



ПОСТОБРОБЛЕННЯ 3D-ДРУКОВАНИХ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>131 Прикладна механіка</i>
Освітня програма	<i>Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>3 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити ECTS (120 год.), лекції – 54 год., лабораторні – 9 год., практичні – 9 год., СРС – 48 год.</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік, МКР, РГР</i>
Розклад занять	http://rozklad.kpi.ua/
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н., доцент, Лесик Дмитро Анатолійович, lesyk_d@ukr.net ; +38(096)207-79-77 – WhatsApp та Viber Практичні: к.т.н., доцент, Лесик Дмитро Анатолійович, lesyk_d@ukr.net ; +38(096)207-79-77 – WhatsApp та Viber Лабораторні: к.т.н., доцент, Лесик Дмитро Анатолійович, lesyk_d@ukr.net ; +38(096)207-79-77 – WhatsApp та Viber
Розміщення курсу	https://classroom.google.com/c/NjAxNDI1OTMwMzQ1?cjc=iihwhy

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Навчальна дисципліна "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів" (ПЗДМВ) відноситься до групи вибірових освітніх компонентів освітньо-професійної програми (ОПП) першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за галуззю знань 13 «Механічна інженерія», яка призначена для підготовки майбутніх фахівців, здатних здійснювати науково-інноваційну та/або технологічно-конструкторську діяльність і розв'язувати складні спеціалізовані задачі і практичні проблеми в області медицини (протезування), авіабудування, ракетобудування, автомобільного та енергетичного машинобудування шляхом застосування цифрових адитивних технологій. Основний нахил даної навчальної дисципліни включає вивчення особливостей постоброблення 3D-друкованих металевих/композитних деталей, виготовлених передовими адитивними технологіями, зокрема методами пошарового сплавлення порошку (PBF), спрямованого осадження енергії (DED) і струминного нанесення сполучного (BJ).

Критичний аналіз методів термічного, механічного (хімічного) та комбінованого/гібридного постоброблення 3D-друкованих виробів для формування сприятливих властивостей, виходячи із методу 3D-друку, а також області застосування деталей та типу матеріалу. Постоброблення металевих виробів або запасних деталей, виготовлених інноваційними адитивними технологіями, є актуальним та має важливе практичне значення оскільки низька якість поверхні, поверхневі і структурні дефекти, а також наявність залишкових напружень в 3D-друкованих деталях ведуть до обмеження/затримання застосування певних адитивних технологій для високотехнологічного виробництва. Як результат, потрібне більш фундаментальне розуміння впливу властивостей 3D-друкованих металевих виробів на постоброблення щоб підвищити експлуатаційні показники та забезпечити цілісність поверхні.

Вибіркова навчальна дисципліна належить до переліку дисциплін циклу професійної ОПП підготовки першого (бакалаврського) рівня вищої освіти «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» на 2025/2026 навчальний рік за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Метою викладання навчальної дисципліни є надання студентам можливість оволодіння інноваційними підходами та методами для постоброблення 3D-друкованих металевих/композитних виробів, виготовлених передовими технологіями адитивного виробництва, для того щоб підвищити експлуатаційні показники та забезпечити цілісність поверхні.

Предметом дисципліни є вивчення впливу термічного об'ємного оброблення, механічного (хімічного) та передових методів поверхневого оброблення висококонцентрованими джерелами енергії на зміну властивостей 3D-друкованих металевих виробів, визначивши критерії для досягнення якості та ефективності використаного процесу. Також оволодіння останніми досягненнями в області комбінованого/гібридного виготовлення й постоброблення 3D-друкованих металевих/композитних деталей, включаючи аерокосмічного та медичного призначення.

Вивчення навчальної дисципліни «Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів» передбачає формування та розвиток у здобувачів ступеня бакалавр компетентностей, передбачених освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» за спеціальністю 131 – Прикладна механіка, яка розроблена з урахуванням освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти КПІ ім. Ігоря Сікорського (наказ КПІ ім. Ігоря Сікорського від 10.06.2024 р. № НОД/434/2024), а саме:

Загальні компетентності (ЗК):

- ЗК 1: Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу;
- ЗК 2: Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності;
- ЗК 4: Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- ЗК 7: Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями;
- ЗК 9: Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

Фахові компетентності (ФК):

- ФК 1: Здатність аналізу матеріалів, конструкцій та процесів на основі законів, теорій та методів математики, природничих наук і прикладної механіки;
- ФК 2: Здатність робити оцінки параметрів працездатності матеріалів, конструкцій і машин в експлуатаційних умовах та знаходити відповідні рішення для забезпечення заданого рівня надійності конструкцій і процесів, в тому числі і за наявності деякої невизначеності;

ФК 3: Здатність проводити технологічну і техніко-економічну оцінку ефективності використання нових технологій і технічних засобів;

ФК 16: Здатність обирати оптимальні та розробляти нові технології та обладнання для лазерних та фізико-технічних процесів з метою підвищення продуктивності та контрольованості цих процесів.

