

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**Сумський державний університет****Факультет електроніки та інформаційних технологій**

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Петро ЛЕОНТЬЄВ

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

6 червня 2024р.**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА****на здобуття освітнього ступеня бакалавр**

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»,

(код та назва)

освітньо-професійної програми «Нанотехнології та біомедичні системи»

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему "Моделювання нерівноважного процесу ущільнення порошкових матеріалів"Здобувача групи ФЕ-01 Борисенка Івана Ігоровича

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

Іван БОРИСЕНКО

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник доцент, к.ф.-м.н., доцент, Ющенко О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Сумський державний університет

(назва вузу)

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

Спеціальність 153 – «Мікро- та наносистемна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою комп'ютеризованих систем управління

П.В. Леонт'єв

«04» червня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Борисенку Івану Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) "Моделювання нерівноважного процесу ущільнення порошкових матеріалів"

затверджена наказом по університету від «27» березня 2024 р. № 0302-VI

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) «б» червня 2024 р.

3. Вхідні дані до проекту (роботи) відносна зміна вільного об'єму між частинками порошкового матеріалу, швидкість зсуву, пружні напруження, адіабатичне наближення, метод Рунге-Кутта

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) побудувати модель на основі трьох параметрів системи, проаналізувати систему в рамках адіабатичного наближення, провести числовий розрахунок моделі

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначення обов'язкових креслень) Презентація в PowerPoint (10 слайдів)

6. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вивчення методів дослідження нерівноважного процесу ущільнення матеріалів	10.05.2024	виконано
2	Розгляд сучасних досягнень в дослідженнях нерівноважного процесу ущільнення	14.05.2024	виконано
3	Опрацювання літератури	18.05.2024	виконано
4	Чисельне моделювання режимів нерівноважного процесу ущільнення порошкових матеріалів	22.05.2024	виконано
5	Аналіз результатів дослідження	28.05.2024	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	31.05.2024	виконано

Студент-дипломник

(підпис)

Керівник проекту

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Записка: 43 сторінки, 14 рисунків, 28 використаних джерел.

Обґрунтування актуальності теми роботи – необхідність вдосконалення технологій ущільнення порошкових матеріалів для підвищення якості та ефективності виробництва високотехнологічних компонентів.

Об’єкт дослідження — порошковий матеріал під дією зовнішнього навантаження.

Мета роботи — дослідження умови переходу до твердотілого стану в рамках самоорганізованої системи.

Методи дослідження — аналітичні методи аналізу, адіабатичне наближення, числове моделювання.

Результати — побудована трипараметрична модель на основі взаємоузгодженої поведінки трьох степеней свободи: відносної зміни вільного об’єму між частинками порошкового матеріалу, швидкості зсуву та пружних напружень. Досліджені умови переходу порошкового матеріалу до твердотілого стану в процесі ущільнення.

Ключові слова — УЩІЛЬНЕННЯ, ВІДНОСНА ЗМІНА ВІЛЬНОГО ОБ’ЄМУ, ШВИДКІСТЬ ЗСУВУ, ПРУЖНІ НАПРУЖЕННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1	7
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	7
1.1 Формування порошків	7
1.1.1 Підготовка порошків	7
1.1.2 Закономірності ущільнення порошків у прес-формі	8
1.1.3 Методи формування	9
1.2 Спікання	14
1.2.1 Види спікання	14
1.2.2 Твердофазне спікання	15
1.2.3 Рідкофазне спікання	17
1.2.4 Новітні технології спікання	19
РОЗДІЛ 2	22
САМОУЗГОДЖЕНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДУ ПОРОШКОВОГО МАТЕРІАЛУ ДО ЩІЛЬНОГО ТВЕРДОТІЛЬНОГО СТАНУ	22
2.1 Основні рівняння	22
2.2 Використання відносних одиниць	27
2.3 Знаходження стаціонарних значень	28
ВИСНОВКИ	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40

ВСТУП

Сьогодні стрімко розвивається застосування нерівноважних процесів ущільнення в сучасних технологіях обробки матеріалів, сенсориці, та оптичних системах. Одним з таких напрямків є дослідження нерівноважних процесів ущільнення порошкових матеріалів в технологічних системах, що є складовою приладів високої точності.

В цій роботі досліджено поняття ущільнення та нерівноважного процесу. За допомогою чисельного методу дослідження та методу експериментального моделювання нерівноважного ущільнення розглянуто сучасні моделі з різними типами порошкових матеріалів та умовами ущільнення.

Обрана тема сприяє розумінню та моделюванню процесів, що виникають в технологічній системі порошковий матеріал – прес-форма, коли зовнішня сила діє на порошковий матеріал, що є важливою складовою при проектуванні приладів високої точності. В свою чергу результати дослідження надають практичні рекомендації відносно застосування порошкових матеріалів в пристроях обробки матеріалів.

РОЗДІЛ 1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Формування порошків

1.1.1 Підготовка порошків

Щоб отримати якісні заготовки або деталі з порошкових матеріалів, порошки проходять кілька етапів підготовки: відпал, класифікацію та змішування. Відпал порошку проводиться для видалення з нього оксидів, вуглецю та інших домішок, також для усунення наклепу, який може виникнути при подрібненні. Цей процес допомагає стабілізувати властивості порошку і покращити його пресованість. Відпалу зазвичай піддають порошки, отримані подрібненням. Нагрівання порошку проводиться в захисній атмосфері при температурі, близькій до 0,4-0,6 від температури плавлення металу порошку.

Класифікація порошків полягає в їх розділенні за розміром частинок на фракції. Ці фракції можуть використовуватися безпосередньо для формування деталей або для створення сумішей з певним співвідношенням частинок різного розміру. Порошки з розмірами від 50 мкм розділяють ситами, а дрібніші - за допомогою повітряної сепарації.

Змішування порошків значною мірою впливає на властивості виробів. Цю операцію виконують у спеціальних змішувачах, млинах та іншими способами. Часом до порошкової маси додають різні технологічні добавки, розчин каучуку, для покращення процесу пресування та можливості формування заготовок методом видавлювання (екструзії), або для забезпечення можливості механічної обробки за допомогою парафіну, восків

тощо, а також для виготовлення заготовок методом лиття за допомогою спирту, бензолу та інших речовин.

1.1.2 Закономірності ущільнення порошків у прес-формі

Сутність процесу пресування сумішей полягає у стисненні вільно насипаного порошку у прес-формі під тиском з метою отримання порошкового тіла з визначеними параметрами форми, розміру та щільності. Під час пресування об'єм порошкового тіла змінюється внаслідок переміщення та деформації окремих частинок, що заповнюють порожнини між ними. Графіки, що показують залежність щільності від тиску пресування, називаються діаграмами пресування. Вони мають важливе значення для оцінки можливості пресування різних порошків і розробки відповідних технологій виробництва. Пресувальність порошків залежить від різних факторів, таких як їхня твердість, пластичність, форма та розмір частинок, гранулометричний склад, стан цієї поверхні та ступінь окислення. Тому кожен випадок потребує індивідуального вивчення процесу пресування.

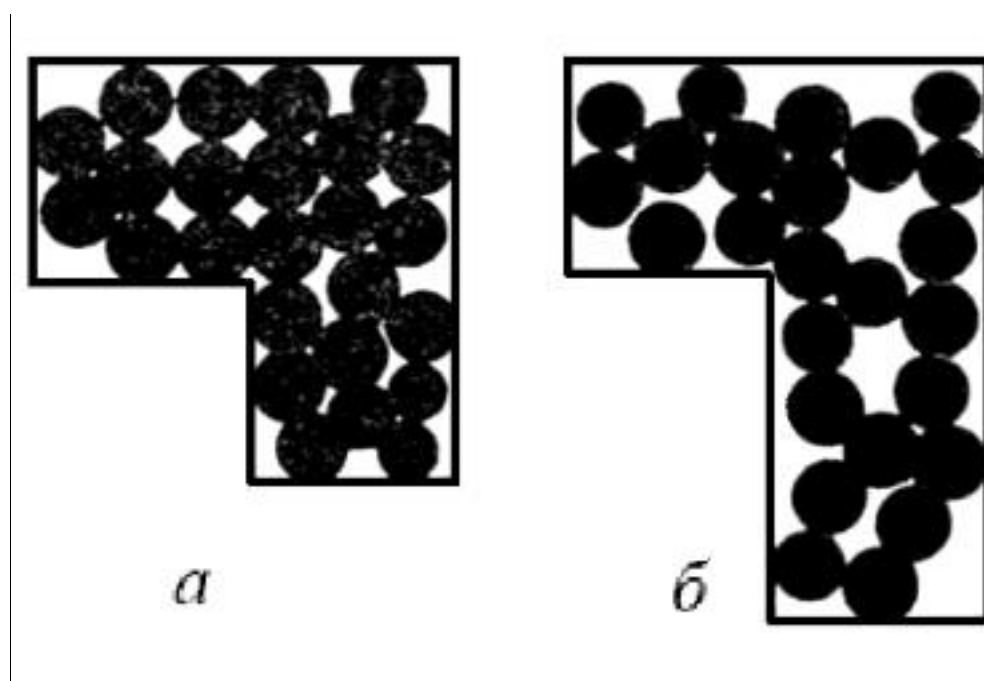


Рисунок 1.1 – Методика пресування порошків з металів

а – заповнення порожнеч; б – вільне насипання

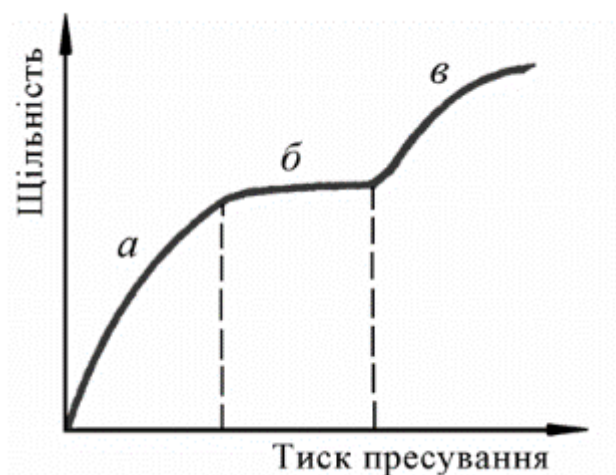


Рисунок 1.2 – Ідеалізована характеристична крива процесу ущільнення порошкового матеріалу

1.1.3 Методи формування

Під час виробництва матеріалів, напівфабрикатів та виробів з металевих порошків або їх сумішей, часто використовуються різні технологічні добавки, які допомагають оптимізувати процес формування порошкової маси. Наповнювачі, такі як розчин каучуку, віск, парафін, бензол, спирт та інші, додаються для поліпшення цього процесу. Завершальною стадією є спікання. Формування заготовок проводять різними методами, такими як статичне, ізостатичне та імпульсне пресування, прокатування, а також бездеформаційні методи, які включають у себе видавлювання, шлікерне лиття та інші. Наприклад, статичне пресування може здійснюватися в прес-формах за допомогою механічних або гідравлічних пресів, де порошок ущільнюється під дією тиску. Цей процес може бути холодним або гарячим.

