НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
І ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА «ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ
МАШИНОБУДУВАННЯ» ІМ. М. Ф. СЕМКА

Пупань Л. І.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОГО ЗАВДАННЯ «ПОСТПРОЦЕС ІНФІЛЬТРАЦІЇ ТА ЙОГО ПАРАМЕТРИ»

З ДИСЦИПЛІНИ «ПОСТПРОЦЕСИ ІНТЕГРОВАНИХ ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ»

Харків

1. МЕТА РОБОТИ

Призначити оптимальний варіант інфільтрату для заданого матеріалу виробу, отриманого адитивним селективним лазерним спіканням вихідного порошкового середовища та розрахувати параметри постпроцесу інфільтрації

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Інфільтрація – це процес заповнення пор порошкової формовки розплавленим металом або сплавом.

Технологія застосовується для виробів, отриманих спіканням металевих (у тому числі, плакованих), неметалічних порошків, композиційних складів.

Процес інфільтрації базується на проникненні речовин-інфільтратів, що мають нижчу температуру плавлення порівняно з основним матеріалом, у пори виробу за рахунок капілярного ефекту, що істотно підвищує щільність кінцевого виробу.

Для підвищення ефективності інфільтрації у порошок тугоплавкого компонента перед формуванням додають невелику кількість (2,5…5,0 %) порошку інфільтрату або будь-якого іншого легкоплавкого компонента. Температура інфільтрації повинна бути на 100…150 °С вищою за температуру плавлення легкоплавкого компонента.

Технологічний процес ***інфільтрації*** широко використовується як метод постобробки виробів адитивного виробництва, зокрема в методі селективного лазерного спікання (сплавлення) для зменшення технологічної пористості отримуваних виробів і підвищення їх функціональності.

Особливості реалізації процесу інфільтрації в процесах адитивних технологій (наприклад, *SLS*, *SLM*) багато в чому аналогічні подібній операції, що традиційно застосовується в технології порошкової металургії для зменшення пористості виробів.

Теорія процесу інфільтрації аналогічна до рідкофазного спікання – спікання порошкового тіла при температурі, що забезпечує утворення рідкої фази.

Термодинамічною умовою ефективного рідкофазного спікання є прагненням багатокомпонентної системи до мінімуму вільної поверхневої енергії та хімічного потенціалу, як і при твердофазному спіканні. Але на відміну від твердофазного спікання при рідкофазному процесі через більшу рухливість системи «рідке-тверде» наочно проявляється дія основних рушійних сил об'ємного ущільнення порошкового тіла – сил капілярного стягування.

У присутності рідкої фази за певних умов полегшується розвиток сил зчеплення між окремими частинками порошку і може сформуватися малопориста ($П$ < 1 %) структура. При рідкофазному спіканні в порошковому тілі виникає свого роду *капілярна система* (розміри частинок порошку можна порівняти з поперечними розмірами порових каналів), що складається з твердої, рідкої та газоподібної фаз.

Для характеристики процесу рідкофазного спікання вводять поняття змочування і кута змочування.

Змочування – явище взаємодії рідини з твердим тілом. Мірою змочування є кут між твердою поверхнею і поверхнею рідини у точці дотику – *крайовий кут змочування* θ, рис. 2.1. Він може коливатися від 0° до 180°. Коли цей кут менший за 90°, то кажуть, що рідина *змочує поверхню*, і навпаки, якщо кут більший за 90°, то поверхня називається *незмочуваною*.