Результати навчання навчальної дисципліни деталізують такі **програмні результати навчання (РН)**, передбачені освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»:

РН 7: Застосовувати нормативні та довідкові дані для контролю відповідності технічної документації, виробів і технологій стандартам, технічним умовам та іншим нормативним документам;

РН 12: Навички практичного використання комп'ютеризованих систем проектування (CAD), підготовки виробництва (CAM) та інженерних досліджень (CAE);

РН 24: Розробляти технологічні процеси та операції лазерних та фізико-технічних технологій з використанням їх переваг та особливостей;

РН 25: Розраховувати режими електроіскрової, дугової, плазмової, електронно-променевої та лазерної обробки і визначати оптимальні технологічні, енергетичні, оптичні та газодинамічні параметри лазерних та фізико-технічних процесів.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів" (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Для успішного засвоєння матеріалу навчальної дисципліни необхідні знання, які одержуються студентом у попередніх курсах: «Технологія конструкційних матеріалів», «Матеріалознавство, «Інженерна та комп'ютерна графіка».

Знання, отримані при вивченні даної дисципліни використовуються студентами під час підготовки бакалаврських дипломних проєктів.

3. Зміст навчальної дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів"

Вступ.

Розділ 1. Адитивне виробництво металевих виробів

Тема 1.1. Особливості адитивного виробництва

Тема 1.2. Технології адитивного виробництва металевих виробів: PBF, DED, BJ

Тема 1.3. Основні матеріали та програми для 3D-друку

Тема 1.4. Області застосування адитивних технологій

Тема 1.5. Поверхневі та об'ємні дефекти в 3D-друкованих виробах

Розділ 2. Методи постоброблення 3D-друкованих металевих виробів

Тема 2.1. Критерії визначення ефективного методу в якості постоброблення 3D-друкованих металевих/композитних виробів

Тема 2.2. Гаряче ізостатичне пресування (HIP) в якості постоброблення

Тема 2.3. Особливості термічного об'ємного постоброблення 3D-друкованих виробів

Тема 2.4. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів

Тема 2.5. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів лазерними технологіями

Тема 2.6. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів ультразвуковими технологіями

Тема 2.7. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів методами поверхнєво пластичного деформування (ППД)

Тема 2.8. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів фінішними методами (магнітне полірування, електрохімічне полірування і т.д.)

Розділ 3. Комбіновані процеси в адитивному виробництві

Тема 3.1. Комбіновані термомеханічні методи постоброблення

Тема 3.2. Комбіновані термохімічні методи постоброблення

Тема 3.3. Комбіновані поверхнєві методи постоброблення

Тема 3.4. Останні розробки та перспективні лазерні комбіновані технології поверхнєвого постоброблення

Розділ 4. Гібридні процеси в адитивному виробництві

Тема 4.1. Переваги та проблеми гібридного виробництва

Тема 4.2. Останні розробки та майбутні перспективи

Тема 4.3. Адитивне/субтрактивне гібридне виробництво металевих деталей методом DED

Тема 4.4. Поєднання ультразвукового впливу з технологіями 3D-друку методом PBF та DED

Тема 4.5. Інтенсифікація 3D-друку металевих виробів за допомогою впливу магнітного поля

Тема 4.6. Гібридний процес: DED та дробоструминне оброблення

Розділ 5. Постоброблення металевих виробів аерокосмічного призначення

Тема 5.1. Виклики та перспективи впровадження технологій 3D-друку

Тема 5.2. Можливості технологій PBF-друку для виготовлення легких та міцних деталей аерокосмічного призначення

Тема 5.3. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі титану

Тема 5.4. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі алюмінію

Тема 5.5. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі нікелю

Розділ 6. Постоброблення металевих виробів медичного призначення

Тема 6.1. Виготовлення медичних імплантів методом лазерного пошарового сплавлення порошку (LPBF)

Тема 6.2. Програми для створення 3D-моделей медичного призначення

Тема 6.3. Особливості LPBF-принтерів для виготовлення дрібнорозмірних деталей

Тема 6.4. Комбіноване постоброблення дентальних імплантів

Тема 6.5. Особливості постоброблення виробів складної форми (стентів) виготовлених технологією LPBF

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 105 с.
2. *Innovations in additive manufacturing* / M. Adam Khan, J. T. Winowlin Jappes. – Springer Tracts in Additive Manufacturing, 2022. – p. 332. – (eBook): <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6>