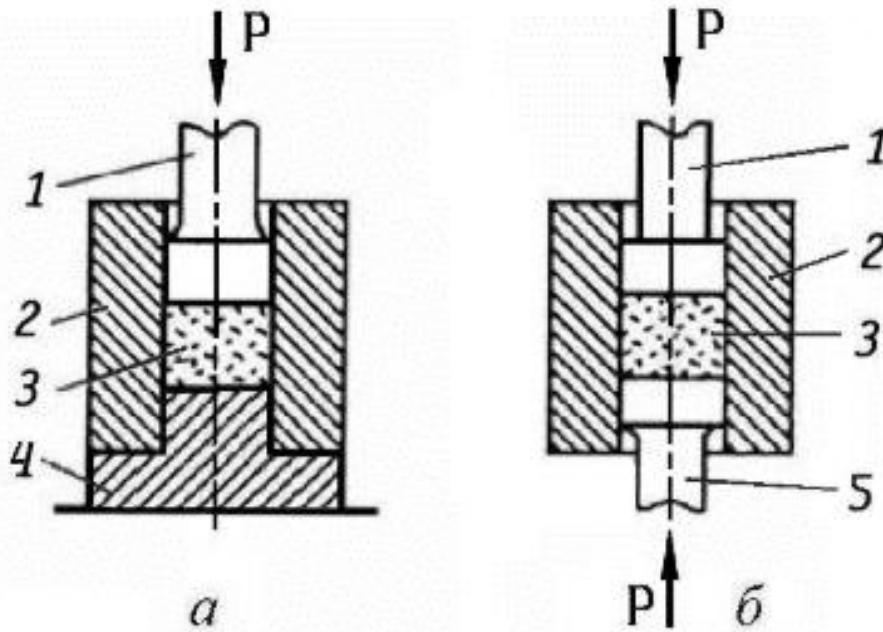


Рисунок 1.3 – Схема пресування в прес формі

а – одностороннє; б – двостороннє;

1 – пуансон верхній; 2 – матриця; 3 – порошок; 4 – пуансон нижній (нерухомий); 5 – пуансон нижній (рухомий)

Для вирішення вищезазначеного недоліку є двостороннє пресування, коли використовуються два рухомих пуансони. Це дозволяє зменшити тиск пресування на 30-40% і покращує якість виробу. В залежності від необхідної пористості та міцності матеріалу заготовки, тиск пресування може становити від 0,1 до 1,0 ГПа. Двостороннє пресування дозволяє отримувати деталі з висотою до діаметра більшу ніж два рази.

Крім холодного пресування, також застосовується гаряче пресування, коли операції пресування напівфабрикатів та їх спікання об'єднуються. Цей процес відбувається в графітових формах з індукційним та електроконтактним нагріванням. Гаряче пресування забезпечує пластичність матеріалу при високих температурах ($0,5-0,9 \cdot T_{пл}$) та дозволяє значно знизити тиск пресування. Однак, існує проблема з міцністю графітових пресформ, яка обмежує застосування цього методу.

Гаряче пресування відрізняється невисокою продуктивністю і вимагає великих витрат прес-форм, тому воно застосовується для виготовлення заготовок з жароміцних матеріалів, твердих сплавів та інших тугоплавких металів.

Ізостатичне пресування використовується для ущільнення порошку в умовах рідини або газу під однаковим тиском у всіх напрямках. Гідростатичне пресування, наприклад, використовує рідину під тиском для обтискування порошку, розміщеного в еластичній оболонці, що дозволяє отримувати вироби великих розмірів з однорідною щільністю по всьому об'єму.

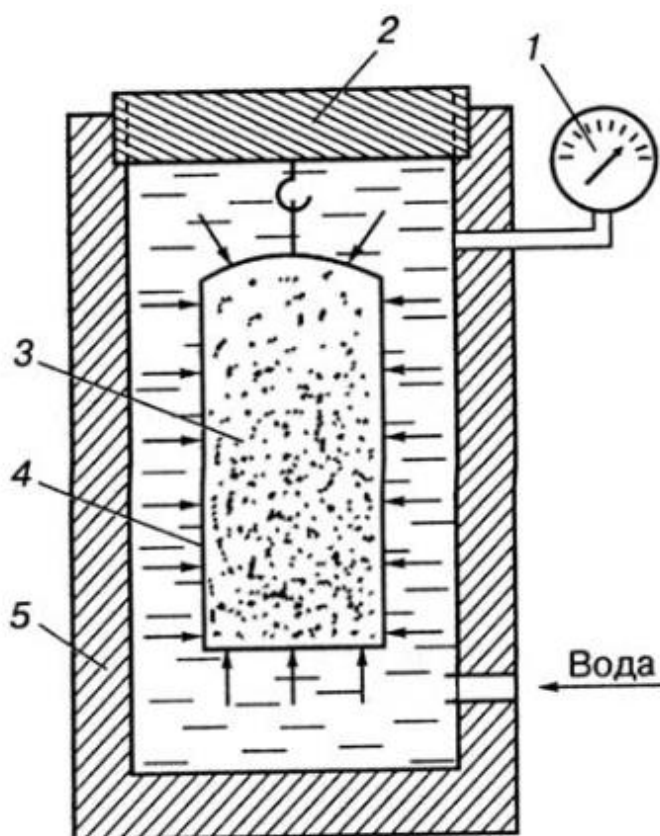


Рисунок 1.4 – Схема обладнання для гідростатичного пресування порошкових матеріалів

1 – манометр; 2 – кришка; 3 – порошкова шихта; 4 – еластична оболонка; 5 – камера

Ізостатичне пресування застосовують для виробництва великих виробів з металевих порошків, які не є пластичними. В цьому методі порошок поміщають у гумову або металеву оболонку і піддають обтискуванню рідиною або газом під високим тиском у спеціальних камерах. Цей процес забезпечує однорідну щільність деталей, але часто потребує додаткової обробки.

Прокатування порошків є економічно вигідним методом, який дозволяє отримувати стрічки, смуги та листи різної товщини з металевих порошків. Цей процес полягає у стисненні порошку між двома валками, які обертаються однаковою швидкістю. Прокатування може бути комбіновано з такими видами обробки, наприклад, спіканням.

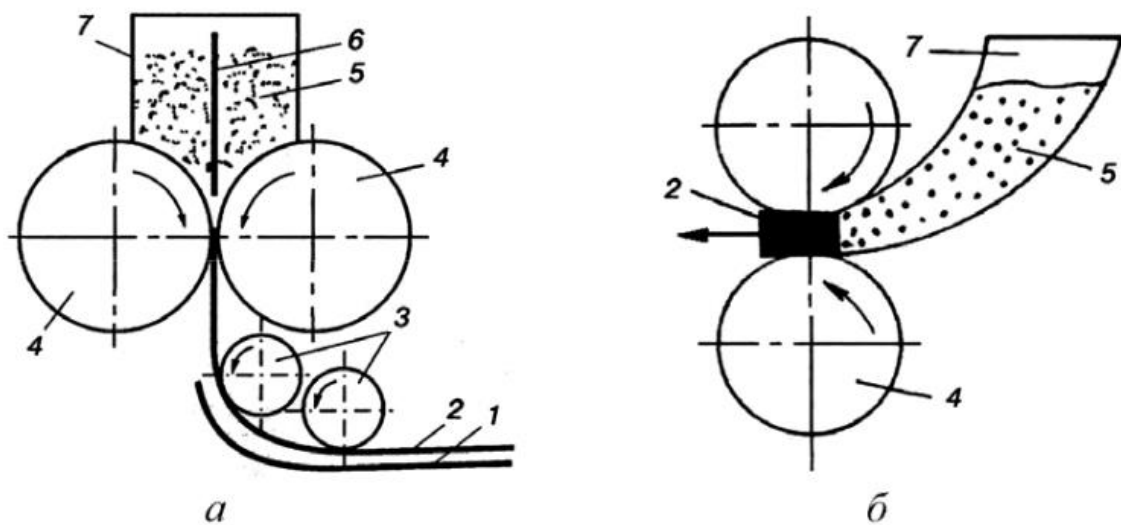


Рисунок 1.5 – Схема способу прокатування порошків

а – вертикальний; б – горизонтальний;

1 – напрямна ; 2 – спресована стрічка; 3 – ролик; 4 – валки; 5 – порошок; 6 – перегородка; 7 – бункер

У прокатуванні порошків важливим фактором, що впливає на щільність стрічки, є розмір зазору між валками, який становить 1% від діаметра. Збільшення цього зазору призводить до зменшення щільності стрічки. Крім того, щільність залежить від швидкості прокатування: із збільшенням швидкості щільність також зменшується. Для кожної товщини стрічки існує оптимальна швидкість прокатування, яка залежить від частоти обертання валків.

Мундштучне пресування, відоме як екструзія, використовується для формування виробів через пресування шихти під високим тиском через мундштук. Цей процес дозволяє отримувати однорідні вироби будь-якої довжини, які можуть мати простий або складний профіль. Для цього порошок змішують з пластифікатором, що надає шихті консистенцію пластиліну. Мундштучне пресування дозволяє виготовляти вироби, такі як штаби, труби, прутки та інші, з високою щільністю і рівномірним перерізом.

