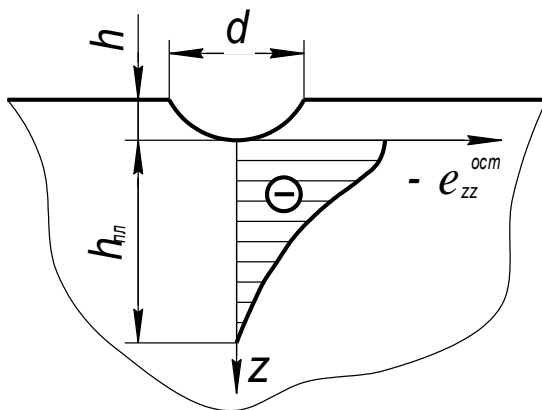


Рисунок 2.1 – Епюра залишкових деформацій осьового стиснення під одним відбитком кульки: d – діаметр; h – глибина лунки; $h_{пл}$ – товщина пластично деформованого шару

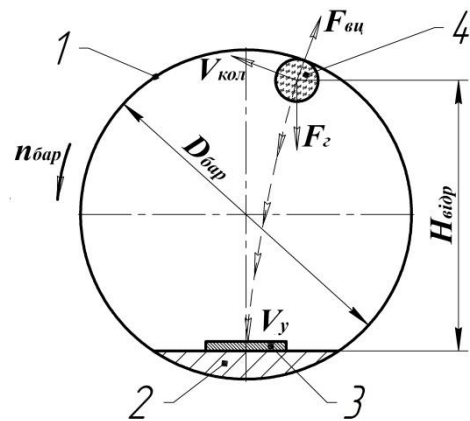


Рисунок 2.2 – Модель ударно-барабанного методу зміцнення:
1 – барабан; 2 – ложемент;
3 – зразок-свідок; 4 – кулька сипучого робочого тіла

На рисунку 2.2 наведено умовні позначення: $F_{вц}$ – відцентрова сила; F_2 – сила гравітації; $V_{кол}$ – колова швидкість кульки; $D_{бар}$ – діаметр барабана; $n_{бар}$ – частота обертання барабана; V_y – швидкість удару кульки; $H_{відр}$ – висота відриву при падінні кульки.

Частота обертання барабана має забезпечувати перевищення сили гравітації над відцентровою силою, тоді для кожної кульки з потоку сипучого робо-

чого тіла виконуватиметься нерівність $mg \geq mV_{\text{кол}}^2/R_{\text{бар}}$, де g – гравітаційна стала; $R_{\text{бар}}$ – радіус барабана. Колова швидкість кульки при обертанні барабана становить $V_{\text{кол}} = \pi D_{\text{бар}} n_{\text{бар}}$.

З цих співвідношень знаходять допустиму частоту обертання барабана установки

$$n_{\text{бар}} \leq \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2D_{\text{бар}}}}, \text{ 1/с.} \quad (2.1)$$

Швидкість V_y зіткнення кожної кульки з поверхнею зразка-свідка визначається висотою відриву $H_{\text{відр}}$ (див. рисунок 2.2), яку для спрощення можна вважати такою, що дорівнює $0,8D_{\text{бар}}$, тоді

$$V_y = \sqrt{2g(0,8D_{\text{бар}})}, \text{ м/с.} \quad (2.2)$$

Питома щільність потоку кульок характеризує кількість кульок, що падають в одиницю часу на одиницю площі поверхні, що зміцнюється [1, 15].

За один оберт барабана наноситься певна кількість відбитків. Це значення залежить від діаметра кульок D і щільності упакування (кількість кульок, що припадають на одиницю площі поверхні). При цьому розрахункова модель упакування кульок (рисунок 2.3, а, б) є спрощеною моделлю реального процесу нанесення відбитків (рисунок 2.3, в). Найбільш щільним з теоретично можливих є гексагональне упакування кульок (рисунок 2.3, г).

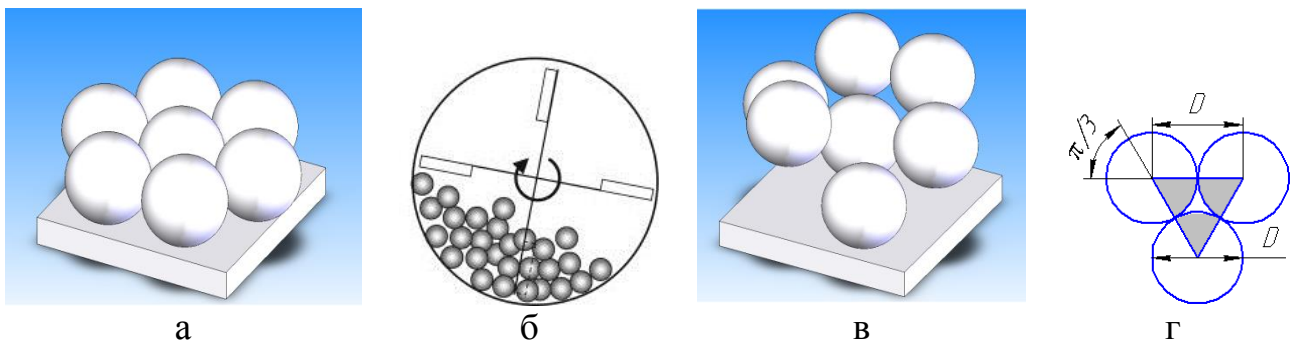


Рисунок 2.3 – Схема упакування кульок: а, б – розрахункова модель; в – модель реального хаотичного упакування; г – схема упакування

Питома щільність потоку кульок, що падають за одиницю часу на зразок-свідок розмірами $L \times b$ з урахуванням частоти обертання барабана, становитиме $q = n_{\text{бар}} N / (Lb)$.

Кількість кульок N діаметром D і площею перерізу за діаметром $\Delta S_{\text{ш}}$, які при максимально щільному укладанні можуть покрити зразок-свідок, становитиме $N = Lbk_{\text{зан}}/\Delta S_{\text{ш}}$, де коефіцієнт заповнення $k_{\text{зан}} \approx 0,907$.

Нанесення ударів кульками та покриття поверхні відбитками у вигляді лунок має випадковий характер. Імовірність того, що на ділянці поверхні, яка зміцнюється, розміром $\Delta S_0 = \pi d^2/4$ здійсниться хоча б один удар, дорівнює $P_1 = 1 - \exp(-n_y)$, де $n_y = qt\Delta S_0$ – параметр Пуассона, що характеризує математичне очікування або середньоімовірну кількість ударів на ділянці зміцнюваної поверхні розміром ΔS_0 .

Розрахунки показують, що за $n_y = 1$ ймовірність того, що ділянка поверхні розміром ΔS_0 буде хоча б одноразово оброблена, становить 64 %, при $n_y = 3$ – вже 95 %, а при $n_y = 6$ – 99,7 %. Отже, при $n_y = 6$ може бути забезпечене практично повне покриття зміцнюваної поверхні відбитками [13, 15].

Час повного покриття поверхні, що зміцнюється, відбитками у вигляді лунок діаметром d може бути розраховано за формулою, отриманою за параметром Пуассона, а саме $t_{100\%} = 6/(q\Delta S_0)$.

Задача визначення напружено-деформованого стану поверхневих шарів зводиться до розрахунку основних параметрів осередку деформації під одиничним відбитком.

Ступінь поверхневої деформації розраховують за формулою

$$d/D = \left(\frac{2}{3} \rho \frac{n_{дин} + 2}{H_{дин}} V_y^2 \right)^{1/n_{дин} + 2}, \quad (2.3)$$

де $N_{дин}$, $n_{дин}$ – відповідно динамічна твердість та показник динамічного зміцнення (таблиця 2.1); ρ – щільність матеріалу кульки.

Таблиця 2.1 – Динамічні, пружнопластичні та механічні характеристики алюмінієвого сплаву Д16Т

$H_{дин}$, МПа	$n_{дин}$	C_0	B_0	E , МПа	μ
2350	2,12	0,248	0,023	72000	0,3

Використовуючи ці співвідношення, можна розрахувати мінімальний час зміцнення оброблення для відповідної щільності потоку кульок

$$\begin{cases} q = \frac{n_{бар} k_{зан}}{\Delta S_{ш}}; \\ t_{min} = \frac{6}{n_{бар} k_{зан}} \left(\frac{d}{D} \right)^{-2}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Інтенсивність та якість процесу ударного зміцнення деталей контролюють за вигином та зовнішнім виглядом спеціальних пластин, так званих зразків-

свідків, розміри яких стандартизовані. Розміри зразків-свідків: довжина $L = 100$ мм, ширина $b = 100$ мм для всіх матеріалів, товщина $H = 2,0 \pm 0,1$ мм для алюмінієвих сплавів, $H = 1,3 \pm 0,03$ мм для титанових сплавів та сталей.

Кріплення зразків-свідків виконують через два отвори діаметром 4,2 мм із міжцентровою відстанню 90 мм. Схема розташування зразків-свідків має бути подана на кресленники деталі. Зразки-свідки закріплюють згідно з цією схемою поряд з деталями, що обробляються, після ударного зміцнення їх знімають і вимірюють стрілу вигину в пристрої за допомогою індикатора годинникового типу.

Схему вимірювання вигину зразка-свідка показано на рисунку 2.4. Зразок-свідок 2 встановлюють на базову площину плити 1 зміцненою поверхнею вниз. Вимірювальний наконечник індикатора годинникового типу опускають на поверхню зразка-свідка та обнуляють. Таким шляхом вимірюють товщину H зразка-свідка. Для вимірювання стріли вигину f_1 зразок-свідок перевертають обробленою поверхнею вгору.

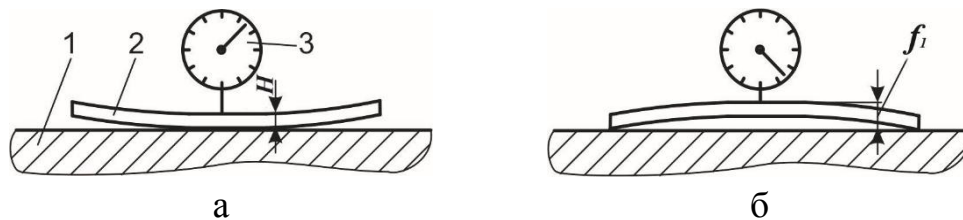


Рисунок 2.4 – Схема вимірювання товщини (а) та вигину (б) зразка-свідка:

1 – зразок-свідок; 2 – плита; 3 – індикатор годинникового типу

За допомогою індикатора годинникового типу вимірюють стрілу вигину з точністю до $\pm 0,01$ мм. Для якісного зміцнених деталей із алюмінієвих сплавів зразки-свідки повинні мати стрілу вигину $f = 2,0 \dots 2,5$ мм.

2.2 Параметри напружено-деформованого стану поверхневого шару

Параметр h/d використовують як критерій геометричної подібності розмірів лунки від вдавлювання кульки. Залежність параметра h/d від ступеня поверхневої деформації d/D – лінійна, тобто

$$h/d = C_0(d/D - B_0), \quad (2.5)$$

де коефіцієнти C_0 і B_0 залежать від пружнопластичних властивостей матеріалу деталей, що зміцнюються.

Товщина пластично деформованого шару h_{nl} пов'язана із глибиною лунки h емпіричним співвідношенням

$$h_{nl} = k_{nl}hD/d, \quad (2.6)$$

де для алюмінієвих сплавів коефіцієнт $k_{nl} = 5,8$ [15].

Внутрішній питомий згинальний момент M/bN^2 визначають залежно від відносної товщини пластично деформованого шару $\gamma = h_{nl}/H$ для різного ступеня поверхневої деформації d/D (рисунок 2.5).