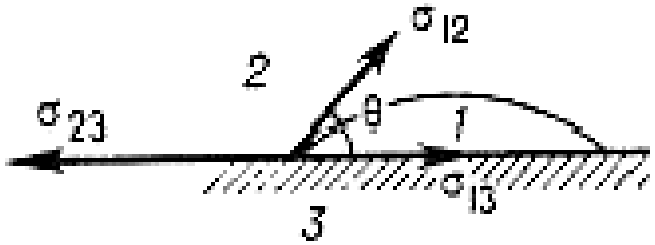

Рисунок 2.1 – Розтікання краплі рідини по частково змочуваній нею твердій поверхні:

1 – крапля рідини; *2* – повітря або насичена пара рідини; *3* – тверда поверхня;
Θ – кут змочування; σ_{12} , σ_{23}, σ_{13} - поверхневі енергії на межах розділу відповідно рідина-газ, тверда поверхня-газ, тверда поверхня-рідина

Молекули рідини на поверхні контакту зазнають впливу сил адгезії (притягання до твердої фази) і когезії (притягання до рідини). Чим більші сили адгезії порівняно з силами когезії, тим сильніше змочується поверхня.

Сили адгезії залежать від складу поверхні. Адгезія значною мірою залежить від рельєфу поверхні – пористості або текстури.

Поверхневі явища на межі рідини і твердого тіла, що стикаються між собою, викликані, головним чином, дією сил поверхневого натягу, називаються *капілярними*.

Поверхнева енергія — це надлишкова енергія поверхневого шару на межі двох фаз, зумовлена різницею міжмолекулярних взаємодій в цих фазах. Поверхневі атоми твердого тіла або рідини взаємодіють з меншою кількістю сусідів, ніж аналогічні атоми всередині.

Наприклад, у кристалі поверхневі атоми утворюють меншу кількість хімічних зв'язків. Тому ці атоми мають вищу енергію, ніж середня енергія атомів в об'ємі. При збільшенні кількості поверхневих атомів енергія тіла зростає. Якщо атоми мають достатню рухливість, як, наприклад, у рідині, то вони переміщатимуться таким чином, щоб потрапити в об'єм. При цьому форма, яку займає рідина, змінюватиметься, мінімізуючи площу поверхні.

На межі між рідиною та твердим тілом енергія поверхневих атомів рідини може зростати, якщо вони сильніше притягатимуться до атомів твердого тіла, ніж до інших атомів рідини. У такому разі говорять, що тверде тіло змочується рідиною. У разі змочування рідина намагатиметься максимізувати поверхню контакту з твердим тілом – крапля розпливатиметься.

При інфільтрації капілярні сили утворюють тиск на розплав інфільтрату:

$$\Delta P = \frac{4\sigma_{\text{р}} \cos\theta}{r_{\text{п}}}, \qquad (2.1)$$

де $\sigma_{\text{р}}$ – поверхнева енергія розплаву; θ – кут змочування; $r_{\text{п}}$ – радіус порових каналів (радіуси пор, по яких в основному здійснюється інфільтрація, знаходяться в межах 3÷30 мкм). При інших рівних умовах тиск збільшується зі зменшенням θ.

Внаслідок заповнення пор розплавом вільна енергія системи має зменшуватися. Термодинамічні умови інфільтрації можна виразити так:

$$\sigma_{\text{р}} \cos\theta > 0. \qquad (2.2)$$

Оскільки $\sigma_р > 0$, основною умовою здійснення інфільтрації є $\theta < 90$ °. При $\theta > 90$ ° інфільтрація не реалізується. Наприклад, пористе тіло з оксиду алюмінію неможливо просочити такими рідкими металами, як мідь, нікель або залізо.

Спікання у присутності рідкої фази відбувається під час спікання матеріалів таких систем, як залізо – мідь, залізо – фосфор, молібден – мідь, вольфрам – мідь, МеС – Ме, молібден–срібло, вольфрам– срібло та багато інших. Тобто, наприклад, мідь може бути інфільтратом заліза, молібдену, вольфраму, срібло – інфільтратом молібдену, вольфраму і т. д.

Ущільнення порошкового тіла при інфільтрації та його основні параметри також подібні до спікання в присутності рідкої фази.

Швидкість інфільтрації становить ~0,1÷1 мм/с.