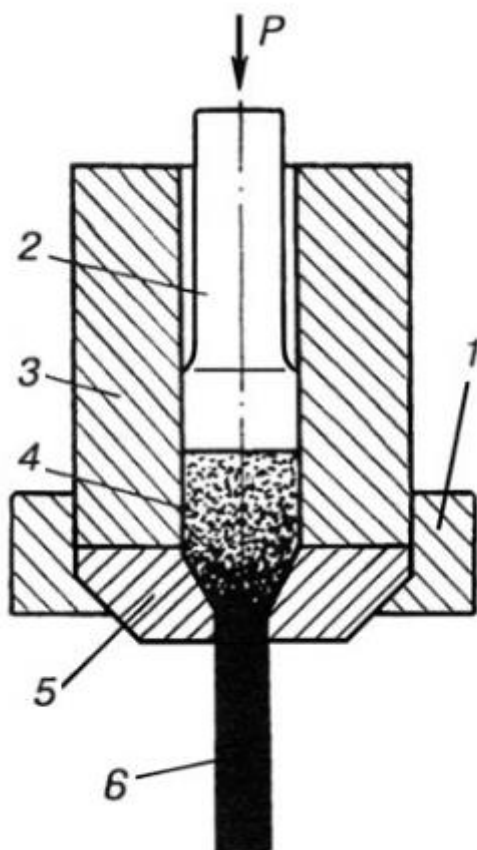


Рисунок 1.6 – Схема пресування порошків через мундштук

1 – тримач мундштука ; 2 – пуансон; 3 – стальной стакан; 4 – порошок; 5 – мундштук; 6 – заготовка

Шлікерне формування дозволяє отримувати вироби більші за розміром та складнішої форми без застосування великого тиску, особливо з крихких та твердих порошків, таких як карбіди, силіциди, нітриди та інші. Цей процес може відбуватися за допомогою різних методів:

а) Шлікерне лиття: Вироби формуються в пористих формах, куди заливають спеціальну суміш порошку і рідини, яка називається шлікером. Після видалення рідини форму виймають, а виріб сушать та спікають.

б) Електрофоретичний метод: Заготовку формують шляхом накопичення частинок шлікера, які рухаються під впливом електричного поля і осаджуються на електроді-формі.

в) Формування термопластичних шлікерів: Використовують тверді порошки з термопластичним зв'язком, який за кімнатної температури є твердим, а під час нагрівання стає рідким і дає шлікеру ливарні властивості.

Шлікер - це суспензія, що складається з порошку і рідини. Властивості шлікера включають сипкість, стабільність та здатність до заповнення форми.

Динамічне (імпульсне) формування використовує ударні хвилі для ущільнення порошку. Це може бути досягнуто за допомогою вибухів, електричних розрядів, стиснутого газу або вібрації. Цей метод має декілька переваг, таких як можливість створення високого тиску, отримання високої щільності виробів та зрощення шарів різних матеріалів.

1.2 Спікання

1.2.1 Види спікання

Спiкання, яке є ключовим етапом порошкової металургiї, визначає кiнцевi властивостi матерiалiв та виробiв. Це складний процес, який включає велику кiлькiсть фiзико-хiмiчних явищ, що вiдбуваються пiд час нагрiвання порошокiв або пресовок.

З позицiї фiзичної та хiмiчної науки, спiкання - це процес переходу порошкового матерiалу у стабiльнiший стан завдяки зниженню поверхневої та внутрiшньої енергiї, що супроводжується залiковуванням дефектiв, дифузiйними процесами, окисненням-вiдновленням, випаровуванням-конденсацiєю i другими явищами.

З технологiчного боку, спiкання являє собою термiчну обробку або пресованого матерiалу при температурi, нижчiй за температуру плавлення, з метою змiцнення механiчних властивостей за рахунок утворення взаємодiй частинок.

Головна мета спiкання полягає в досягненнi конкретного рiвня механiчних та фiзико-хiмiчних характеристик, що виникають пiд час процесу нагрiвання.

Важливою характеристикою порошкової металургiї є вiдсутнiсть потреби у розплавленнi основи пiд час спiкання. Однак, у багатокомпонентних матерiалiв може вiдбуватися розплавлення деяких компонентiв, що впливає на процес спiкання. Тому види спiкання подiляють на твердофазне i рiдкофазне, залежно вiд наявностi рiдкої фази пiд час нагрiвання.

1.2.2 Твердофазне спiкання

Спiкання однокомпонентних систем

Гегузiн визначив три основнi стани порошкового матерiалу при нагрiваннi, кожен з яких вiдповiдає певнiй фазi.

Перша стадія - це процес припікання порошинок один до одного, що включає збільшення площі контакту.

Друга стадія описує пористе тіло як сукупність двох фаз - речовини і порожнечі, з поступовим закриттям контактів між частинками.

Третя стадія характеризується наявністю замкнених пор, що призводить до ущільнення порошкового тіла.

Далі, щоб розглянути процеси більш детально, розрізняють шість стадій.

Перша стадія - це розвиток зв'язків серед частинками порошку, що відбувається на початку нагрівання.

Друга стадія описує утворення та зростання міжчасткових контактів, відомих як "шийки".

Третя стадія - закриття пористості та ущільнення порошкового тіла.

Четверта стадія - сфероїдизація пор, коли пори змінюють свою форму на більш круглу.

П'ята стадія - ущільнення порошкового матеріалу завдяки зменшенню об'єму ізольованих пор.

І, нарешті, шоста стадія - укрупнення пор, коли відбувається зростання великих пор за рахунок зменшення розмірів дрібних пор.

Спікання багатокomпонентних систем

Порошкові матеріали, які застосовуються у різних сферах техніки, часто складаються з багатьох компонентів і утворюють потрібний сплав протягом спікання. Вони мають градієнт концентрацій компонентів у різних мікрооб'ємах первинного порошкового тіла.

У відміню від спікання пресовок з однокомпонентного матеріалу, де процеси самодифузії сприяють ущільненню, у багатокomпонентних системах взаємна дифузія різних елементів може ускладнювати процес усадки. Проте в кінцевому результаті усадка все ж відбувається.

Процеси, які супроводжують нагрівання багатокomпонентних систем, значною мірою залежать від характеру відповідних діаграм стану. Тому

виділяють три типи твердофазного спікання багатоконпонентних систем: з взаємною розчинністю компонентів, з обмеженою взаємною розчинністю та з взаємно нерозчинними компонентами.

Під час спікання систем з повною розчинністю компонентів утворюється фаза - взаємно твердий розчин. В проміжних стадіях можуть існувати декілька фаз.

Системи з обмеженою розчинністю часто мають діаграми стану з евтектикою, перитектикою або хімічними сполуками. Властивості матеріалів після спікання залежать від багатьох факторів, таких як повнота гомогенізації, пористість та якість міжфазних контактів.

У системах з взаємно нерозчинними компонентами, ключовим є менша поверхнева енергія міжфазної межі, ніж сума поверхневих енергій окремих частинок. Це є термодинамічною умовою спікання двох частинок різних компонентів.

1.2.3 Рідкофазне спікання

Спікання порошку стає рідкофазним, коли воно відбувається за такої температури, що призводить до утворення рідкої фази. Ця рідка фаза може існувати протягом усього часу ізотермічної витримки під час нагрівання, а потім зникати, незалежно від подальшого нагрівання.

Утворення рідкої фази, особливо при розплавленні компонента з низькою температурою плавлення, сприяє розвитку сил притягання між відокремленими частинками порошку, якщо вона змочує їх. Присутність рідкої фази також значно підвищує швидкість дифузії в компонентів та полегшує переміщення частинок.

Теорія рідкофазного спікання базується на гіпотезі, що рідка фаза ефективно адгезує до поверхні твердих частинок порошку і може розчиняти їх у обмежених кількостях.

Для сферичних поверхностей, де розмір маленьких частинок з радіусом r та великих частинок з радіусом $r_0 \rightarrow \infty$, використовуються наступні позначення: C та C_0 - відповідно розчинності маленьких і великих частинок, $\sigma\text{-ж}$ - специфічна вільна енергія поверхні на межуванні поділу тверде-рідина, а V_0 - молярний об'єм.

Таким чином, коли тверді частинки з'єднуються з рідким середовищем, дрібні частинки переважно розчиняються в цій рідкій фазі. Оскільки більші частинки мають меншу розчинність, розчинена речовина відкладається на них, розширюючи їх розміри, і ця дія триває до того моменту, коли структура маси, що осідає, не стане рівномірною.

У рідкофазного спікання є три основні стадії: на початку відбувається механічне перерозташування частинок у в'язкій рідині, потім настає розчинення та осадження, а на завершення утворюється жорсткий скелет.

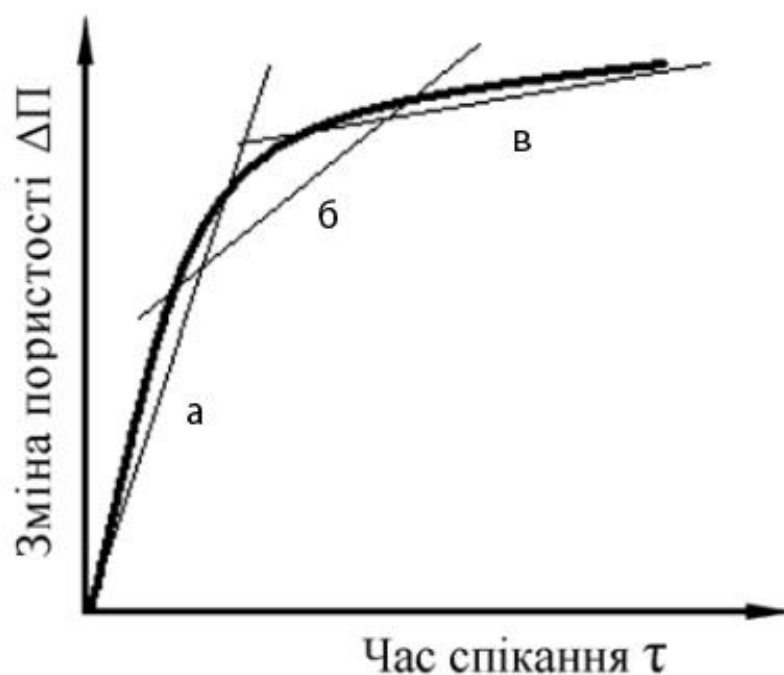


Рисунок 1.7 – Кінетична крива усадки при рідкофазному спіканні
а) область пластичної течії; б) розчинення і осадження; в) твердофазне спікання

На першій стадії утворена рідка фаза заповнює пори, сприяючи

перегрупуванню та щільнішому укладанню твердих частинок. На другій стадії відбувається розчинення дрібних частинок і їх осадження на більших частинках речовини з розплавом. Третя стадія включає зрощення міцних частинок, і їх ущільнення дотримується закономірностей твердофазного спікання.