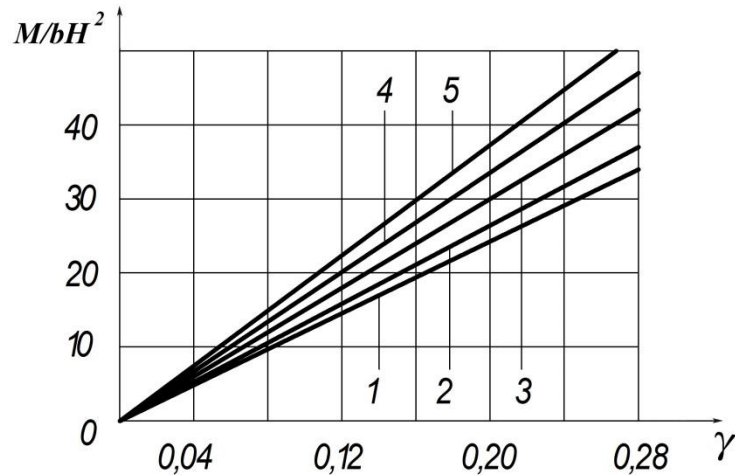


Рисунок 2.5 – Внутрішній питомий згинальний момент, що спричиняється при зміцненні деталей із сплаву Д16Т для різного ступеня поверхневої деформації d/D : 1 – 0,04; 2 – 0,08; 3 – 0,16; 4 – 0,32; 5 – 0,48

Відносний вигин зразка-свідка $\bar{f} = f/H$ на базі вимірювання a_g пов'язаний з внутрішнім питомим згинальним моментом:

$$\bar{f} = 1,5 \left(\frac{a_g}{H} \right) \frac{M}{bH^2} \frac{1}{E_n}, \quad (2.7)$$

де E_n – зведений модуль, пов'язаний з модулем пружності матеріалу E та коефіцієнтом Пуассона μ співвідношенням $E_n = E/(1 - \mu)$, a_g – база вимірювання є такою, що дорівнює довжині зразка-свідка L .

Висновки до розділу 2

У цьому розділі розглянуто теоретичні основи ударно-барабанного методу поверхнево-пластичного деформування (ППД), що є одним з ключових методів підвищення довговічності та ресурсу деталей у авіабудуванні.

Визначено основні режимні параметри процесу, включаючи діаметр деформованих тіл (кульок), швидкість їх зіткнення з поверхнею деталі, час обробки та питому щільність потоку кульок.

Зміна цих параметрів дозволяє регулювати кінетичну енергію удару та ступінь поверхневої деформації, що забезпечує гнучкість процесу та його адаптивність до різних матеріалів і вимог до обробки.

Представлено детальний аналіз сил, що діють на кульки під час обертання барабана, включаючи відцентрову силу та силу гравітації. На основі цього ана-

лізу виведено формули для розрахунку допустимої частоти обертання барабана та швидкості зіткнення кульок з поверхнею деталі, що є важливими параметрами для забезпечення ефективності та безпеки процесу.

Розглянуто питання, пов'язані з щільністю потоку кульок, яка характеризує кількість кульок, що падають на одиницю площі поверхні за одиницю часу, та часом повного покриття оброблюваної поверхні відбитками. Повне покриття поверхні відбитками свідчить про досягнення необхідного ступеня деформації, при якому стиснення всіх шарів матеріалу відповідає деформаціям осевого стиснення під одним відбитком.

Описані параметри напружено-деформованого стану (НДС) поверхневого шару деталі, що виникає в результаті ударно-барабанного деформування. Силовий вплив потоку кульок призводить до утворення лунок на поверхні деталі, що, своєю чергою, сприяє зміцненню поверхні та підвищенню її довговічності.

Для ефективного проведення процесу зміцнення важливо враховувати параметри НДС, що забезпечує рівномірний розподіл напружень та деформацій у поверхневому шарі. Наведено формули для розрахунку ступеня деформації, товщини пластично деформованого шару та внутрішнього питомого згинального моменту, що дозволяють кількісно оцінити ефект зміцнення та оптимізувати параметри процесу.

Таким чином, у цьому розділі представлено всебічний аналіз теоретичних основ ударно-барабанного методу ППД, що дозволяє глибше зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються під час обробки, та визначити оптимальні параметри для досягнення бажаних результатів зміцнення деталей. Це сприяє підвищенню ефективності, надійності та довговічності авіаційних та космічних конструкцій.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ УДАРАМИ КУЛЬОК

3.1 Види моделей та методи їх використання у розрахунках

Модель - це система уявлень, залежностей, умов і обмежень, які описують досліджуваний або описуваний процес або явище. Модель є відображенням об'єктивної реальності і може мати різну природу, структуру і форму представлення [15, 16].

У практиці розрахунків використовуються як аналітичні, так і чисельні методи. Перші ґрунтуються на математичних методах розв'язання крайових задач, які, як правило, складні та трудомісткі, і часто обмежуються досить простими геометричними формами тіл та схемами навантажень. Чисельні методи, до яких відноситься, зокрема, метод скінченних елементів (МСЕ), навпаки, не обмежені ні формою тіл, ні способом прикладання навантаження [16].

Побудова фізичної моделі включає в себе ідеалізацію властивостей структури і зовнішніх впливів.

В цілому конструкція з реального матеріалу під впливом зовнішніх навантажень може мати безліч особливостей, серед яких недосконалість форми, розривність і неоднорідність властивостей матеріалу, особливості в характері зовнішнього навантаження. У практичних розрахунках неможливо врахувати всі існуючі особливості конструкції, матеріалу і навантаження. Тому, приступаючи до практичних розрахунків, необхідно замінити реальні тіла якимись ідеалізованими об'єктами – «механічними моделями».

3.2 Опис моделі поверхневого зміцнення ударами кульок

Обробка кульовими ударами характеризується локальністю пластичної деформації поверхні деталі. В результаті силової дії деформуючого середовища на поверхні утворюються отвори, які визначають певну СС по товщині. Коли поверхня повністю покрита відбитками, можна припустити, що стиснення всіх шарів по товщині в середньому буде відповідати деформаціям осьового стиснення під одним відбитком. При деформованому стані кожного шару нескладно визначити зміну форми і розмірів заготовки в цілому [5, 16].

Під час обробки підтримання пластового тиску проводиться комплексне навантаження. Подальші удари біля кожного відбитка призводять до перерозподілу деформацій таким чином, що при відсутності об'ємних змін розміри деталі в середньому, коли поверхня повністю покрита відбитками, виявляються незмінними. В [3] показано, що лікування підтримання тиску тиском полягає в комплексній взаємодії множинних первинних деформацій прямого навантаження, розвантаження і вторинних деформацій подальшого навантаження.

Геометрична модель являє собою пластину з товщиною H_1 і радіусом R_1 і кулю діаметром $D = 2R$ (рисунок 3.1, а).

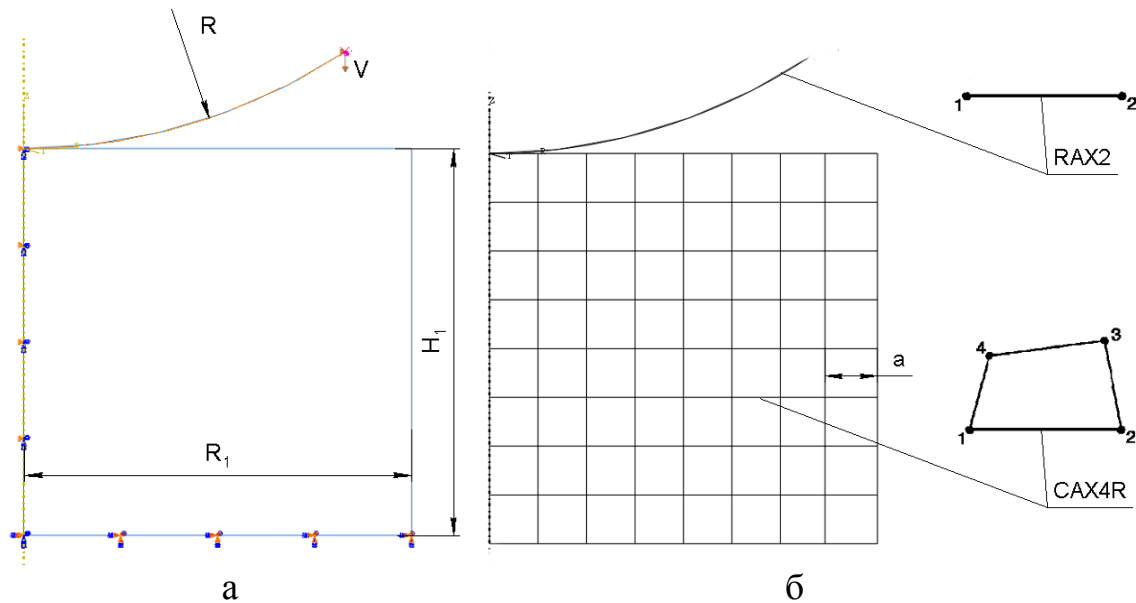


Рисунок 3.1 – Модель одиночного удару кулькою:

а – 2D геометрична модель та граничні умови;

б – скінченно-елементна модель і скінченні типи елементів

Скінченна елементна сітка генерується Abaqus і необхідна для реалізації розрахунку МСЕ. Розмір елемента визначається користувачем. За рекомендацією [4] вибираються елементи RAX2 і CAX4R (див. рисунок 3.1, б).

Види скінченних елементів, що використовуються в моделюванні [16]:

- RAX2 2-вузловий лінійний осесиметричний жорсткий елемент, для використання в осесиметричному планарному позиціонуванні;
- CAXR4R — це чотиривузловий білінійний осесиметричний квадратичний елемент, зменшене інтегрування, для використання в осесиметричній планарній постановці.

Граничні умови (див. рисунок 3.1, а):

- умова симетрії задається на вертикальній грані моделі пластини;
- горизонтальна грань жорстко затиснута;
- у довільній точці на кулі встановлюється швидкість V .

Стартові умови:

- в моделі відсутні початкові напруження і деформації при моделюванні одиночного удару;
- модель містить напруги та деформації, що утворюються під час попередньої фази навантаження для багаторазових ударів.

Спрощення, що використовуються при моделюванні:

- кулька являє собою абсолютно жорстке тіло;
- не враховуються термічні процеси від пластичної деформації і контактного тертя;

- горизонтальна складова вектора швидкості кулі не враховується;
- пластина суцільна, однорідна з ізотропними механічними властивостями.

Фізико-механічні властивості – це також ряд параметрів, що приписуються геометричній моделі для отримання відгуку в процесі моделювання.

Властивості матеріалу визначаються в табличній формі у відповідних налаштуваннях моделі в системі Abaqus CAE. Нижче наведені фізико-механічні характеристики та коефіцієнти тертя матеріалів, що використовуються при моделюванні. Дані про фізико-механічні властивості модельованих матеріалів наведені у вигляді таблиць 3.1, 3.2, 3.3.

Таблиця 3.1 – Фізичні властивості модельованих матеріалів

Марка матеріалу	Щільність $\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	Модуль Юнга $E, \text{ГПа}$	Коефіцієнт Пуассона μ
Д16Т	2770	72	0,34
30ХГСА	7840	210	0,28
ВТ-22	4620	110	0,32
Скло	2700	-	-
ШХ15	7840	-	-

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти тертя ковзання пар матеріалів, що труться

Матеріали для тертя (насухо)	Коефіцієнт тертя $k_{тр}$
30ХГСА-ШХ15	0,07
Скло-30ХГСА	0,03
Ш15-Д16Т	0,12

Таблиця 3.3 – Механічні властивості модельованих матеріалів

Марка матеріалу	Міцність на розрив $\sigma_b, \text{МПа}$	Межа плинності (умовна межа плинності) $\sigma_T (\sigma_{02}), \text{МПа}$	Подовження при розриві δ_b
Д16Т	490	320	0,15
30ХГСА	1100	830	0,20
ВТ-22	1250	950	0,10

Перерахованих вище даних достатньо для створення математичної моделі і проведення чисельного моделювання.