Висота (товщина) інфільтрованого шару h залежить від властивостей розплаву та тривалості його контакту з твердим каркасом:

$$h = \frac{1}{\pi}\left(\frac{\sigma_р \cos\theta\, r_п\, r_п^2 \tau}{\eta_р}\right)^{0,5}, \qquad (2.3)$$

де $\sigma_р$ – поверхнева енергія розплаву; θ – крайовий кут змочування; $r_п$ – радіус порових каналів; τ – тривалість інфільтрації; $\eta_р$ – в'язкість розплаву.

Тривалість інфільтрації τ порошкової заготовки можна визначити за формулою:

$$\tau = \frac{4\eta_р h^2}{(r_п\, \sigma_р \cos\theta \pm g\, V\, \rho_р\, r_п^2)S}, \qquad (2.4)$$

де $\eta_р$ – в'язкість розплаву; h – висота (товщина) інфільтрованого шару; $r_п$ – радіус порових каналів; $\sigma_р$ – поверхнева енергія розплаву; θ –крайовий кут змочування; g – прискорення вільного падіння; V – початковий об'єм пор у формовці; $\rho_р$ – густина розплаву; S – площа перерізу формовки.

Найбільш важливими параметрами, що визначають ефективність процесу інфільтрації для зменшення пористості, підвищення щільності та міцності виробів, є співвідношення температур плавлення основного матеріалу та інфільтрату, поверхнева енергія та в'язкість розплаву, кут змочування, час інфільтрації тощо.

Інфільтрацію як постпроцес адитивного виробництва здійснюють методами накладання або занурення.

У методі накладання пористий каркас з порошку тугоплавкого компонента разом з необхідною кількістю твердої легкоплавкої речовини, використовуваної як інфільтрат, поміщають у нагрівальний пристрій із захисною атмосферою (або вакуумом) і нагрівають до необхідної температури (на 100÷150 °С вищою за температуру плавлення інфільтрату). Об'єм легкоплавкого компонента розраховують виходячи з об'єму пор каркаса. Розплав, що утворюється, за рахунок капілярного ефекту, вбирається порами каркаса.

За способом занурення пористий каркас опускають у попередньо розплавлений легкоплавкий матеріал інфільтрату. Після інфільтрації отримуваний композиційний матеріал практично не містить пор і легко піддається подальшій обробці. Для сплавів на основі заліза як інфільтрат рекомендується мідь з добавками нікелю, марганцю, алюмінію, вуглецю, цинку.

У SLS-технології пористість є одним із суттєвих недоліків процесу, що негативно впливає на фізико-механічні властивості виробів. Наявність пористості обумовлена головним чином особливостями реалізації процесу селективного лазерного спікання порошкових середовищ. Зокрема, перегрупування твердих частинок обмежене тривалістю впливу лазера та часом існування рідкої фази. Як наслідок, вироби, отримані *SLS*, мають комірчасту структуру (пористість може бути більше 20 %) та знижені механічні властивості.

Зниження пористості може бути досягнуто зменшенням зернистості порошкового матеріалу, навіть до нанодіапазону (1÷100 нм), проте у більшості випадків ***SLS-вироби піддаються інфільтрації, яка є найважливішим етапом постобробки виробів, одержуваних пошаровим вирощуванням з вихідних дисперсних середовищ***.

Як інфільтрати виробів з металевих матеріалів, отримуваних лазерним селективним спіканням, застосовують сплави на основі заліза, нікелю, міді, титану, кобальту і т. д. Вибір інфільтруючого матеріалу здійснюється на основі принципів, викладених вище.

Матеріал для просочення повинен характеризуватись повною відсутністю або незначною міжфазною взаємодією з основним матеріалом виробу, малим крайовим кутом змочування та мати температуру плавлення нижче за матеріал основи. Якщо компоненти взаємодіють між собою, то в процесі інфільтрації може відбуватися утворення тугоплавких сполук або

твердих розчинів, що негативно впливає на властивості та точність розмірів виробу.

Наприклад, для просочення металевого каркасу виробів із сталі, отримуваних селективним лазерним спіканням, які широко застосовують у різних сферах, використовують мідь ($T_{пл}$ = 1083 °C) або бронзу ($T_{пл}$ = 930÷1140 °C). Для інфільтрації нікель-бронзового сплаву, який також має різні галузі застосування, може бути використаний сплав на основі олова Sn60PbAg (Тпл = 189 °C) і т. д.