Підвищення тиску пресування вихідних порошків позитивно впливає на процес рідкофазного спікання, за умови, це не спричиняє утворення значної кількості замкнутих пор, які не можуть бути заповнені рідкою фазою на початковій стадії спікання. Інфільтрація відіграє важливу роль у таких процесах. Це означає, що порошок компонента з високою точкою плавлення пресують у пористий каркас, а потім наповнюють порожнечі розплавленим компонентом з низькою точкою плавлення.

Після спікання вироби можуть піддаватися додатковій обробці для досягнення кінцевої форми, розмірів і потрібних властивостей.

1.2.4 Новітні технології спікання

Останні два десятиліття спостерігається активний розвиток традиційних та виникнення нових технологій консолідації металевих порошків, які використовують сучасні досягнення комп'ютерного моделювання. Серед них виділяються технології швидкого прототипування, що дозволяють виготовляти деталі з остаточною геометрією без подальшої механічної обробки, відповідно до тривимірного зображення, створеного на комп'ютері.

Використання "розумних" технологій виготовлення виробів з порошків без прес-форм передбачає створення алгоритму, що дозволяє ефективно знижувати вартість та час розробки, підвищувати якість продукції. Основа цих технологій - пошарове будівництво виробів шляхом фіксації та

послідовного з'єднання шарів металевого порошку за різних методів консолідації, таких як спікання, сплавлення, склеювання та полімеризація.

Технології спікання, які активуються полем, представляють широкий спектр методів консолідації порошків за допомогою електромагнітних полів, таких як мікрохвильове спікання та його модифікації. Вони відрізняються прямим нагріванням матеріалу безпосередньо у процесі консолідації, що сприяє рівномірному нагріванню та більш однорідній консолідації.

Технологія іскрового плазмового спікання передбачає спікання порошкового матеріалу під впливом механічного тиску та високотемпературної плазми, що виникає внаслідок електричного розряду. Цей метод дозволяє швидко нагрівати матеріал до високих температур та забезпечує однорідну консолідацію, відкриваючи нові можливості створення матеріалів з унікальними властивостями.

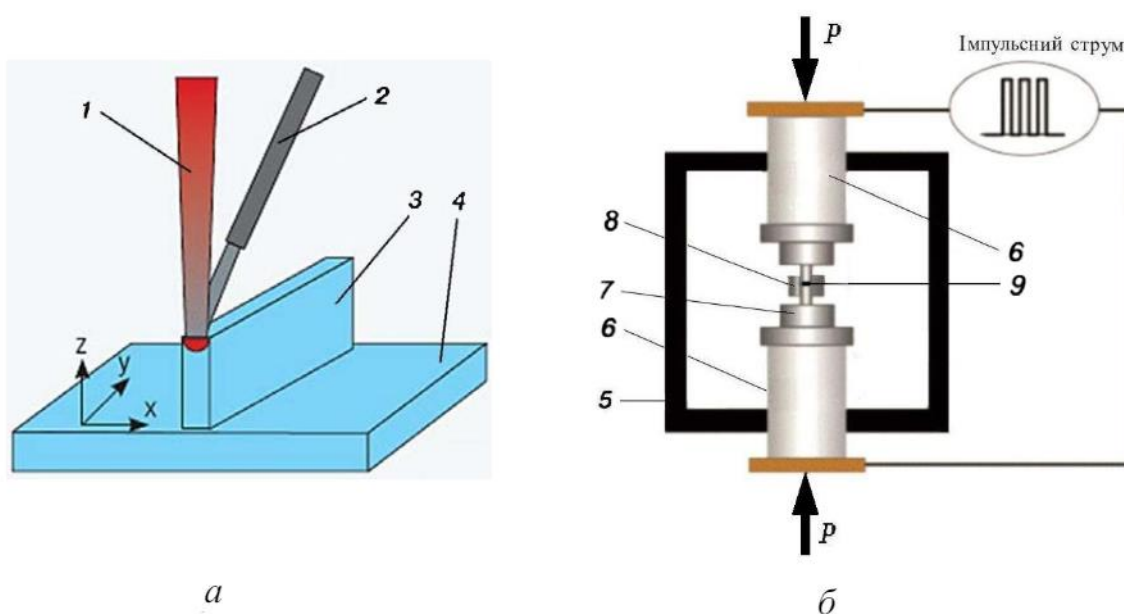


Рисунок 1.8 – а) конструкція апарату іскрового плазмового спікання

б) конструкція апарату пошарового лазерного сплавлення порошків

1 – лазерний промінь; 2 – сопло для подачі порошку; 3 – спечена деталь; 4 – платформа; 5 – вакуумна камера; 6 – прес; 7 – графітова шайба; 8 – графітова форма; 9 – порошок

Технологія лазерного додавання матеріалу шар за шаром дозволяє автоматизовано створювати тривимірні вироби згідно з комп'ютерною моделлю. Процес здійснюється із використанням лазерного променя для зплавлення порошкових матеріалів та послідовного нанесення шарів для формування деталі відповідно до заданих параметрів. Подача порошку в зону плавлення може здійснюватися за допомогою інертного газу або механічно з спеціальної камери. За першим випадком, головка лазера рухається за допомогою системи управління, за другим – промінь сканує зону на рухомій платформі, де вже формується готовий виріб. Ця технологія дозволяє економити час та витрати на виробництво, оскільки не потрібно використовувати додаткове обладнання та прес-форми. Вона також зменшує необхідність у фінішній механічній обробці та дозволяє отримати однорідне з'єднання без тріщин та пор. Такий метод широко використовується для виготовлення деталей автомобільних турбін та компресорів із порошків нержавіючої сталі, титану та інших матеріалів.

РОЗДІЛ 2

САМОУЗГОДЖЕНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДУ ПОРОШКОВОГО МАТЕРІАЛУ ДО ЩІЛЬНОГО ТВЕРДОТІЛЬНОГО СТАНУ

2.1 Основні рівняння

Розглянемо деформацію зсуву, яка задається зміщенням $\bar{u}(\bar{r}, t)$. Для опису стану порошкового матеріалу використаємо відхилення густини $\delta\rho$, яке можна задати виразом

$$\delta\rho \Rightarrow -\bar{\rho} \operatorname{div} \bar{u} = -\bar{\rho} u_{ii}$$

Тут u_{ii} - слід тензор деформації. Тоді маємо

$$\operatorname{div} \bar{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Де $\bar{\rho}$ – позначає середню щільність матеріалу як цілого. При цьому вважаємо, що у випадку ущільнення порошкового матеріалу буде вірне співвідношення

$$\bar{\rho} \gg |\delta\rho|$$

Далі введемо допоміжну величину s згідно залежності

$$s = 1 - \frac{\delta\rho}{\bar{\rho}} - u_{ii}. \quad (2.1)$$

Таким чином за відсутності вільного об'єму між частинками порошку даний параметр прямує до одиниці. Також з іншого боку для чисто зсувної деформації присутні тільки тангенціальні складові, а слід тензору деформації

$$u_{ii} \rightarrow 0, (2.2)$$

Таким чином, коли $s \rightarrow 0$ ми маємо вільний простір між частинками порошкового матеріалу, що призводить до так званого стану в'язкої течії, який можна спостерігати на прикладі зибучих пісків.

Параметр s в деяких моделях замінюють щільністю

$$n_0 = \lim_{P' \rightarrow \infty} \left[\frac{r_s(P', T)}{r_s(P, T)} \right]^3, (2.3)$$

Де P, T - заданий тиск та температура

P' - тиск при нескінченному стисканні

r_s - відстань між найближчими сусідами

Тоді можна використовувати концентрацію вільного простору

$$C = \frac{n_0 - n}{n_0}, (2.4)$$

Розглянемо динамічні рівняння для щільності та моменту щільності

$$\frac{\partial}{\partial t} \delta \rho = -\bar{\rho} \operatorname{div} \bar{v}, (2.5)$$

$$\bar{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \bar{v} = \nabla \delta + \eta_0 \nabla^2 \bar{v}, (2.6)$$

Де $\bar{v} = \frac{\partial u}{\partial t}$ - швидкість зміни зсувного зміщення.