В рамках дослідження змінюються такі параметри:

1. Матеріал пластини:
 - алюмінієвий деформований сплав Д16Т по ГОСТ 4784-97;
 - конструкційна сталь 30ХГСА по ГОСТ 4543-71;
 - деформований титановий сплав ВТ-22 по ГОСТ 19807-91.

Матеріали підбираються згідно з таблицею 3.1.

2. Діаметр куль $D = 6$ мм згідно з виробничою інструкцією ВІ 949-69 «Поверхнєве зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів».
3. Матеріал кульок:
 - підшипникова сталь по ГОСТ 801-78 (для загартування 30ХГСА і Д16Т);
 - Силікатне скло по ТУ 8825-95 (для зміцнення ВТ-22) з метою уникнення міжкристалітної корозії.
4. Товщина плити згідно з рекомендаціями [5]:
 - $H_1 = 2,0$ мм (для Д16Т);
 - $H_1 = 1,3$ мм (для 30ХГСА і ВТ-22).
5. Швидкість удару кульки, $V = 5$ м/с яка відповідає діапазону швидкостей промислових ударних барабанних машин (див. табл. 1.1).

3.3 Результати моделювання поверхневого зміцнення ударами кульок

Результатом моделювання є графіки НДС пластини. Для наочності на рисунку 3.2 наведено приклад результатів моделювання з діаметром кулі 6 мм, швидкістю удару 5 м/с для матеріалу Д16Т.

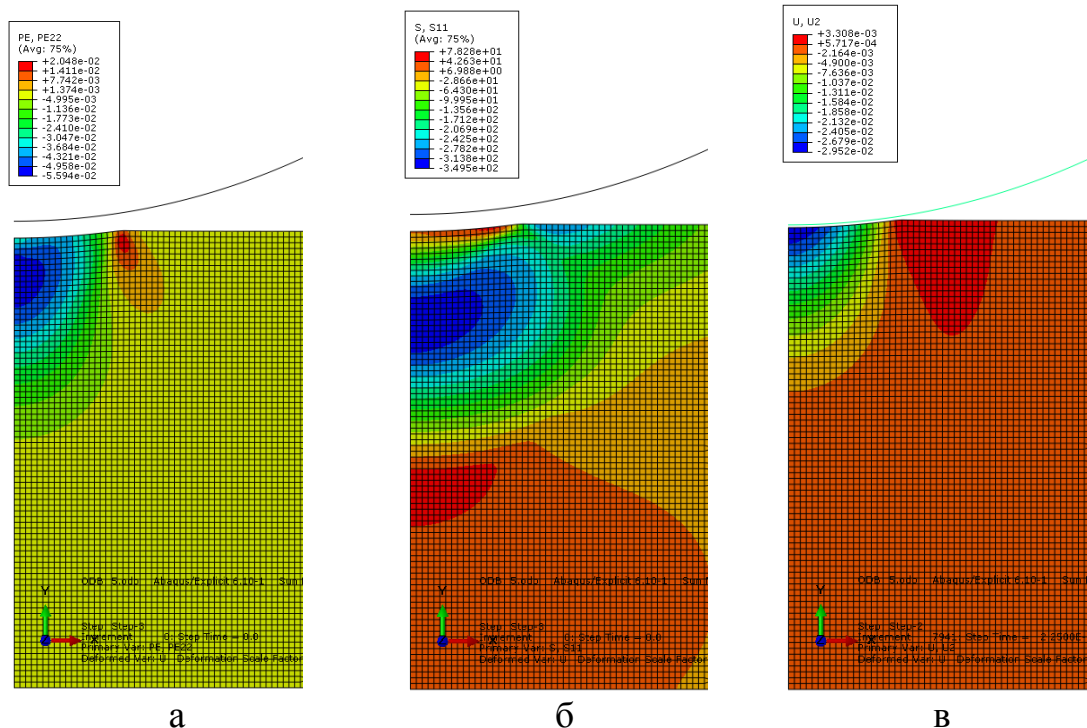


Рисунок 3.2 – НДС пластини:

а – деформації ϵ_{zz} ; б – напруга σ_{xx} , МПа; в – переміщення по осі z

Для аналізу графіки представлені у вигляді графіків (рис. 3.3, 3.4, 3.5). На графіках показані криві осьової складової деформації пластини по глибині пластини $\epsilon_{zz} = f(z)$, де ϵ_{zz} - осьові деформації; z - координата уздовж осі.

На графіках також показана радіальна складова напружень, що виникають при глибинній обробці пластин $\sigma_{xx} = f(z)$, де σ_{xx} - радіальні напруження.

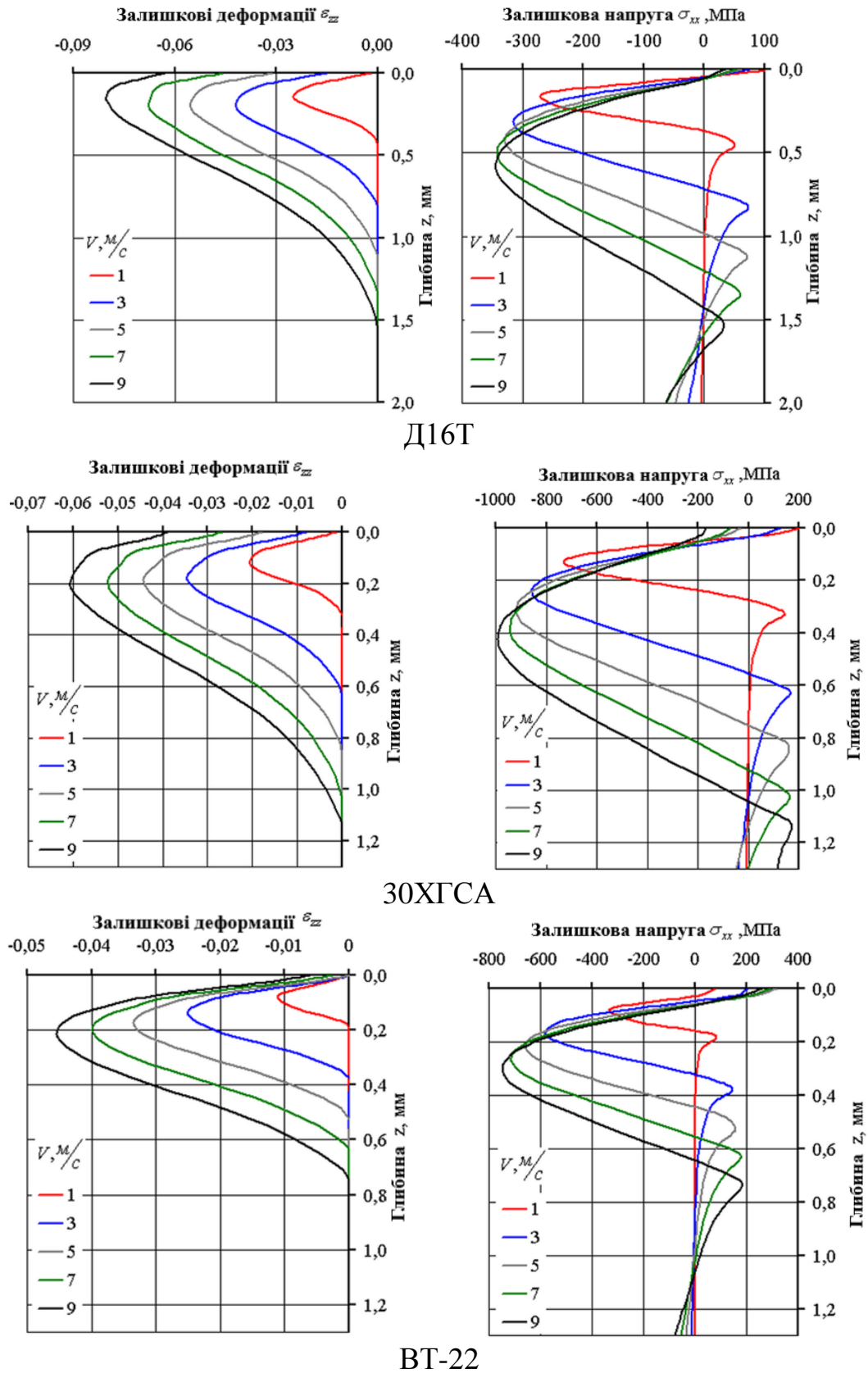
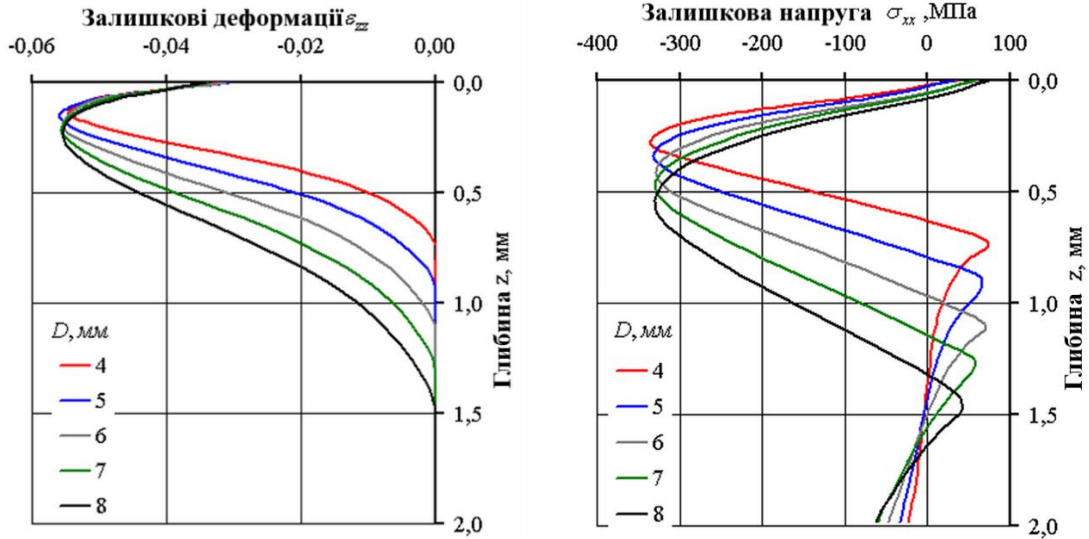
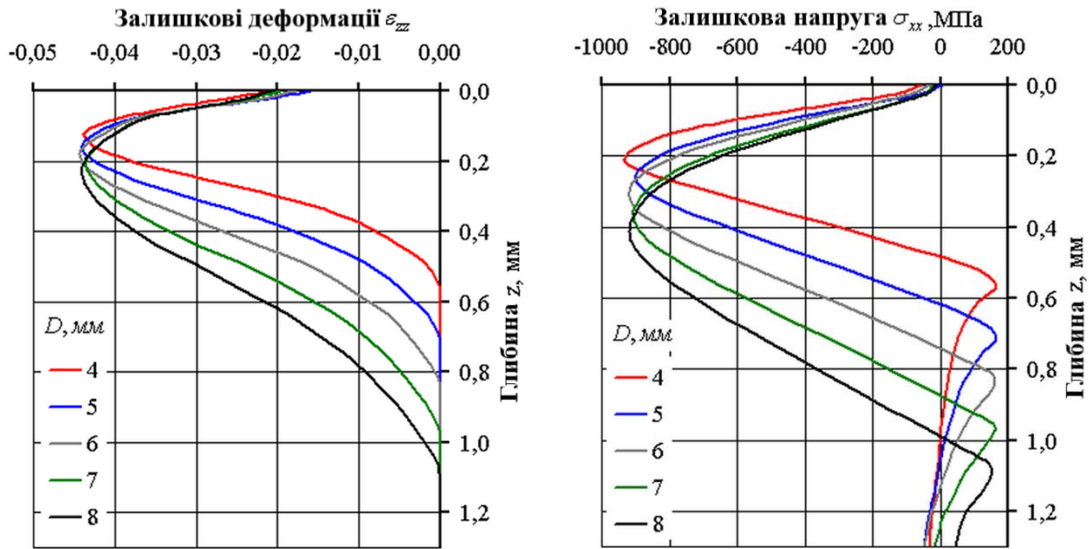