Етап інфільтрації *SLS* може слідувати безпосередньо за процесом селективного спікання лазерного виробу або після послідовно реалізованих процесів лазерного спікання і видалення сполучної речовини (у разі використання плакованих порошків) (рис. 2.2, 2.3).

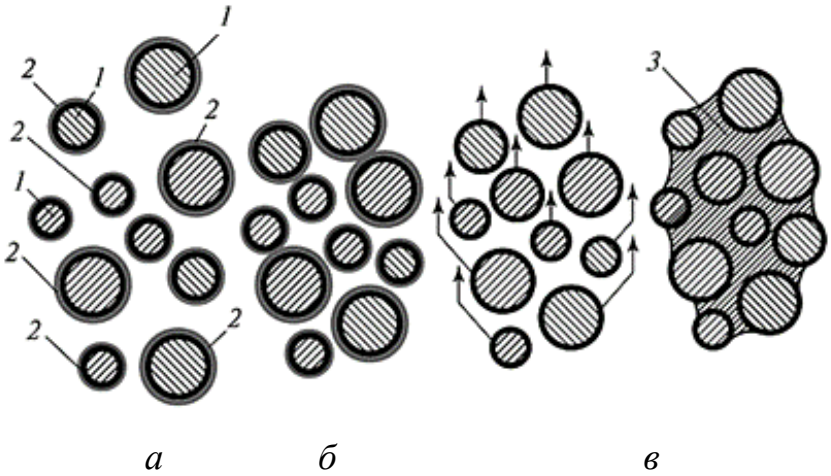

Рисунок 2.2 – Отримання виробів із композицій сталь-бронза з постпроцесом інфільтрації:

а – формування шару; *б* – пошаровий синтез; в – видалення сполучної речовини; *г* – інфільтрація;
1 – метал; *2* – сполучна речовина; 3 – інфільтрат

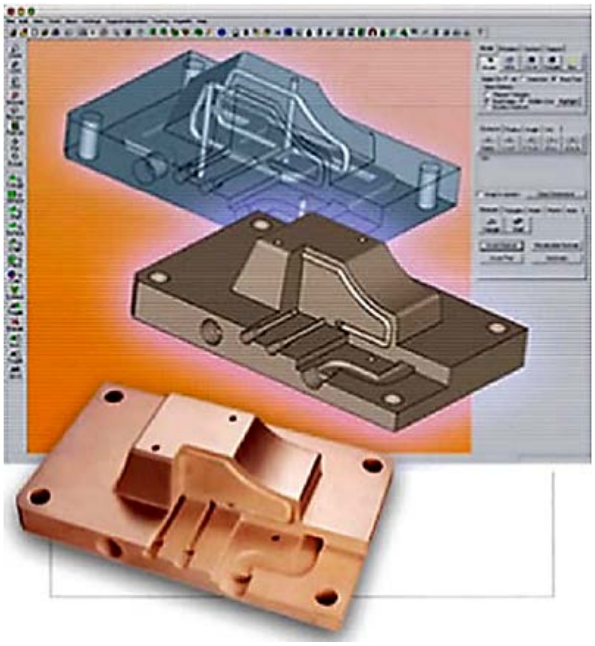

Рисунок 2.3 – 3*D* модель та кінцевий виріб оснасткового елемента для лиття під тиском із внутрішніми каналами охолодження після інфільтрації бронзою

Зазвичай інфільтрацію металевих виробів, отриманих *SLS*, реалізують шляхом накладання. Наприклад, при інфільтрації бронзою виробів, отриманих із сталевого або нікелевого порошку, по периферії виробів встик розміщують живильники, на яких встановлюють бронзові бруски. У печі бронза розплавляється і через живильник за рахунок капілярного ефекту проникає у тіло виробу.