Перший доданок у правій частині (2.6) записується в рамках функціоналу вільної енергії

$$\nabla \delta = -\bar{\rho} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \rho} \right)_{\bar{u}} - \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}} \right)_{\rho} = - \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}} \right)_{\rho}, (2.7)$$

Тут були використані варіаційні похідні

$$\left(\frac{\delta}{\delta \bar{u}} \right)_{\rho} = \left(\frac{\delta}{\delta \bar{u}} \right)_{s} - \nabla \left(\frac{\delta}{\delta s} \right)_{\bar{u}}, (2.8)$$

$$\left(\frac{\delta}{\delta s}\right)_{\bar{u}} = \bar{\rho} \left(\frac{\delta}{\delta \rho}\right)_{\bar{u}}, \quad (2.9)$$

Важливо, що у присутності розподілу вільного простору швидкість каркасу $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$ відрізняється від швидкості руху усього матеріалу в цілому \bar{v}

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \bar{v} - \lambda_{\mathbf{o}} \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{\rho}, \quad (2.10)$$

Подіємо grad на (2.10)

$$\nabla \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \nabla \bar{v} - \lambda_{\mathbf{o}} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{\rho}, \quad (2.11)$$

Розглянемо випадок, коли градієнт прискорення $\nabla \dot{\bar{u}} = \mathbf{0}$, тоді

$$\nabla \bar{v} = \lambda_{\mathbf{o}} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{\rho}, \quad (2.12)$$

Підставимо (2.12) у праву частину (2.5)

$$\frac{\partial}{\partial t} \delta \rho = -\bar{\rho} \lambda_{\mathbf{o}} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{\rho}, \quad (2.13)$$

Враховуючи рівняння (2.8) та (2.9)

$$\left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{\rho} = \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{s} - \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta s}\right)_{\mathbf{u}} = \left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{s} - \bar{\rho} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \rho}\right)_{\bar{u}}$$

Підставимо отриманий результат в (2.12)

$$\nabla \bar{v} = \lambda_{\mathbf{o}} \nabla \left[\left(\frac{\delta F}{\delta \bar{u}}\right)_{s} - \bar{\rho} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \rho}\right)_{\bar{u}} \right] = \lambda_{\mathbf{o}} \nabla \left[-\nabla \delta - \bar{\rho} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \rho}\right)_{\bar{u}} \right], \quad (2.14)$$

Розділимо (2.13) на $\bar{\rho}$ та врахуємо (2.12),(2.14)

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\delta \rho}{\bar{\rho}} = -\lambda_{\mathbf{o}} \nabla \left[-\nabla \delta - \bar{\rho} \nabla \left(\frac{\delta F}{\delta \rho}\right)_{\bar{u}} \right], \quad (2.15)$$

Врахуємо визначення параметра s (2.1)

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\delta \rho}{\rho} + u_{ii} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\delta \rho}{\rho}$$

Оскільки слід тензора деформації $u_{ii} = \text{const}$, то

$$\frac{\partial}{\partial t} u_{ii} = 0$$

Тоді в лівій частині (2.15) можемо замінити густину на параметр s :

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \lambda_0 \nabla^2 \delta + \lambda_{0\bar{\rho}} \nabla^2 \left(\frac{\delta F}{\delta \rho} \right)_{\bar{u}}$$

З іншого боку, згідно (2.13)

$$\bar{\rho} \left(\frac{\delta F}{\delta \rho} \right)_{\bar{u}} = \left(\frac{\delta F}{\delta s} \right)_{\bar{u}}$$

Остаточно отримуємо

$$\left(\frac{\partial s}{\partial t} = \lambda_0 \nabla^2 \delta + \lambda_0 \nabla^2 \left(\frac{\delta F}{\delta s} \right)_{\bar{u}}, \right) (2.16)$$

Параметр s зручно вибрати як параметр порядку, який розрізняє тверdotільний стан ($s=1$ у разі ідеального щільного стану) і стан в'язкої течії ($s < 1$).

Тоді для знаходження варіаційної похідної (2.16) запишемо вільну енергію системи у вигляді розкладання Ландау для фазового переходу 2-го роду

$$F(s) = \frac{A}{2} s^2 + \frac{B}{4} s^4, (2.17)$$

де $A = \alpha(T - T_c)$, $d > 0$

$B = \text{const}$, $B > 0$

При $T > T_c \Rightarrow A > 0$

І маємо $s_0 = 0$

При $T < T_c \Rightarrow A < 0$

Для спрощення розглянемо тільки квадратний доданок

$$F(s) \approx \frac{A}{2} s^2, \text{ де } A > 0, (2.18)$$

В результаті отримаємо систему двох диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \dot{s} = \lambda_0 \nabla^2 \delta + \lambda_0 \nabla^2 (As) \\ \dot{\bar{v}} = \frac{1}{\rho} \nabla \delta + \frac{\eta_0}{\rho} \nabla^2 \bar{v} \end{cases}, (2.19)$$

Хоча чисельного моделювання двох диференціальних рівнянь достатньо, але для аналітичного опису системи необхідно врахувати поведінку трьох ступенів свободи. Природно припустити, що третім ступенем свободи є поле пружних напруг σ

Варто також відзначити, що важливим фактом є залежність модуля зсуву M від параметра s .

Поблизу точки зіткнення зі зменшенням s очікується, що модуль зсуву різко падає від кількісного значення M до нуля (значення для рідини) поблизу власних значень. При цьому розглядалося дві апроксимації

$$1) M(s) = M_0 + M_1 s \dots$$

$$2) M(s) = M_0 \exp\left[-\frac{A_0}{s + s_0}\right]$$

Однак для побудови аналітичної теорії крім рівняння руху для σ , та системи (2.19) слід врахувати мікроскопічний канал дисипації.

В результаті отримуємо:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\frac{s}{t_s} + \lambda_0 \nabla^2 \delta + \lambda_0 A \nabla^2 s + g_s v \nabla^2 \bar{v} \\ \dot{\bar{v}} = \frac{1}{\rho} \nabla \delta + \frac{\eta_0}{\rho} \nabla^2 \bar{v} - g_v s \delta \\ \dot{\delta} = \frac{\delta_s - \delta}{t_\delta} - g_\delta v s \nabla^2 \bar{v} \end{cases}, (2.20)$$

2.2 Використання відносних одиниць

Система (2.20) має надзвичайно велику кількість констант, тому використаємо відносні безрозмірні одиниці.

Врахуємо, що

t_s - час релаксації s

$$g_s - \text{const} \quad g_s \cdot g_\partial \cdot g_\delta > 0$$

δ_s - напруга,

$$\bar{v} \rightarrow v \quad \mathbf{V} \rightarrow \frac{v}{v_x}$$

$$l^2 = A t_s \lambda_0$$

$$s_s v_s = \frac{\delta_s A t_s \lambda_0}{g_\delta v t_\delta}$$

$$v_s = \frac{A \lambda_0 s_s}{g_s v}$$

$$s_s^2 = \frac{l^2}{v \tau t_0 g_v g_\delta}$$

$$\delta_s = \frac{l^2}{v \tau t_s g_s g_\delta}$$

$$v_s = \frac{A \lambda_0}{v g_s} \times \frac{l}{\sqrt{v \tau t_0 g_v g_\delta}}$$

Введемо позначення

$$\frac{\delta_s}{A s_s} = \alpha \quad ; \quad \frac{\tau \delta_s}{\rho v_s l} = \beta \quad ; \quad \frac{\eta_0 \tau}{\rho l^2} = \gamma^2 \quad .$$

Остаточно отримаємо систему:

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} &= -s + \alpha \delta' + s' + v'' \\ \frac{\tau}{t_s} \times \dot{v} &= \beta \delta' + \gamma^2 v'' - s \sigma \\ \frac{t_\delta}{t_s} \times \dot{\sigma} &= \sigma_\partial - \sigma - s v'' \end{aligned} \right\} , (2.21)$$

де точка означає диференціювання за часом, штрих – за координатою.

Для часу, координати, параметра порядку, швидкості та напруги σ використані масштаби t_s ; $l = \sqrt{At_s \alpha_0}$

$$\begin{cases} s_s = l(v\tau t_\delta g_v g_\delta)^{-\frac{1}{2}} \\ v_s = \frac{Al\lambda_0}{v g_s} (v\tau t_\delta g_v g_\delta)^{-\frac{1}{2}}, (2.22) \\ \sigma_s = l^2 (v\tau t_s g_s g_v)^{-1} \end{cases}$$

Одним із параметрів, що характеризують масштаб та властивості матеріалу є

$$\gamma^2 = \frac{\eta_0 \tau}{\rho l^2}, (2.23)$$

Залежить від в'язкості η_0 й модуля зсуву $\left(\tau = \frac{\eta_0}{\alpha}\right)$, щільності середовища $\bar{\rho}$, характерного масштабу l .

Знайдемо явні вирази для параметрів, що залишилися, α і β :

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{As_s} = \frac{l^2 \sqrt{v\tau t_0 g_\delta g_\sigma}}{v\tau t_s g_s g_v Al} = \frac{\lambda_0}{g_s l} \sqrt{\frac{t_\delta g_\delta}{v\tau g_v}} = \frac{1}{g_s} \sqrt{\frac{\lambda_0 t_\delta g_\delta}{At_s v\tau g_v}}$$

$$\alpha = \left(\frac{\lambda_0 t_0 g_\delta}{Av\tau t_s g_v g_s^2} \right)^{\frac{1}{2}}, (2.24)$$

$$\beta = \frac{\tau \delta_s}{\rho l v_s} = \frac{\sqrt{v\tau t_\delta g_\delta g_\tau}}{\bar{\rho} g_v At_s \lambda_0} = l^{-2} \sqrt{\frac{v\tau t_0 g_\delta}{g_v \bar{\rho}^2}}$$

$$\beta = l^{-2} \left(\frac{v\tau t_0 g_\delta}{g_v \times \bar{\rho}^2} \right)^{\frac{1}{2}}, (2.25)$$

Характер розв'язання синергетичної системи рівнянь (2.21) задається

співвідношенням часів $\frac{\tau}{t_s}$ та $\frac{t_\delta}{t_s}$.

2.3 Знаходження стаціонарних значень

Врахуємо, що відповідні часи релаксації параметра s (до нульового значення в автономному режимі) набагато перевершує (досить велике) гідродинамічний масштаб τ і час зміни напруги σ .

В результаті для реальних систем дисипативна картина фазового переходу реалізується коли

$$t_s \gg \tau, t_\sigma, (2.26)$$

Оскільки безрозмірні швидкості зміни величин $\dot{s}, \dot{v}, \dot{\sigma}$ однакові по порядку величини, то умова (2.26) призводить до того, що $\frac{t_\sigma}{t_s} \ll 1$ і $\frac{t_\sigma}{t_s} \ll 1$, і ми можемо знехтувати лівими частинами рівнянь для швидкості зміни зсувного зміщення (яке відіграє роль спряженого поля до параметра порядку) та пружних напружень (які можуть інтерпретуватися як керуючий параметр).