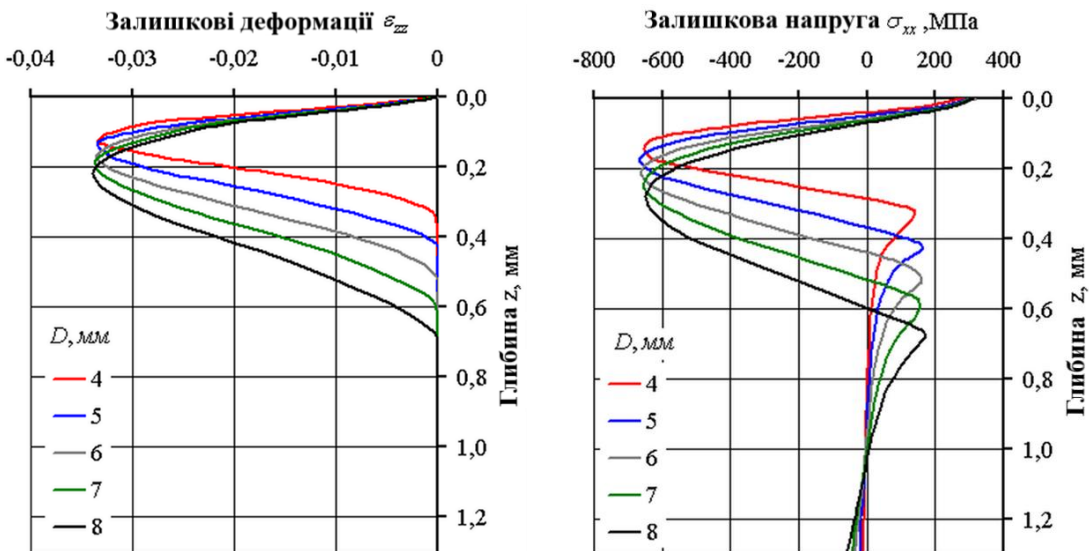
Рисунок 3.3 – Схеми НДС пластини з модельованих матеріалів з діаметром кулі 6 мм в залежності від швидкості удару



Д16Т



30ХГСА



ВТ-22

Рисунок 3.4 – Схеми НДС пластини з модельованих матеріалів при швидкості удару 5 м/с в залежності від діаметра кулі

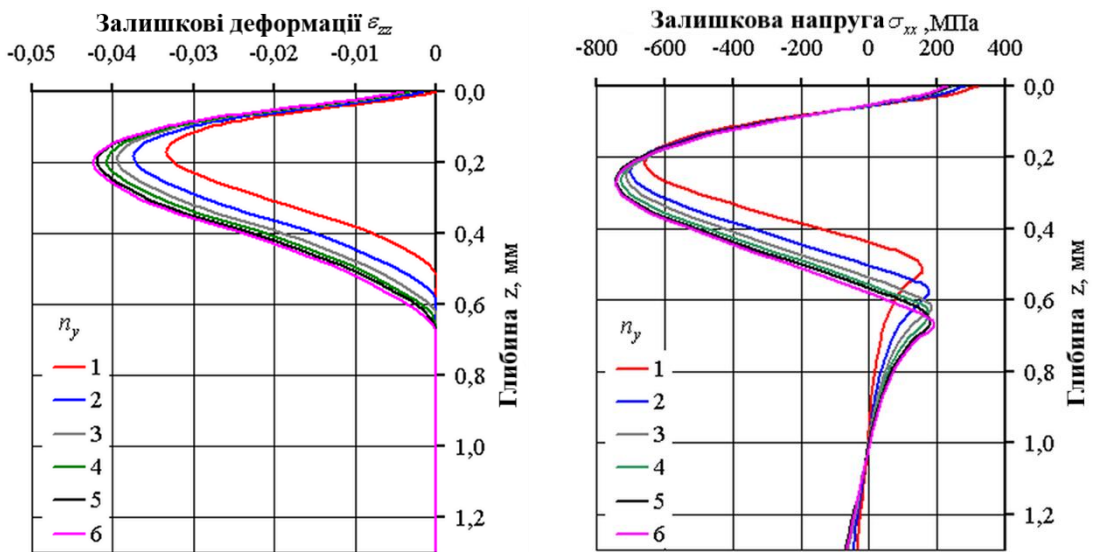
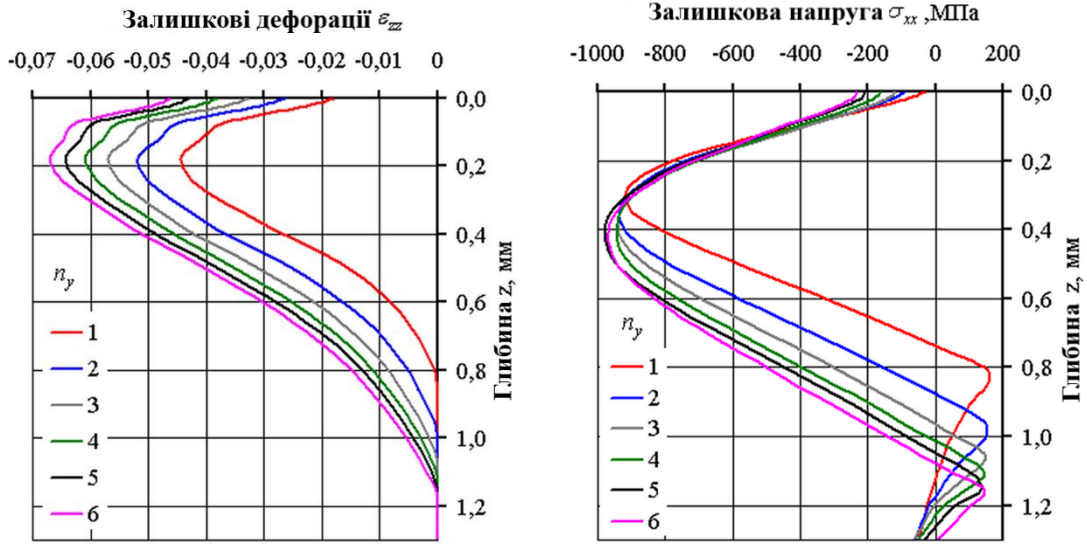
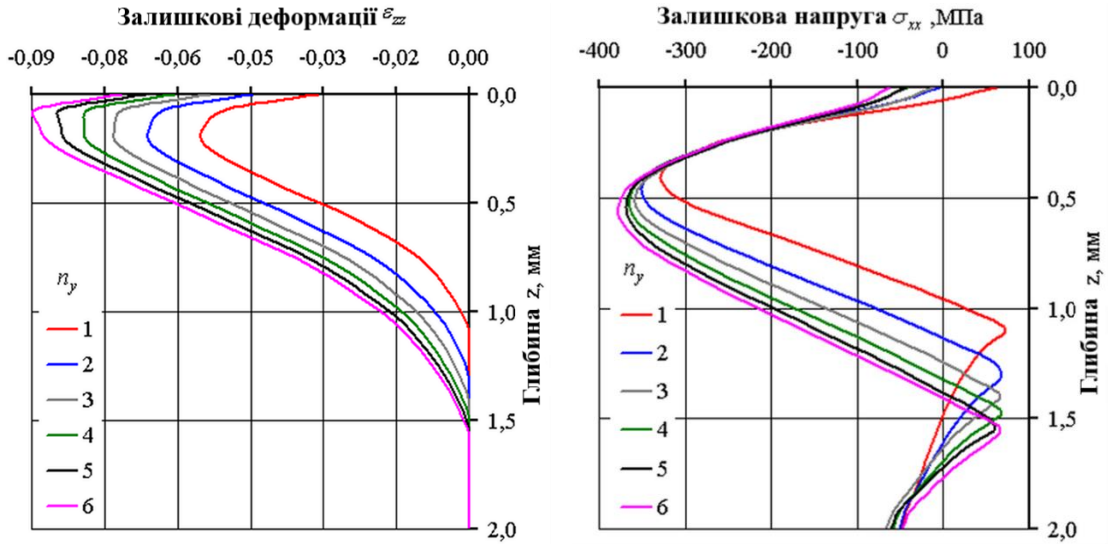


Рисунок 3.5 – Діаграми НДС пластини з модельованих матеріалів при швидкості удару 5 м/с і діаметрі кулі 6 мм в залежності від кратності удару

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено математичну модель процесу поверхневого зміцнення ударами кульок. Основні моменти цього розділу включають визначення типів моделей та методів їх використання, детальний опис моделі процесу зміцнення та аналіз отриманих результатів моделювання.

Розглянуто різні види моделей, включаючи аналітичні та чисельні методи. Аналітичні моделі ґрунтуються на математичних методах розв'язання крайових задач, які є складними та трудомісткими, тоді як чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ), дозволяють моделювати складні геометрії та навантаження з високою точністю та ефективністю.

У розділі наведено детальний опис моделі поверхневого зміцнення ударами кульок, яка включає в себе геометричну модель та методи побудови сітки скінченних елементів. Використані типи елементів і граничні умови дозволяють точно відтворити процес зміцнення. Модель враховує відсутність початкових напружень і деформацій, а також певні спрощення, такі як ідеалізація кулі як абсолютно жорсткого тіла та нехтування термічними процесами, що можуть виникати під час удару.

Результати моделювання показали, що поверхнєве зміцнення ударами кульок забезпечує локальну пластичну деформацію поверхні деталі. Описано вплив різних параметрів, таких як діаметр кульок, швидкість удару та щільність потоку кульок, на результуючий напружено-деформований стан поверхні. Наведені формули для розрахунку ступеня деформації, товщини пластично деформованого шару та внутрішнього питомого згинаючого моменту підтверджують ефективність методу для підвищення міцності та довговічності деталей.

Крім того, результати досліджень показали, що оптимізація параметрів процесу може значно вплинути на ефективність поверхневого зміцнення. Зокрема, правильно підібраний діаметр кульок і їх швидкість удару можуть забезпечити рівномірний розподіл напружень по всій оброблюваній поверхні, що сприяє досягненню бажаних механічних властивостей деталі.

4 ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЩЕННЯ УДАРАМИ КУЛЬОК

4.1 Визначення індексу деформації поверхні при одиничному ударі кулькою

З параметрів деформованого стану найбільш цікавими для процесів зміцнення ППД є ступінь деформації поверхні, товщина пластично деформованого шару в найбільш характерному - осьовій зоні вдавлювання кулі. Пропонується оцінювати ступінь деформації шляхом порівняння площі кола до вдавнення з F_K площею поверхні сферичного сегмента лунки F_L , що відповідає цьому колу. За даними [6] можна визначити ступінь деформації

$$\psi_F = \frac{(F_L - F_K)}{F_L} \quad (4.1)$$

Розрізняють ступінь деформації в невідновленій лунці ψ_H , коли куля знаходиться у лунці під навантаженням, і у відновленій лунці ψ_e , після зняття навантаження. Позначивши діаметр невідновленого відбитка d_H , для ψ_H геометричних співвідношень отримаємо

$$\psi_H = 0,5 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_H}{D} \right)^2} \right], \quad (4.2)$$

де D - діаметр кульки, що вдавлюється.