Матеріал кінцевого виробу є конгломератом сталі (або нікелевого сплаву) і бронзи (60 % і 40 % відповідно). Зазвичай просочення виробів проводять у засипці з оксиду алюмінію, яка відіграє роль підтримуючого каркаса. Захист від окислення здійснюється за рахунок створення в печі інертного або відновного середовища.

У результаті інфільтрації спечених *SLS*-об’єктів отримують кінцеві композитні деталі, що складаються з матричного сплаву та інфільтрату, мають значно меншу пористість (до 1÷2 %), досить високі показники якості поверхні – наприклад, шорсткості (R_a = 5÷10 мкм).

Глибина інфільтрації для різних варіантів складів основний матеріал-інфільтрат становить близько кількох міліметрів (рис. 2.4), що достатньо для практичного застосування виробів.

Отримані вироби можуть бути піддані механічній обробці (фрезерування, свердління, шліфування, полірування), електроерозійній

обробці, нанесенню покриття. При цьому обмеження на складність геометрії деталі практично відсутні.

Як правило, подібну технологію використовують для швидкого виготовлення оснастки для лиття пластмас (прес-форми витримують до 200÷500 тис. циклів), а також для серійного виробництва деталей, що працюють в умовах тертя – зубчастих передач, валів, втулок тощо.

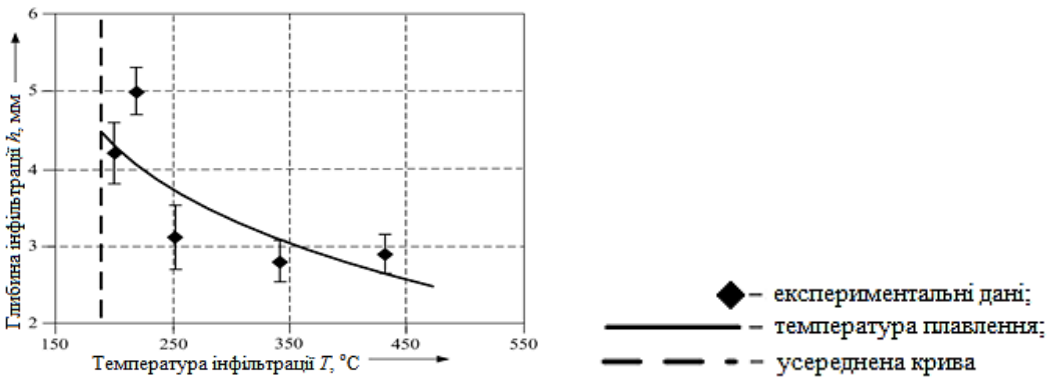

Рисунок 2.4 – Залежність глибини інфільтрації нікелевого сплаву бронзою від температури процесу: $h = 4{,}44(\frac{T}{200})^{-0{,}63}$

3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

1. За табл. 3.1 вибрати вихідний матеріал. Вказати його властивості (механічні характеристики, температуру плавлення $T_{пл}$) та можливі галузі використання.

2. За табл. 3.2 призначити оптимальний варіант інфільтрату (та середовища інфільтрації) для матеріалу, отриманого адитивним селективним лазерним спіканням вихідного порошкового середовища. Вказати його температуру плавлення $T_{пл}$. Пояснити зроблений вибір.

3. Для вибраного вихідного порошкового матеріалу та матеріалу інфільтрату розрахувати такі параметри процесу інфільтрації:

- тиск на розплав інфільтрату ΔP, Па;
- висоту (товщину) інфільтрованого шару h, мм;
- відносне зменшення об'єму пор після інфільтрації $\triangle П = \frac{П_{сп} - П_{інф}}{П_{сп}}$

Необхідні для розрахунку дані наведено в табл. 3.3, 3.4.