Для спрощення аналізу (21) розглянемо випадок однорідного розподілу напруг $\sigma' = 0, \sigma'' = 0$ або $\alpha, \beta \rightarrow 0$, враховуючи (2.26) замість (2.21) маємо

$$\dot{s} = -s + s'' + v'', (2.27)$$

$$0 = \gamma^2 v'' - s\delta, (2.28)$$

$$0 = \sigma_s - \sigma - sv'', (2.29)$$

З (2.28) маємо

$$v'' = \frac{s\sigma}{\gamma^2}, (2.30)$$

З (2.29) отримаємо залежність для пружних напружень

$$\sigma = \sigma_s - sv'' = \sigma_s - s \frac{s\sigma}{\gamma^2} = \sigma_s - \frac{s^2\sigma}{\gamma^2};$$

$$\gamma^2\sigma = \gamma^2\sigma_s - s^2\sigma;$$

$$(\gamma^2 + s^2)\sigma = \gamma^2\sigma_s;$$

$$\sigma = \frac{\gamma^2 \sigma_\varepsilon}{\gamma^2 + s^2}, \quad (2.31)$$

Підставивши (2.31) → (2.30) знайдемо стаціонарне значення для похідної від швидкості зміни зсувного зміщення

$$v' = \frac{s}{\gamma^2} \times \frac{\gamma^2 \sigma_\varepsilon}{\gamma^2 + s^2};$$

$$v' = \frac{s \sigma_\varepsilon}{\gamma^2 + s^2}, \quad (2.32)$$

Отже, зростання відносної зміни вільного об'єму між частинками порошкового матеріалу призводить до зменшення зсувних напруг σ нижче рівня σ_ε , що задається зовнішнім впливом.

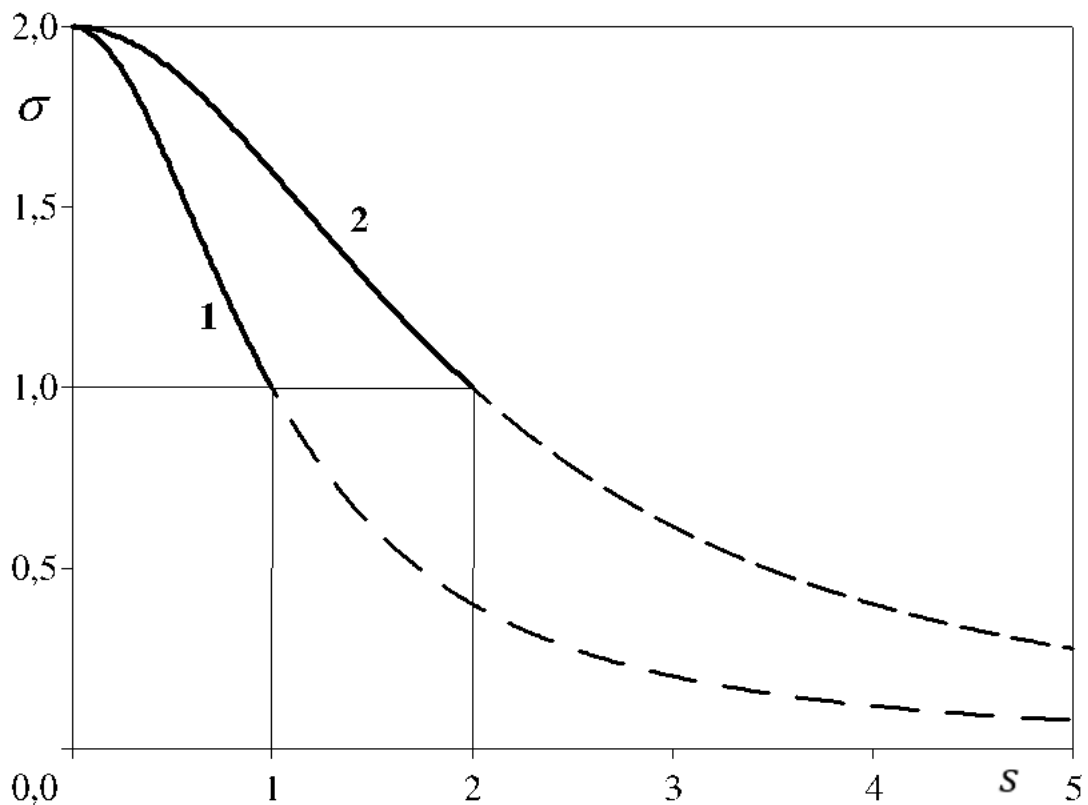


Рисунок 2.1 – Залежність стаціонарного значення керуючого параметра (зсувного напруження) від параметра порядку (відносної зміни вільного об'єму між частинками порошкового матеріалу)

$$1) \sigma_\varepsilon = 2; \gamma^2 = 1 .$$

$$2) \sigma_s = 2; \gamma^2 = 2 .$$

Крім того, спонтанне зростання відносної зміни вільного об'єму між частинками порошкового матеріалу призводить до збільшення кривизни швидкості зсуву v'' в інтервалі, обмеженому максимальним значенням γ .

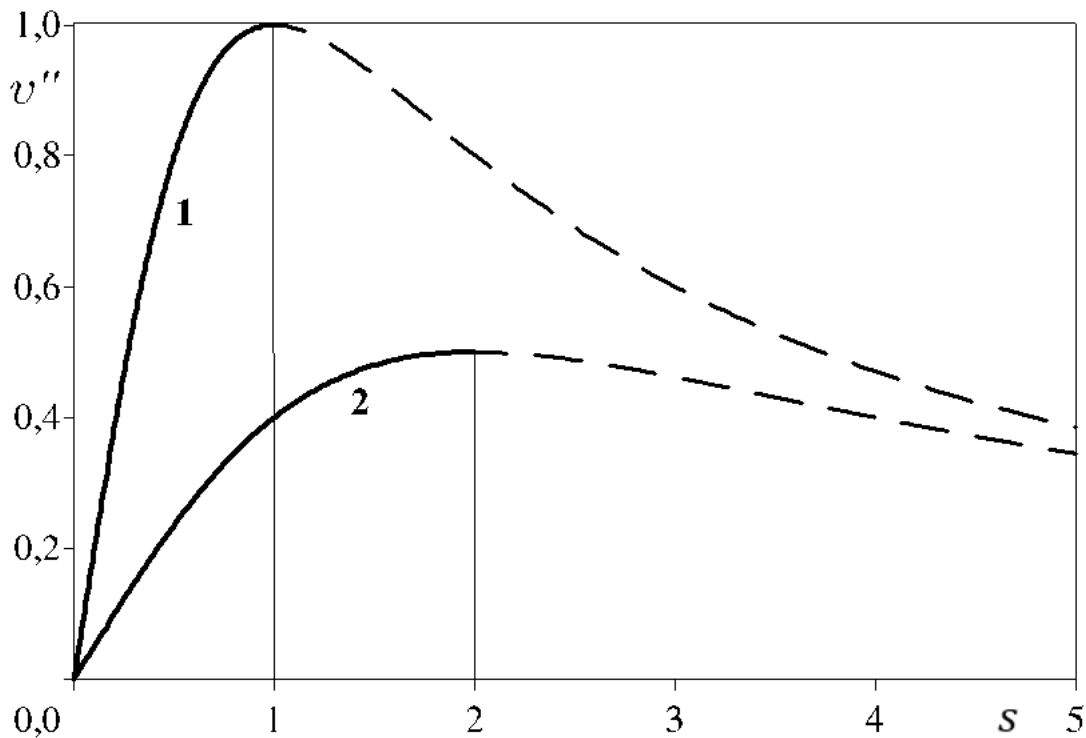


Рисунок 2.2 – Залежність кривизни швидкості зсуву v'' від параметра порядку (відносної зміни вільного об'єму між частинками порошкового матеріалу)

$$1) \sigma_s = 2; \gamma^2 = 1 .$$

$$2) \sigma_s = 2; \gamma^2 = 2 .$$

Підставимо (2.32) в рівняння (2.27)

$$\dot{s} = -s + s'' + \frac{s\sigma_s}{\gamma^2 + s^2}$$

$$\dot{s} = s'' - \left(s - \sigma_e \frac{s}{\gamma^2 + s^2} \right)$$

Приходимо до рівняння Гінзбурга — Ландау

$$\dot{s} = s'' - \frac{\partial E}{\partial s}, 2.33$$

де ефективна енергія утворення вільного простору визначається виразом

$$E(s) = \left(s - \sigma_e \frac{s}{\gamma^2 + s^2} \right) ds = \frac{s^2}{2} - \sigma_e \frac{s}{\gamma^2 + s^2} ds = \frac{s^2}{2} - \sigma_e \int \frac{s/\gamma^2}{1 + s^2/\gamma^2} ds = \frac{s^2}{2} - \frac{\sigma_e}{2} \int \frac{d(s^2/\gamma^2)}{1 + s^2/\gamma^2} = \frac{s^2}{2} - \frac{\sigma_e}{2} \ln \left(1 + \frac{s^2}{\gamma^2} \right)$$

$$E(s) = \frac{s^2}{2} - \frac{\sigma_e}{\alpha} \ln \left(1 + \frac{s^2}{\gamma^2} \right), 2.34$$

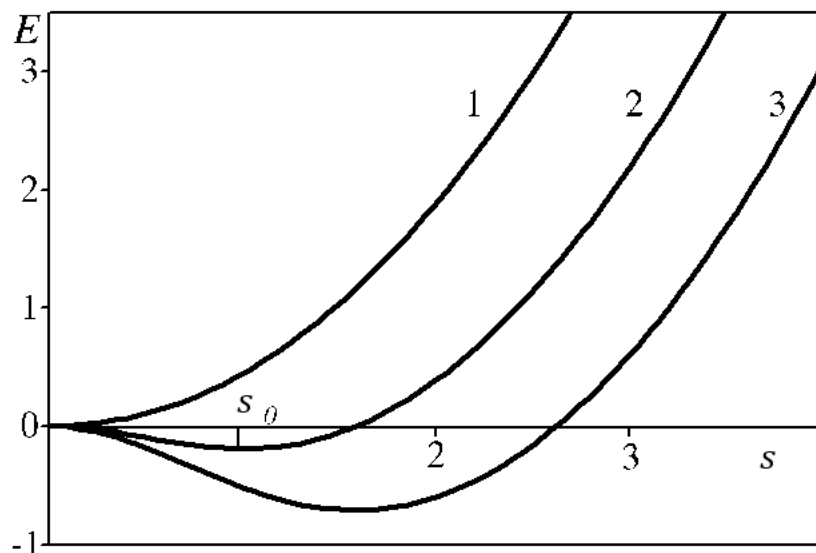


Рисунок 2.3 – Залежність ефективного потенціалу системи від параметра порядку (відносної зміни вільного об’єму між частинками порошкового матеріалу)

З аналізу (2.34) випливає, що з $\sigma_e < 1$ енергія зміни вільного об’єму між частинками порошкового матеріалу має мінімум у точці $s_0 = 0$, що відповідає пластичному стану (хаотичному положенню частинок порошкового матеріалу) або так званій пластичній течії матеріалу.