Після зняття навантаження відбувається еластичне відновлення гільзи, яке супроводжується зміною її діаметра і кривизни. Вказавши діаметр залишкового відбитка d і глибину відновленої лунки h для визначення ступеня деформації у відновленої лунки будемо мати

$$\psi_e = 1 - \left(\frac{d_H}{d} \right)^2 - \left(\frac{d_H}{d} \right)^2 \frac{h}{D_1}, \quad (4.3)$$

де D_1 знаходиться діаметр кривизни лунки.

Виразивши в рівнянні діаметр кривизни лунки D_1 через параметри d і h , знайдемо

$$\psi_e = 1 - \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{h}{d} \right)^2} \frac{d_H}{d}. \quad (4.4)$$

У більшості робіт [3, 12, 14] критерій d/D приймається як показник деформації поверхні. При її змінах від 0,05 до 0,6 для всіх матеріалів d_H/d вона близька до одиниці, і h/d значно менше одиниці. Тоді формулу (4.4) можна приблизно записати у вигляді

$$\psi_e = 4 \left(\frac{h}{d} \right)^2. \quad (4.5)$$

Різниця між формулами (4.3) і (4.5) полягає в тому, що для відновленої лунки середня ступінь деформації поверхні визначається не тільки геометричними факторами, але і пружнопластичними властивостями, що викликають різне відновлення глибини лунки після вдавлювання кулі на однакову глибину в матеріали з різними властивостями [5, 12].

Параметр h/d як показник ступеня залишкової деформації у лунці і критерій геометричної подібності залишкових відбитків використовується при порівнянні вогнища деформації матеріалів з різними пружнопластичними властивостями або з різними умовами деформації (рис. 4.1).

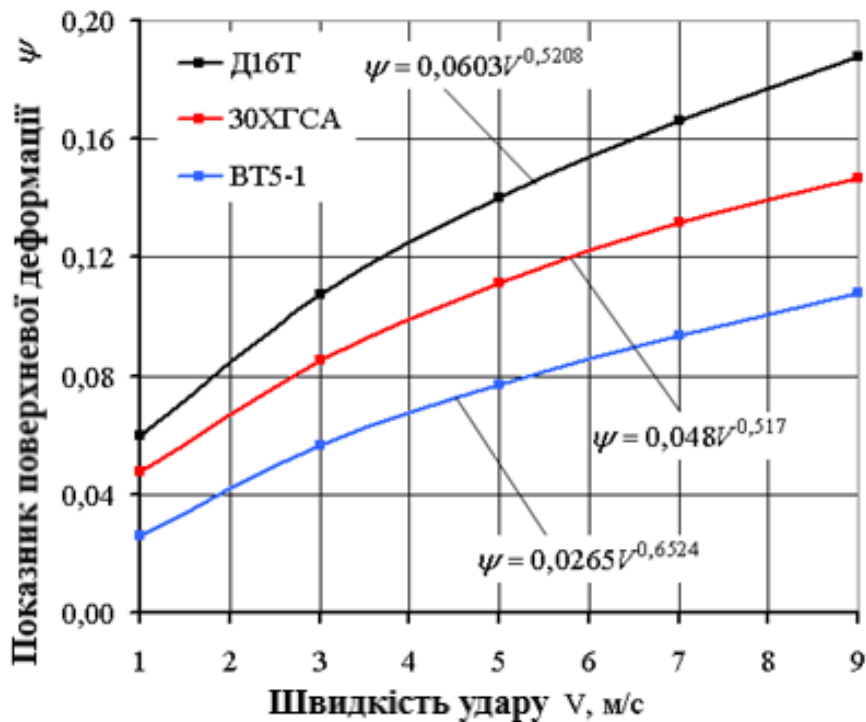


Рисунок 4.1 – Залежність індексу деформації поверхні ψ при одиничному ударі від швидкості удару кульки для модельованих матеріалів

Після апроксимації отриманих даних методом найменших квадратів можна отримати залежності (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Функції, отримані методом найменших квадратів

Матеріал	Функція	Помилка
Д16Т	$\psi = 0,0603V^{0,5208}$	<1%
30ХГСА	$\psi = 0,048V^{0,517}$	<1%
ВТ22	$\psi = 0,0265V^{0,6524}$	<1%

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновки:

1. При однакових швидкостях удару показник деформації поверхні для Д16Т помітно вище, ніж для 30ХГСА і ВТ-22.

2. Зі збільшенням швидкості удару показник деформації поверхні для Д16Т зростає більше, ніж для 30ХГСА і ВТ-22.

4.2 Особливості багатударної зміцнюючої обробки

Важливим параметром динамічної зміцнюючої обробки активним середовищем у вигляді кульок є однорідність покриття поверхні з відбитками, яка оцінюється співвідношенням

$$Y = \frac{F_{omn}}{F_{заг}} 100\%, \quad (4.6)$$

де F_{omn} – загальна площа відбитків; $F_{заг}$ – площа оброблюваної поверхні.

Завдання визначення заданої однорідності покриття Y зводиться до визначення часу впливу потоку на будь-яку ділянку оброблюваної поверхні з відомою інтенсивністю і питомою щільністю потоку q .

При багатударній контактній деформації відбувається збільшення діаметра відбитка [5, 16]. Величиною K_y є співвідношення:

$$K_y = \frac{\Psi_{n_y}}{\Psi} \quad (4.7)$$

де Ψ_{n_y} – показник деформації поверхні при повторному впливі.

За результатами моделювання будується графік (рисунок 4.2).

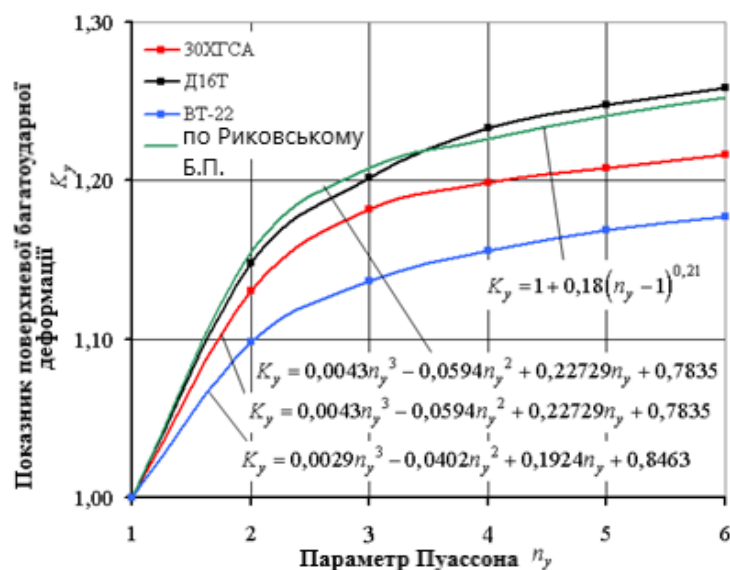


Рисунок 4.2 – Зміна показника поверхневої багатударної деформації K_y від кратності удару для модельованих матеріалів

Після апроксимації отриманих даних методом найменших квадратів можна отримати залежності (табл. 4.2)

Таблиця 4.2 – Функції, отримані методом найменших квадратів

Матеріал	Функція	Помилка
Д16Т	$K_y = 0,0043n_y^3 - 0,0606n_y^2 + 0,2894n_y + 0,7692$	<1%
30ХГСА	$K_y = 0,0043n_y^3 - 0,0594n_y^2 + 0,22729n_y + 0,7835$	<1%
ВТ22	$K_y = 0,0029n_y^3 - 0,0402n_y^2 + 0,1924n_y + 0,8463$	<1%

Аналіз результатів показує, що:

1. Результати моделювання апроксимуються поліноміальними залежностями.
2. При однакових швидкостях удару показник поверхневої багатонадної деформації для Д16Т вище, ніж для 30ХГСА і ВТ-22.
3. Зі збільшенням параметра Пуассона показник поверхневої багатонадної деформації для Д16Т зростає більше, ніж для 30ХГСА і ВТ-22.

4.3 Визначення глибини пластично деформованого шару

Глибину пластично деформованого шару можна визначити по товщині затверділого шару.

За результатами моделювання будується графік (рисунок 4.3).

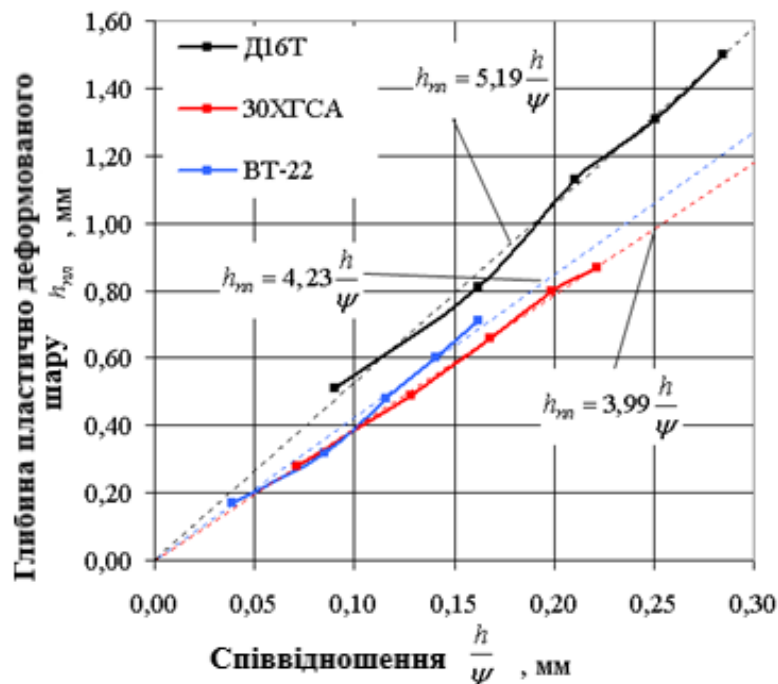


Рисунок 4.3 – Залежність глибини пластично деформованого шару від співвідношення h / ψ для модельованих матеріалів

Після апроксимації отриманих даних методом найменших квадратів можна отримати залежності (табл. 4.3)

Таблиця 4.3 – Функції, отримані методом найменших квадратів

Матеріал	Функція	Помилка
Д16Т	$h_{пл} = 5,19 \frac{h}{\psi}$	<2%
30ХГСА	$h_{пл} = 4,23 \frac{h}{\psi}$	<2%
ВТ22	$h_{пл} = 3,99 \frac{h}{\psi}$	<1%

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити наступні висновки:

1. Результати моделювання апроксимуються лінійними залежностями (див. табл. 4.3).
2. Глибина пластично деформованого шару для Д16Т помітно більше, ніж для 30ХГСА і ВТ-22 при тому ж співвідношенні h / ψ .
3. Глибина пластично деформованого шару для ВТ-22 більше, ніж для 30ХГСА при тому ж співвідношенні h / ψ .

4.4 Визначення напружень пластично деформованого шару

Напруги в поверхневому шарі відіграють значну роль у динамічному зміцненні ударами кульок.

За результатами моделювання буде створено графік (рисунок 4.4).