Таблиця 3.1 – Вихідний матеріал

№ варіанта	Вихідний матеріал
1	сталь 12Х18Н9Т
2	TiC
3	(Ti, Ta, W)C
4	Al_2O_3
5	нікелева бронза БрАЖН10-4-4
6	сталь 08Х17Т
7	сталь 12Х18Н9Т
8	Al_2O_3
9	(Ti, Ta, W)C
10	TiC

Таблиця 3.2 – Крайові кути змочування вихідного матеріалу деякими металами або сплавами

Матеріал вихідного порошкового середовища	Крайовий кут змочування θ, °для різних розплавів					
TiC	Fe		Ni		Co	
	водень	вакуум	водень	вакуум	водень	вакуум
	46	41	37	5	17	30
(Ti, Ta, W)C	Fe		Ni		Co	
	водень	вакуум	водень	вакуум	водень	вакуум
	33	30	28	12	18	25
Al_2O_3	Cu	Pb	Co	Al		
	155	132	125	48		
сталь 08Х17Т	Cu		Ni		Co	
	95		45		37	
сталь 12Х18Н9Т	Cu		Ni		Co	
	28		47		44	
нікелева бронза БрАЖН10-4-4	Sn		Al		Co	
	18		27		49	

Таблиця 3.3 – Вихідні дані для розрахунку параметрів інфільтрації

Матеріал інфіль-трату	Температура плавлення інфільтрату $T_{пл}$,ºС	Поверхнева енергія розплаву інфільтрату $\sigma_{р.}$ мДж/м^2	Радіус порових каналів спеченої заготовки $r_п$, мкм	Тривалість інфільтрації τ, хв	В'язкість розплаву $\eta_р \cdot 10^{-3}$, Па·с
Fe	1539	1860	15	25	7,0
Ni	1455	1240	5	45	5,0
Al	660	914	12	23	3,8
Cu	1083	1350	22	18	3,6
Co	1494	1900	9	38	2,8
Pb	327	980	30	15	2,6

Таблиця 3.4 – Пористість виробу після адитивної технології пошарового лазерного спікання та після інфільтрації

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пористість заготовки, отриманої адитивною технологією лазерного спікання $П_{сп}$, %	25	29	32	30	28	25	36	34	32	22
Пористість виробу після інфільтрації $П_{інф}$, %	2,7	4,3	2,5	2,1	1,9	1,8	3,0	3,2	1,5	1,4

Контрольні питання

1. Поняття інфільтрації, її сутність та призначення в адитивному виробництві.
2. Особливості реалізації процесу інфільтрації як постпроцесу адитивних технологій.
3. Що розуміють під змочуванням? Як визначається крайовий кут змочування?
4. Які основні умови здійснення інфільтрації?
5. Основи вибору інфільтрату.
6. Які інфільтрати використовують в адитивному виробництві для зменшення пористості виробів із сталі та кольорових металів і сплавів?
7. Якими методами здійснюється інфільтрація в адитивних технологіях?
8. Які значення має швидкість інфільтрації?
9. Від яких параметрів залежить висота (товщина) інфільтрованого шару h?
10. Від яких параметрів залежить тривалість інфільтрації порошкової заготовки τ?

ЗМІСТ ЗВІТУ

Титульний аркуш

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
І ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА «ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ
МАШИНОБУДУВАННЯ» ІМ. М. Ф. СЕМКА

РОЗРАХУНКОВЕ ЗАВДАННЯ
«Постпроцес інфільтрації та його параметри»
з дисципліни
«Постпроцеси інтегрованих генеративних технологій»

Виконав: студент групи _____
(індекс групи)

_____
(ПІБ)

Перевірив _____

Дата _____

Харків

1. **Короткі теоретичні відомості**

……
……

2. **Розрахунок основних параметрів постпроцесу інфільтрації**

2.1. Вихідний матеріал та його властивості……
……...
……...

2.2. Вибір оптимального варіанту інфільтрату та пояснення щодо зробленого вибору……..
……..

2.3. Вихідні дані до розрахунку параметрів інфільтрації……..
……..
……..

2.4. Розрахунок тиску на розплав інфільтрату ΔP, висоти (товщини) інфільтрованого шару h, відносного зменшення об'єму пор після інфільтрації △П……...
……..…
……...

Висновки……