При $\sigma_e > 1$ енергія утворення вільного об'єму набуває мінімум при $s_0 \neq 0$, що відповідає твердотільному (компактному) стану з пружними деформаціями.

Знайдемо точки екстремуму (2.34)

$$\frac{\partial E}{\partial s} = 0 ;$$

$$s - \sigma_e \frac{s}{\gamma^2 + s^2} = 0 ;$$

$$s \left[1 - \frac{\sigma_e}{\gamma^2 + s^2} \right] = 0 ;$$

$$1) s=0$$

$$2) \frac{\sigma_e}{\gamma^2 + s^2} = 1 ;$$

$$\gamma^2 + s^2 = \sigma_e ;$$

$$s_0 = \sqrt{\sigma_e - \gamma^2} .$$

$$s_0 = \sqrt{\sigma_e - \gamma^2}, (2.35)$$

2.4 Числове моделювання

Розглянемо випадок, коли швидше за всіх змінюється в часі швидкість зсуву v і відсутні неоднорідності за параметром порядку. Тоді наша система рівнянь набуває вигляду

$$\dot{s} = -s + s' + v', (2.36)$$

$$0 = \gamma^2 v'' - s\sigma, (2.37)$$

$$\dot{\sigma} = \sigma_e - \sigma - sv', (2.38)$$

Звідси можемо виразити другу похідну за координатою від швидкості через параметр порядку та керуючий параметр та отримати систему двох диференціальних рівнянь

$$\dot{s} = -s + \frac{s\sigma}{\gamma^2}, (2.39)$$

$$\dot{\sigma} = \sigma_e - \sigma - \frac{s^2\sigma}{\gamma^2}, (2.40)$$

Розв'яжемо систему числовим методом, використовуючи мову програмування R.

Спочатку введемо основні параметри та метод числового розрахунку

```
options(digits=4)
sigma_e<- 5
gamma2<- 1
SysFun <- function(Y)
{
  K1<- h*DEpr(ti1, Y)
  K2<- h*DEpr(ti1-h/2, Y-h/2*K1)
  K3<- h*DEpr(ti1-h/2, Y-h/2*K2)
  K4<- h*DEpr(ti1, Y-h/2*K3)
  F <- Yi+1/6*(K1+2*K2+2*K3+K4)-Y
  return(F)
}
MetRK <- function (a, b, Y0, n)
{
  t<- numeric(n+1)
  Y<- matrix(0, nrow = n+1, ncol=2)
  h<- (b-a)/n
  assign("h", h, envir = .GlobalEnv)
```

```

t[1] <- a
Y[1, ] <- Y0
for (i in 1:n)
{
  t[i+1]<- t[i]+h
  assign("ti", t[i+1], envir = .GlobalEnv)
  assign("Yi", Y[i,], envir = .GlobalEnv)
  Z <- nleqslv(Y[i,], SysFun, control = list(btol= 0.01))
  Y[i+1,]=Z$x
}
return(cbind(t, Y))
}

```

Потім вкажемо початкові умови, систему диференціальних рівнянь та виведемо розв'язок графічно.

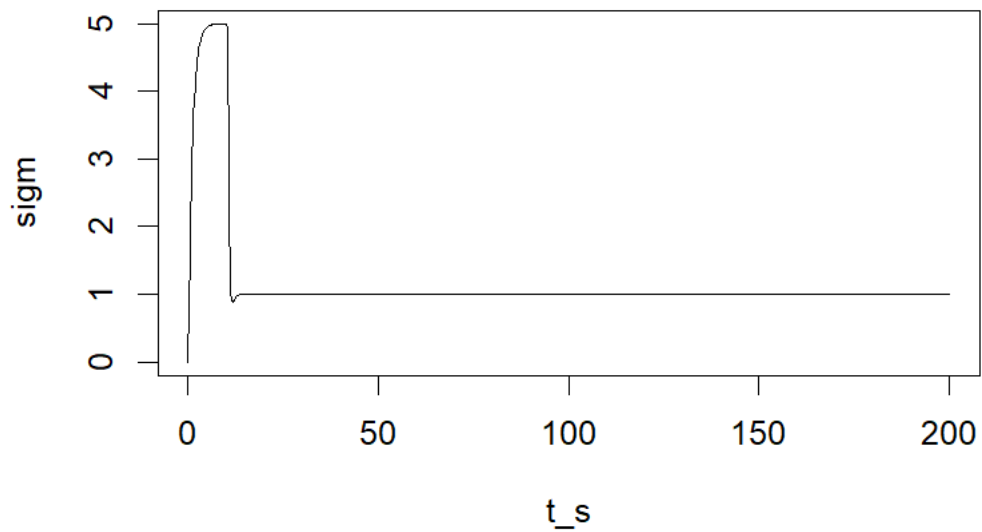
```

#Початкові дані, константи
aa<-0 # початковий час
bb<-200 # кінцевий час
Y0<- c(0,0) # ппочаткова точка для h_g, h_D, h_v
DEpr <- function(t, Y)
{
  Ft<- numeric(2)
  Ft[1]<- -Y[1]+Y[1]*Y[2]/gamma2
  Ft[2]<- sigma_e -Y[2] - Y[1]*Y[1]*Y[2]/gamma2
  #Ft[3]<- (1/taug)*(phi0g - phi1g*Y[3]+phi2g*Y[3]*Y[3]-
  phi3g*Y[3]*Y[3]*Y[3]+phigD*Y[2])
  return(Ft)
}

```

```
A<- 1  
n<- 1000  
tY <- MetRK(aa, bb, Y0, n)  
t_s<- tY[,1]  
s<- tY[,2]  
sigm<- tY[,3]  
plot(t_s, s, type = "l")  
plot(t_s, sigm, type = "l")  
plot(s, sigm, type = "l")  
plot3d(t_s, s, sigm, col = "blue", type = "l")
```

В результаті маємо залежності



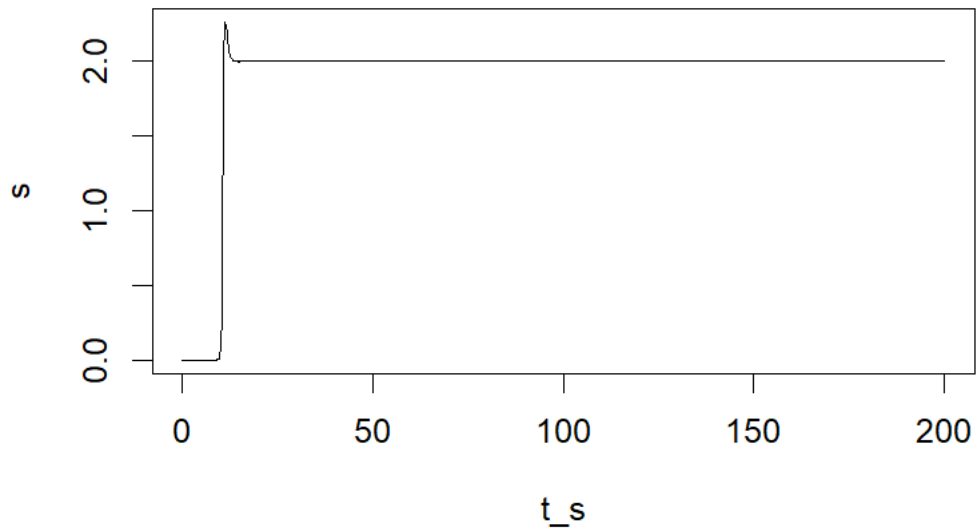


Рисунок 2.4 – Часові залежності керуючого параметра (зсувних напружень) та параметра порядку (відносного вільного об'єму) для нульових початкових умов

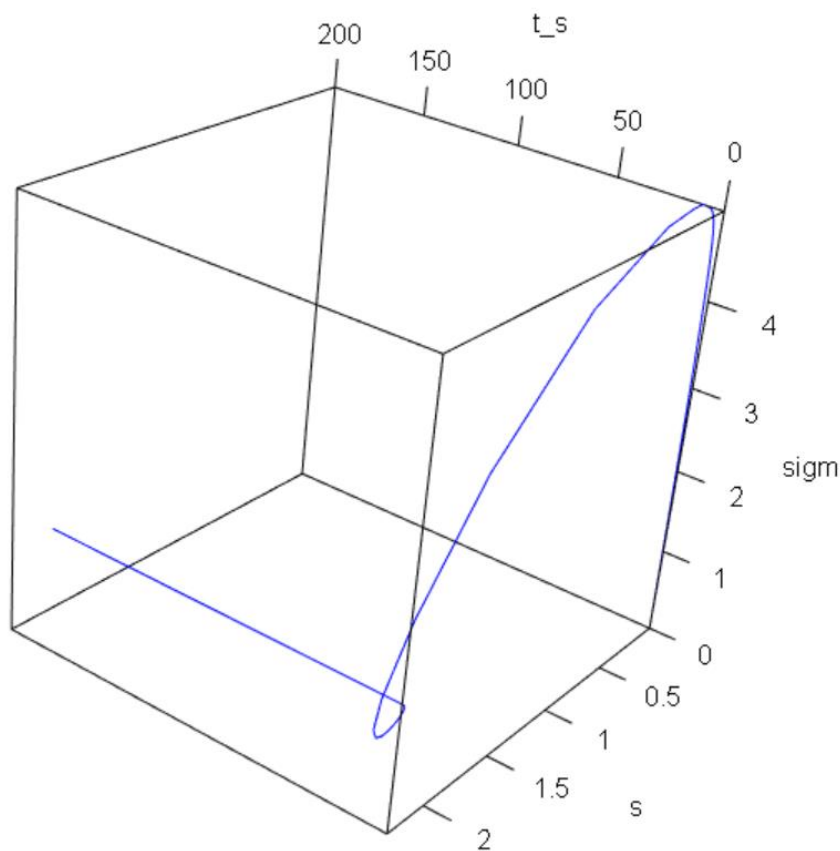


Рисунок 2.5 – Тривимірна залежність основних змінних системи при нульових початкових умовах

Змінюючи початкові умови, маємо зміни у кінетиці системи (Рисунок 2.6). Окрім того змінюється положення стійкості системи. Це означає, що при зміні початкових умов система може переходити від хаотичного стану до твердотільного, коли вільний простір майже відсутній.