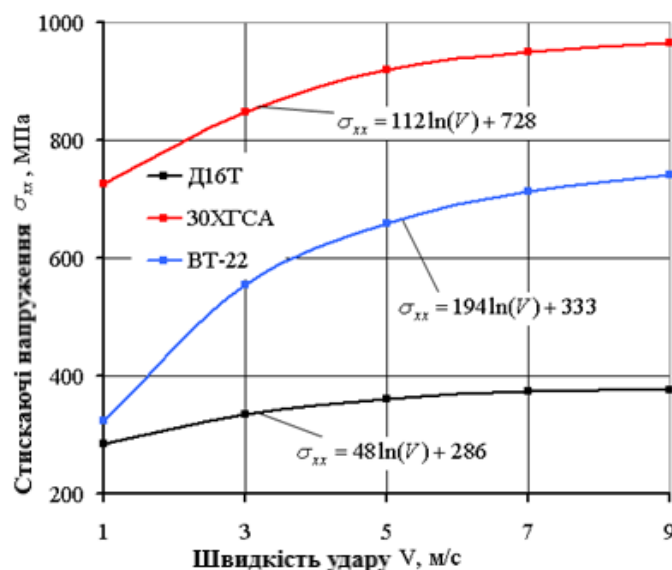


Рисунок 4.4 – Залежність напружень стиснення в поверхневому шарі від швидкості удару кульки

Після апроксимації отриманих даних методом найменших квадратів [16] можна отримати залежності (табл. 4.4)

Таблиця 4.4 – Функції, отримані методом найменших квадратів

Матеріал	Функція	Помилка
Д16Т	$\sigma_{xx} = 48 \ln(V) + 286$	<1%
30ХГСА	$\sigma_{xx} = 112 \ln(V) + 728$	<1%
ВТ22	$\sigma_{xx} = 194 \ln(V) + 333$	<1%

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити наступні висновки:

1. Результати моделювання апроксимуються логарифмічними залежностями (див. табл. 4.4).
2. Напруження в поверхневому шарі зі збільшенням швидкості найвищі для 30ХГСА і найнижчі для Д16Т.
3. Залежність вставних напружень від швидкості удару зростає незначно для Д16Т і значно для 30ХГСА і ВТ22.

Кратність прикладання навантаження удару кульки мало впливає на залишкові напруження стиснення в поверхневому шарі. Це наочно продемонстровано на рисунку 4.5.

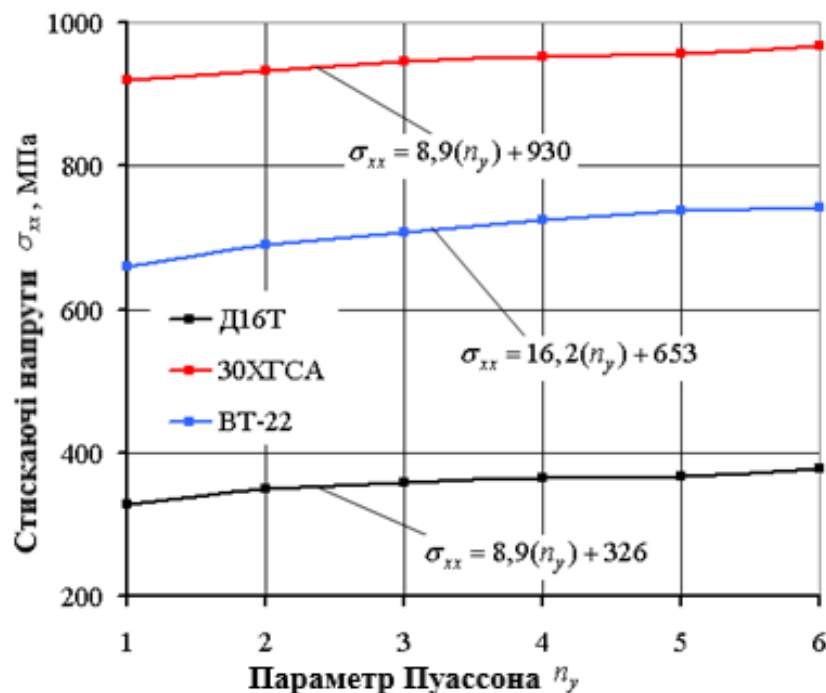


Рисунок 4.5 – Залежність напружень стиснення в поверхневому шарі від кратності параметрів удару

Після апроксимації отриманих даних методом найменших квадратів можна отримати залежності (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Функції, отримані методом найменших квадратів

Матеріал	Функція	Помилка
Д16Т	$\sigma_{xx} = 8,9(n_y) + 326$	<3%
30ХГСА	$\sigma_{xx} = 8,9(n_y) + 930$	<2%
BT22	$\sigma_{xx} = 16,2(n_y) + 653$	<3%

Аналіз результатів показує, що:

1. Результати моделювання апроксимуються лінійними залежностями.
2. Напруги, що виникають при механічній обробці, зі збільшенням кратності ударів, є найвищими для 30ХГСА і найнижчими для сплаву Д16Т.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі досліджено інженерну методику моделювання поверхневого зміцнення ударами кульок. Розглянуто особливості багатоударної зміцнюючої обробки, визначено індекс деформації поверхні при одиничному ударі кулькою, глибину пластично деформованого шару та напруження пластично деформованого шару.

На основі результатів моделювання побудовано графіки та отримано емпіричні залежності, що описують вплив різних параметрів процесу на характеристики поверхневого шару. Встановлено, що показник деформації поверхні вищий для алюмінієвого сплаву Д16Т порівняно зі сталлю 30ХГСА та титановим сплавом BT22 при однакових швидкостях удару. Крім того, зі збільшенням швидкості удару показник деформації поверхні зростає більше для Д16Т, ніж для інших матеріалів.

Аналіз результатів моделювання також показав, що найбільша глибина деформованого шару спостерігається для алюмінієвого сплаву Д16Т, а найменша – для сталі 30ХГСА.

Визначення напружень у пластично деформованому шарі показало, що зі збільшенням швидкості удару зростають напруги стиснення у поверхневому шарі. При цьому найбільші напруги спостерігаються для сталі 30ХГСА, а найменші – для Д16Т. Кратність прикладання навантаження удару кульки незначно впливає на залишкові напруження стиснення у поверхневому шарі.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про ефективність використання методу скінченних елементів для моделювання процесу поверхневого зміцнення ударами кульок. Розроблена методика може бути використана для визначення оптимальних параметрів обробки з метою досягнення необхідних характеристик поверхневого шару деталей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Зміцнення поверхонь, що не сполучаються, поверхневою пластичною деформацією є ефективним методом збільшення терміну служби деталей літальних апаратів [1, 10].
2. Математичне моделювання процесу динамічного зміцнення кульковим ударом дозволяє більш глибоко вивчити явища, що відбуваються в матеріалі при обробці, більш точно оцінити глибину пластично деформованого шару і залишкові напруги, що вносяться при обробці.
3. Розроблена математична модель дає можливість визначати параметри ППД для будь-яких матеріалів, минаючи численні експерименти.
4. Використання комп'ютерних технологій дозволяє значно скоротити час підготовки виробництва до випуску нової продукції і визначити оптимальні режими обробки.
5. Отримані емпіричні залежності можуть бути використані для призначення режимів обробки деталей літальних апаратів методом поверхнево-пластичної деформації.
6. Розроблено математичну модель рекомендовано адаптувати на основі чисельного моделювання для пневмодинамічного, віброударного та дробоструминного методів поверхнево-пластичної деформації [17, 18].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гайдамак О. Л., Матвійчук В. А. Підвищення довговічності деталей, що працюють при повторно-змінних навантаженнях. Вібрації в техніці та технологіях. 2020. № 3 (98). С. 15 – 24.
2. Фесенко, А. Г. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посіб. – Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.
3. Дудніков А. А., Дудник В. В., Біловод О. І., Лапенко Т. Г. Зміцнення матеріалу деталей пластичним деформуванням. Наукові нотатки. 2019. Вип. 66. С. 94 – 97.
4. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: монографія / О. В. Нахайчук та ін. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 158 с.
5. Інженерія поверхні: Підручник / К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж – К.: Наукова думка, 2007. – 559 с.
6. ДСТУ ISO 12085-2001 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Параметри структурних елементів (ISO 12085:1996, IDT).
7. Технології виготовлення деталей складної форми: навч. посіб. / Ю. В. Петраков, С. В. Сохань, В. К. Фролов, В. М. Кореньков.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.
8. Технологія виготовлення деталей літальних апаратів з видаленням припуску : підручник / В. С. Кривцов, В. Т. Сікульський, Ю. В. Д'яченко та ін. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2010. – 224 с.
9. Спеціальні технології, обладнання і оснащення авіаційного виробництва : навч. посіб. / В. В. Коллеров, Ю. В. Д'яченко, В. Т. Сікульський та ін. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2017. – 72 с.
10. Scientific Grounds of Structural and Production Concepts to Provide Aircraft Life Time : Monography / V. O. Boguslayev, S. A. Bychkov, O. G. Grebenikov, M. I. Moskalenko, A. M. Gumennyi, E. T. Vasilevskiy, A. P. Eretin, O. D. Donets, V. F. Sementsov, V. O. Grebenikov, O. M. Stoliarchuk. – Kharkiv: Nat. Aerospace Univ. «KhAI», 2019. – 266 p.
11. Технологічне оснащення для виробництва деталей літальних апаратів [Електронний ресурс] : навч. посіб. до лаб. практикуму та практ. занять / Ю. В. Д'яченко, С. О. Заклінський. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2024. – 43 с.

12. Alcalá J., Barone A. C., Anglada M. The influence of plastic hardening on surface deformation modes around vickers and spherical indents. *Acta Materialia*. 2020. vol. 48. pp. 3451-3464.

13. Belhadjamor, M., et al., Numerical Study of Normal Contact Stiffness: Non-Gaussian Roughness and Elastic–Plastic Behavior. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2020. 234(9): p. 1368-1380.

14. H. D. Gopalakrishna, H. N. Narasimha Murthy, and M. Krishna, “Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy – An experimental study,” *Eng. Fail. Anal.*, 17, No. 2, 361–368 (2010).

15. K.M. Armattoo, C. Bouby, M. Haboussi, and T. Ben, “Modeling of latent heat effects on phase transformation in shape memory alloy thin structures,” *Int. J. Solids Struct.*, 88–89, 293–295 (2016)

16. K. Divringi and C. Özcan, *Advanced Shape Memory Alloy Material Models for ANSYS [Electronic Resource]*, Ozen Eng., Sunnyvale, CA (2009), 94085, No. 408.

17. Пат. 116268 Україна, МПК В24В 39/02 (2006.01), В23Р 9/04 (2006.01) Пристрій для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішніх циліндричних поверхонь довгомірних деталей / Афтаназів І. С., Шевчук Л. І.– № а201603003 ; Заявл. 23.02.2016 ; Опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4.

18. Пат. України на винахід № 51720. Пристрій для зміцнення поверхонь довгомірних циліндричних деталей / Афтаназів І. С., Кусий Я. М. – опубл. 2002; Бюл. № 12.

ДОДАТОК А

ЗАЛИШКОВІ ДЕФОРМАЦІЇ В ОСЬОВІЙ ЗОНІ

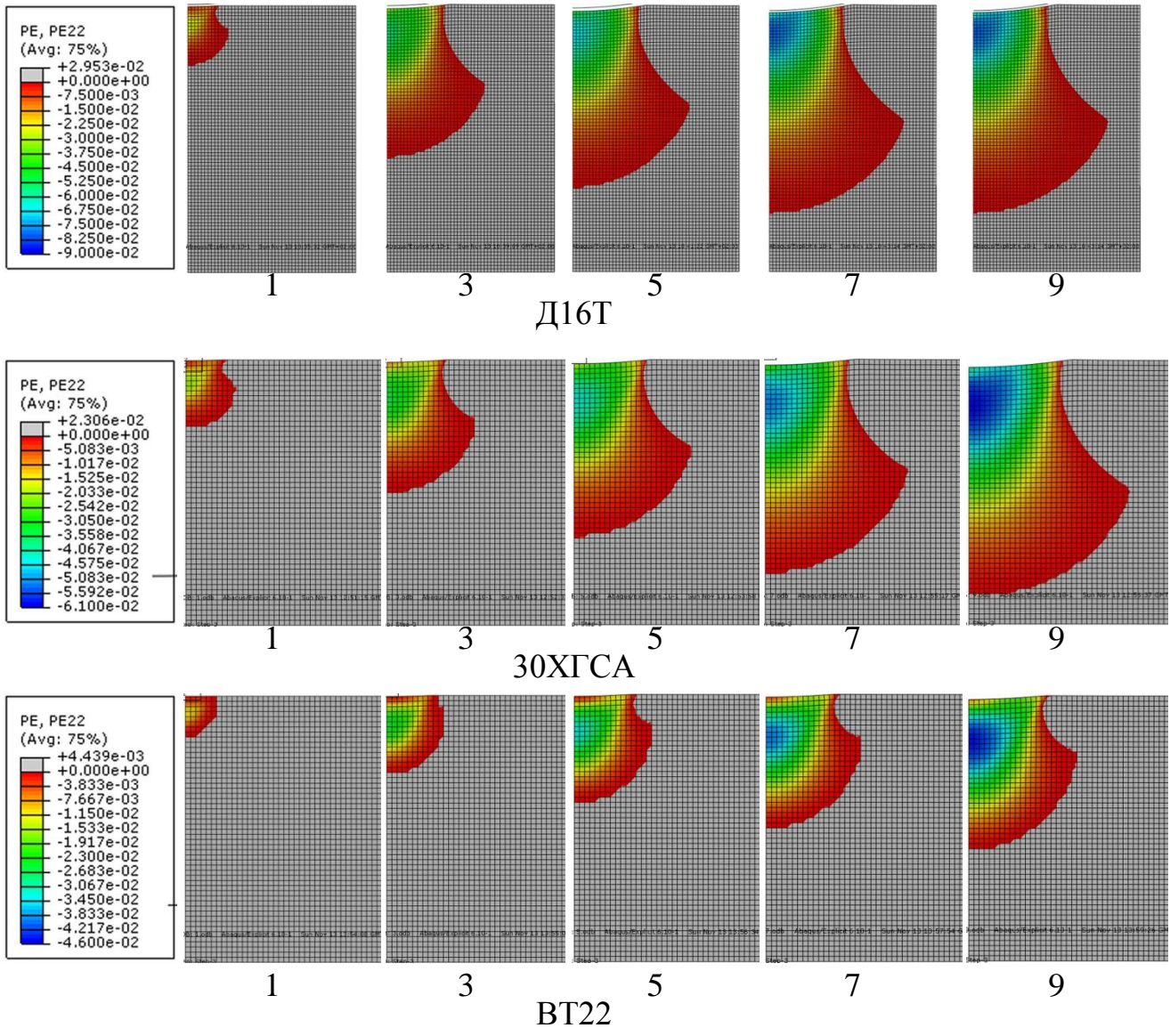


Рисунок А.1 – Вплив швидкості удару на залишкові деформації при діаметрі кульки 6 мм

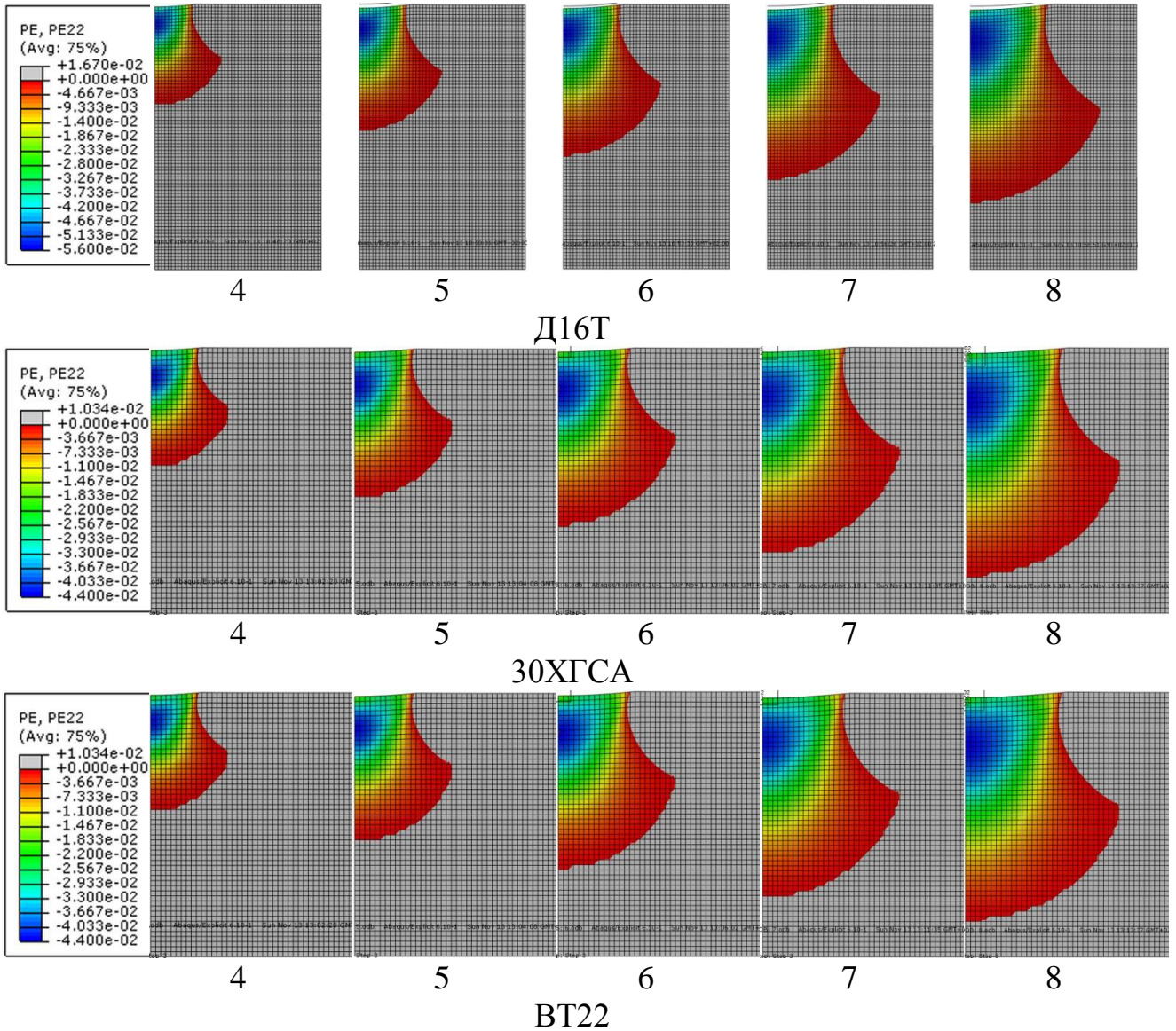


Рисунок А.2 – Вплив діаметра кульки на залишкові деформації при швидкості удару 5 м/с

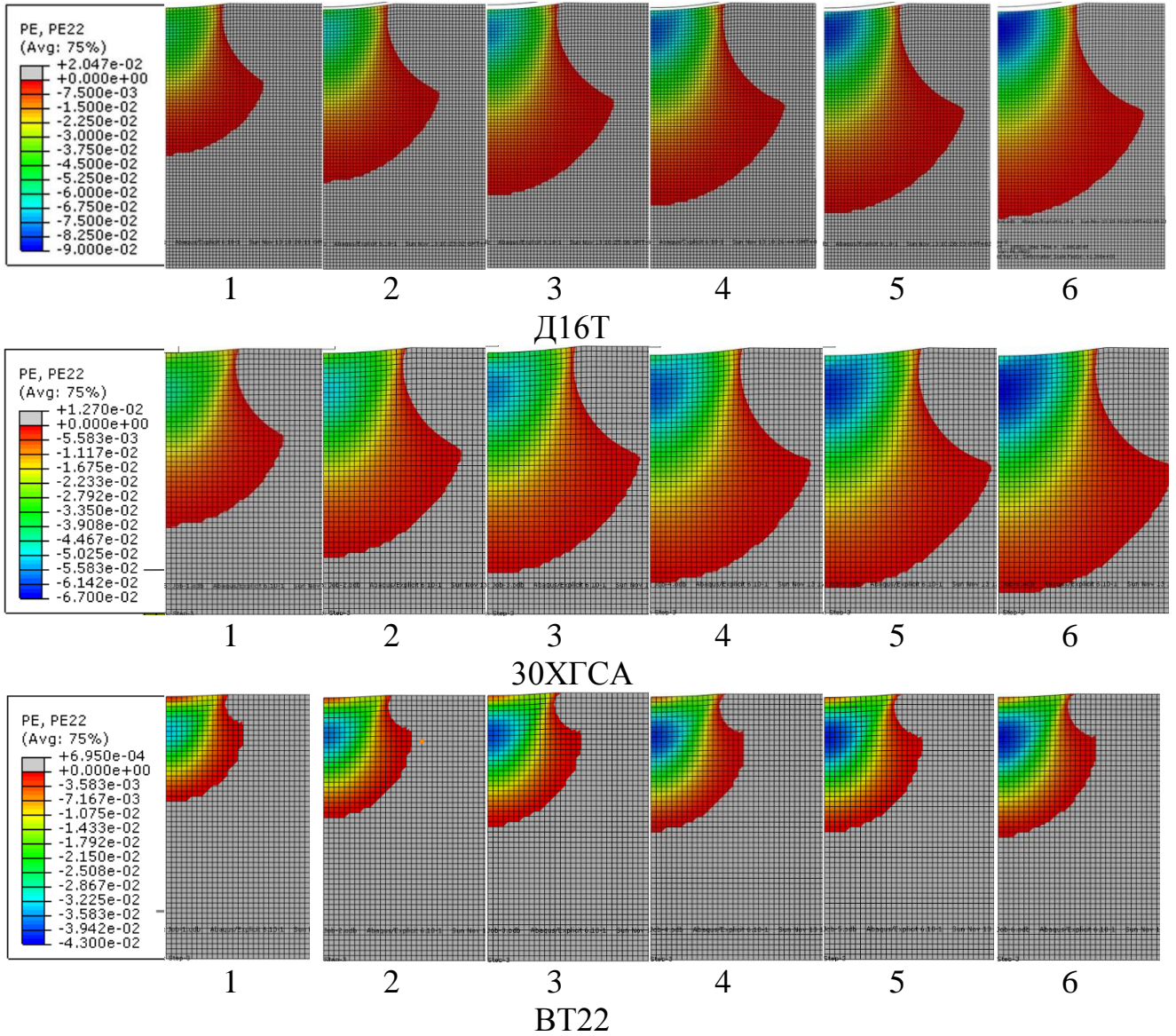


Рисунок А.3 – Вплив кратності удару на залишкові деформації при швидкості удару 5 м/с та діаметрі кульки 6 мм