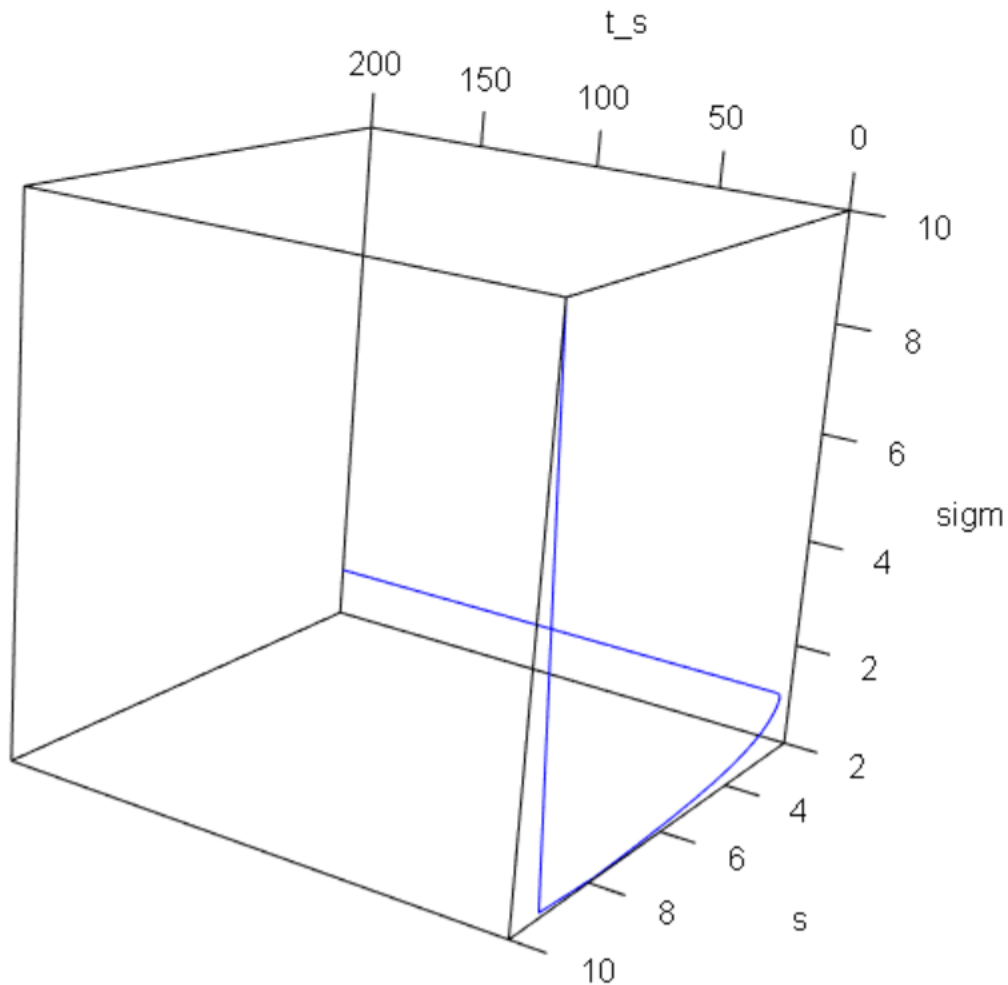


Рисунок 2.6 – Тривимірна залежність основних змінних системи при ненульових початкових умовах

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи були проаналізовані основні експериментальні методи обробки порошкового матеріалу, який є достатньо поширеним в області виробництва різних деталей, покриттів, сенсорів, тощо.

Для аналізу нерівноважних процесів, що відбуваються під час зовнішнього впливу на порошкові матеріали, а саме, ущільнення, було побудовано самоузгоджену модель. У якості параметра порядку, що відрізняє твердотільний стан від хаотичної поведінки було обрано відхилення відносного значення вільного об'єму. Параметром спряженим до параметру порядку слугувала швидкість зсуву порошкового матеріалу; керуючий параметр зводився до зсувної компоненти внутрішніх напружень. В результаті були проаналізовані стаціонарні стани основних параметрів системи. В рамках адіабатичного наближення знайдено ефективну енергію системи, мінімуми якої відповідають стійким станам. За видом залежності енергії можна зробити висновок, чи реалізується твердотільний стан порошкового матеріалу під час ущільнення. Також проведено числовий розрахунок та побудовані часові залежності основних параметрів системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Daniel B. Durham, Manifa Noor, Khandker Akif Aabrar, Yuzi Liu, Suman Datta, Kyeongjae Cho, Supratik Guha, and Charudatta Phatak, Direct imaging of asymmetric interfaces and electrostatic potentials inside a hafnia-zirconia ferroelectric nanocapacitor (2024) <https://arxiv.org/pdf/2405.11653>

[2] Venus Rai, Ivan Titov, Michael P. Adams, Kiyonori Suzuki, Joachim Kohlbrecher, and Andreas Michels¹, Magnetic microstructure of nanocrystalline Fe-Nb-B alloys as seen by small-angle neutron and X-ray scattering (2024) <https://arxiv.org/pdf/2405.14324>

[3] Andreas Erlebach, Heinz-Dieter Kurland, Janet Grabow, Frank A. Müller and Marek Sierka, Structure evolution of nanoparticulate (2013) <https://arxiv.org/pdf/2405.18637>

[4] D. B. He, M. Y. Wang, W. B. Bi, M. Shang,¹ Y. Cai, L. Deng,¹ X. M. Zhang, J. F. Tang, and L. Wang, Plasticity and the corresponding mechanisms of nanopowdered Mg during shock consolidation and spallation (2024) <https://arxiv.org/pdf/2403.00302>

[5] Aida Serrano, Olga Caballero-Calero, Cecilia Granados-Miralles, Giulio Gorni, Cristina V. Manzano, Marta Rull-Bravo, Alberto Moure, Marisol Martín-González, José F. Fernández, CoSb₃-based skutterudite nanocomposites prepared by cold sintering process with enhanced thermoelectric properties (2022) <https://arxiv.org/pdf/2309.14904>

[6] Т. М. НЕСТЕРЕНКО В. О. СКАЧКОВ О. С. ВОДЕННИКОВА, ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ, НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК (2016)

[7] СУХЕНКО В.Ю., СУХЕНКО Ю.Г., САРАНА В.В.,МУШТРУК М.М., МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ АПК (2017)

[8] Б.П. СЕРЕДА І.В. КРУГЛЯК А.К. КОВАЛЕНКО, ОБРОБКА ТИСКОМ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ, НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК (2009)

[9] Smith, J. R., & Jones, A. B., Modeling of powder compaction processes using finite element analysis. *International Journal of Mechanical Engineering*, 10(2), 45-52. (2017)

[10] Johnson, C. D., & Williams, E. F., Advances in computer simulation of powder consolidation processes. *Materials Science and Engineering: A*, 703, 123-135. (2018)

[11] Brown, K. L., & Miller, P. W., Modeling the effects of process parameters on powder densification in metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 25, 123-135. (2019)

[12] Patel, R. H., & Sharma, S. K., Simulation-based optimization of powder sintering process parameters for improved part density. *Journal of Manufacturing Processes*, 48, 92-105. (2020)

[13] AKIRA ONUKI, PHASE TRANSITION DYNAMICS (2004)

[14] Murr, L. E. (2015). *Metallurgy of Powdered Metals*. Elsevier.

[15] German, R. M., *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. Metal Powder Industries Federation. (2005)

[16] Schatt, W., & Wieters, K. P., *Powder Metallurgy: Processing and Materials*. European Powder Metallurgy Association. (2007)

[17] Fan, Y., & Zhang, L., *Modeling and Simulation of Powder Metallurgy Processes*. Springer. (2019)

[18] Kim, H., & Hwang, S., *Finite Element Modeling of Powder Compaction Processes*. John Wiley & Sons. (2009)

[19] Upadhyaya, G. S., *Powder Metallurgy Technology*. Cambridge International Science Publishing. (2012)

[20] Stucker, B., & Roberson, D., *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer. (2014)

[21] Mani, M., Lane, B., & Bourell, D., Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes. National Institute of Standards and Technology. (2017)

[22] Rombouts, M., Maes, G., & Kempenaers, J., *Modelling of Powder Bed-based Additive Manufacturing Processes*. Journal of Materials Processing Technology, 174(1-3), 305-312. (2006)

[23] Salomon, E., & Bauer, S., Experimental and Numerical Investigation of the Compaction of Metal Powders. Journal of Powder Metallurgy, 49(1), 45-52. (2013)

[24] Lydia Harris Serafina, Ethan R. Cluff b, Gus L. W. Harta, Eric R. Homerb, Grain boundary solute segregation across the 5D space of crystallographic character (2024) <https://arxiv.org/pdf/2405.10566>

[25] Menahem Krief and Yinon Ashkenazy, Spatial distribution of local elastic moduli in nanocrystalline metals (2024) <https://arxiv.org/pdf/2405.04995>

[26] Zuoyong Zhang and Chuang Deng, Grain boundary segregation prediction with a dual-solute model (2024) <https://arxiv.org/pdf/2404.15513>

[27] M.S. Habib , S.F.U. Farhad, N.I. Tanvir, M.S. Alam, M. N. A. Bitu, M.S. Islam, S. Islam, N. Khatun and M. S Hossain, Fabrication and Characterization of Graphene-Barium Titanate-Graphene layered capacitors by spin coating at low processing temperatures (2019) <https://arxiv.org/pdf/2306.10400>

[28] Hanlin Yua, N.A. Liedienova, I.V. Zatovskyc, D.S. Butenkod, I.V. Fesychnf, Wei Xug, Songchun Ruih, Qunjun Lia, Bingbing Liua, A.V. Pashchenkoa, G.G. Levchenkoa, The multifunctionality of lanthanum-strontium cobaltite nanopowder: high-pressure magnetic and excellent electrocatalytic properties for OER (2024) <https://arxiv.org/pdf/2303.17148>