ДОДАТОК Б ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В ОСЬОВІЙ ЗОНІ

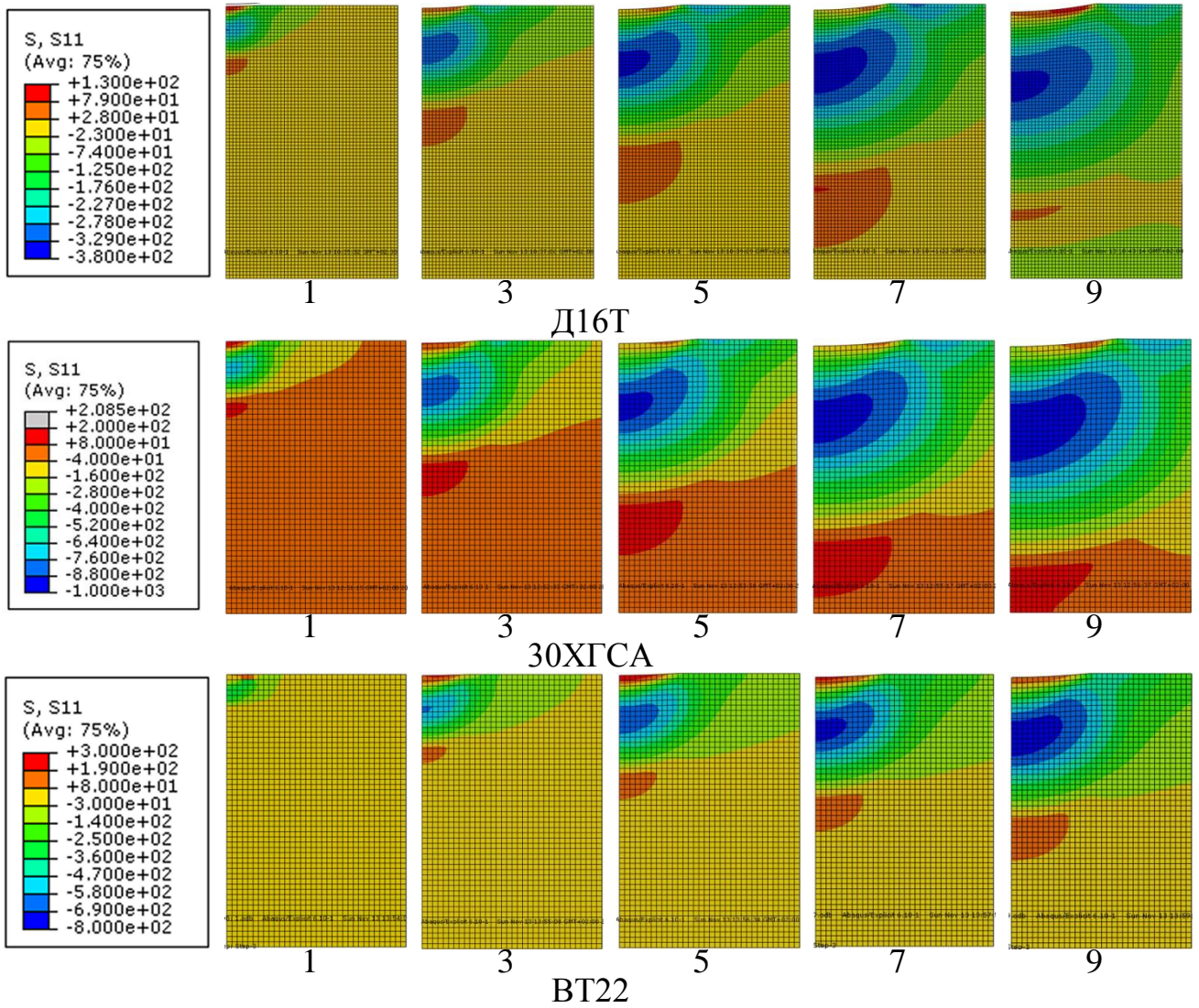


Рисунок Б.1 – Вплив швидкості удару на залишкову напругу при діаметрі кульки 6 мм

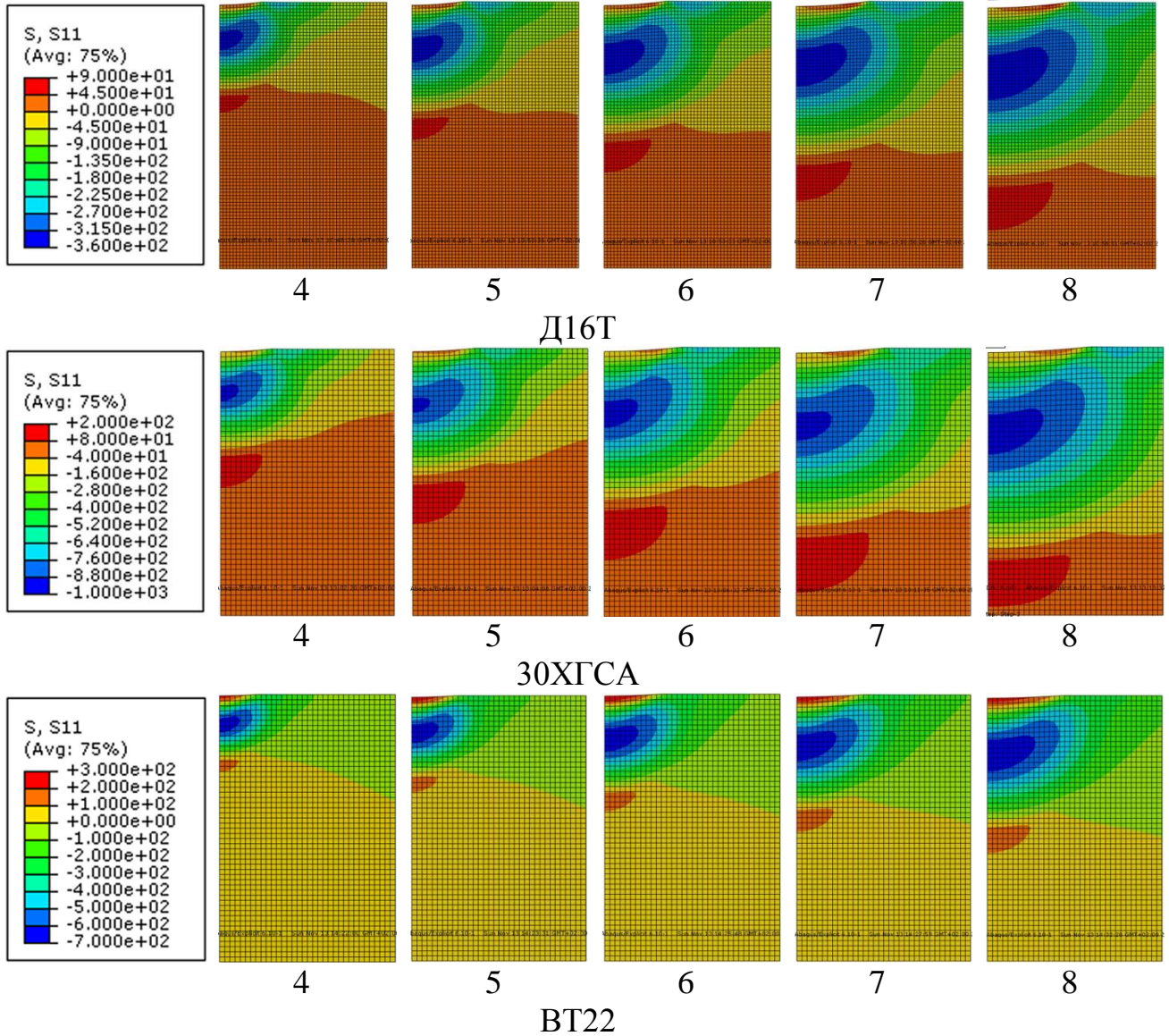


Рисунок Б.2 – Вплив діаметра кульки на залишкову напругу при швидкості удару 5 м/с

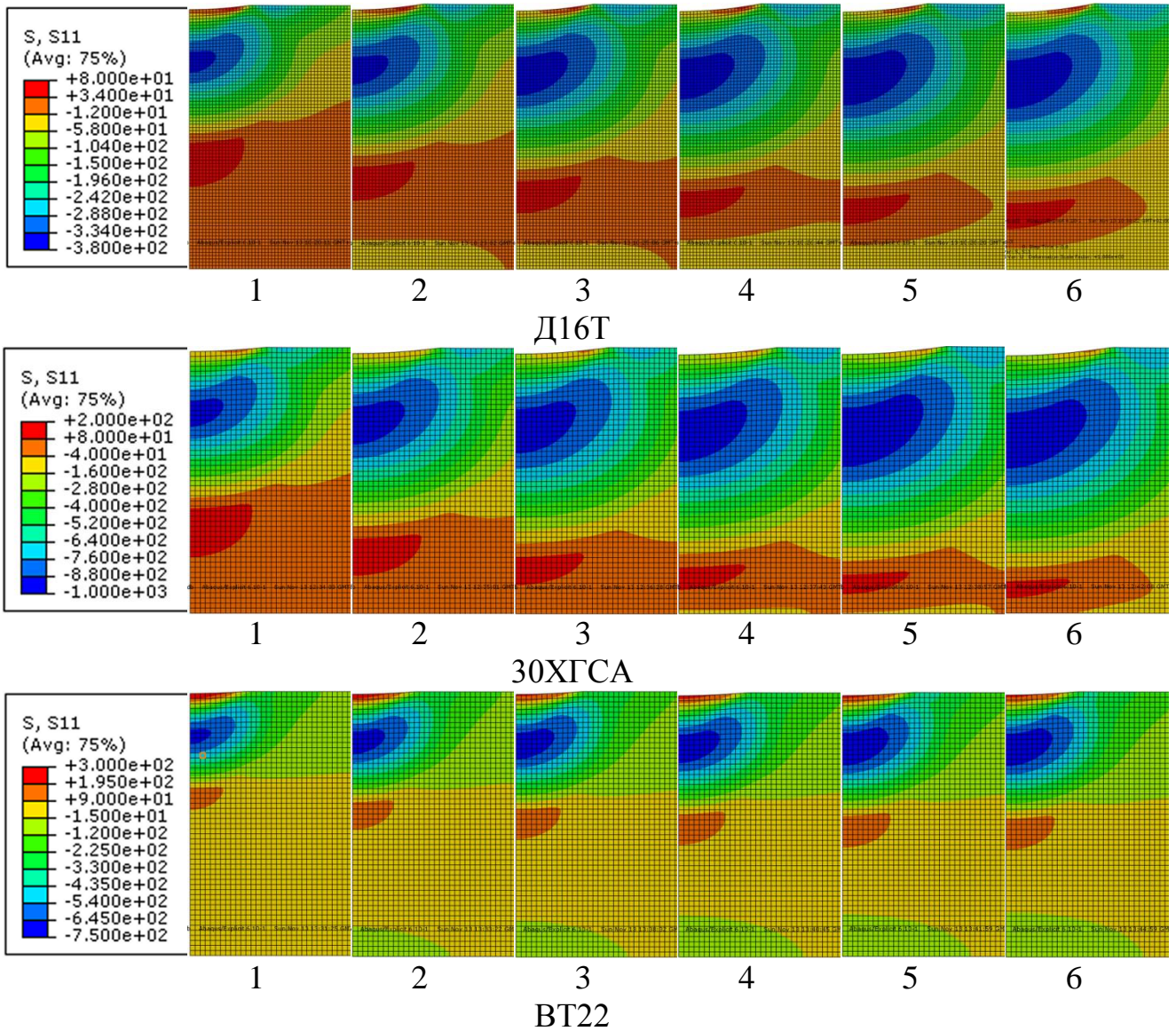


Рисунок Б.3 – Вплив кратності удару на залишкові напруження при швидкості удару 5 м/с та діаметрі кульки 6 мм