Додаткова література

3. *Post-processing of additively manufactured metallic alloys – A review* / A. Malakizadi, D. Mallipeddi, S. Dadbakhsh, R. M'Saoubi, P. Krajnik. – *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 179 – 2022. – 103908: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103908>
4. *A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process* / M. L. Dezaki, A. Serjouei, A. Zolfagharian, M. Fotouhi, M. Moradi, M.K.A. Ariffin, M. Bodaghi. – *Advanced Powder Materials*, Volume 1 – 2022. – 100054: <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054>
5. *Polishing of additive manufactured metallic components: retrospect on existing methods and future prospects* / J. Boban, A. Ahmed, E.K. Jithinraj, M. Azizur Rahman, M. Rahman. – *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 121 – 2022. – pp. 83–125: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09382-y>
6. *Comparison of effects of shot and ultrasonic peening treatments on surface properties of L-PBF-manufactured superalloy subjected to HIP combined with heat treatments* / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk, O.O. Pedash, V.V. Dzhemelinskyi, A. Lamikiz. – *Post-Processing Techniques for Additive Manufacturing*. Taylor & Francis. – 2023: <https://doi.org/10.1201/9781003288619-9>

Інформаційні ресурси

7. <http://ltft.kpi.ua/ua/> (сайт кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій – ЛТФТ)
8. <https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&filter=&ssm=cathedral> (сайт кампусу КПІ ім. Ігоря Сікорського: Методичне забезпечення)

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів"

Навчальний матеріал навчальної дисципліни викладається на заняттях згідно зі наступною структурою (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Структура викладання навчальної дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів"

Назви розділів та тем	Кількість годин				
	Всього	У тому числі			
		Лекції	Практ. заняття	Лабор. роботи	СРС
1	2	3	4	5	6
Вступ					
Огляд змісту навчальної дисципліни, його структури, призначення, навчальна база та місце в системі підготовки фахівця	0,5	0,5	-	-	-

Назви розділів та тем	Кількість годин				
	Всього	У тому числі			
		Лекції	Практ. заняття	Лабор. роботи	СРС
1	2	3	4	5	6
Розділ 1. Адитивне виробництво металевих виробів					
Тема 1.1. Особливості адитивного виробництва	2,0	1,0	-	-	1,0
Тема 1.2. Технології адитивного виробництва металевих виробів: PBF, DED, BJ	3,0	2,0	-	-	1,0
Тема 1.3. Основні матеріали та програми для 3D-друку	3,0	2,0	-	-	1,0
Тема 1.4. Області застосування адитивних технологій	3,0	2,0	-	-	1,0
Тема 1.5. Поверхневі та об'ємні дефекти в 3D-друкованих виробах	4,0	2,0	-	-	2,0
Разом за розділом 1	15,0	9,0	-	-	6,0
Розділ 2. Методи постоброблення 3D-друкованих металевих виробів					
Тема 2.1. Критерії визначення ефективного методу в якості постоброблення 3D-друкованих металевих/композитних виробів	1,5	1,5	-	-	-
Тема 2.2. Гаряче ізостатичне пресування (HIP) в якості постоброблення	2,0	1,5	2,0	-	0,5
Тема 2.3. Особливості термічного об'ємного постоброблення 3D-друкованих виробів	3,0	1,5	-	-	1,5
Тема 2.4. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів	3,0	1,5	-	-	1,5
Тема 2.5. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих матеріалів лазерними технологіями	4,0	1,5		2,0	0,5
Тема 2.6. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів ультразвуковими технологіями	4,0	1,5	-	2,0	0,5
Тема 2.7. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів методами поверхнєво пластичного деформування (ППД)	2,5		-	2,0	0,5
Тема 2.8. Поверхнєве постоброблення 3D-друкованих виробів фінішними методами (магнітне полірування, електрохімічне полірування і т.д.)	3,5		1,0	2,0	0,5
Разом за розділом 2	25,5	9,0	3,0	8,0	5,5
Розділ 3. Комбіновані процеси в адитивному виробництві					
Тема 3.1. Комбіновані термомеханічні методи постоброблення	1,5	1,5	-	-	-
Тема 3.2. Комбіновані термохімічні методи постоброблення	1,5	1,5	-	-	-

Назви розділів та тем	Кількість годин				
	Всього	У тому числі			
		Лекції	Практ. заняття	Лабор. роботи	СРС
1	2	3	4	5	6
Тема 3.3. Комбіновані поверхневі методи постоброблення	5,5	1,5	4,0	-	-
Тема 3.4. Останні розробки та перспективні лазерні комбіновані технології поверхневого постоброблення	6,0	4,0	-	-	2,0
Разом за розділом 3	14,5	8,5	4,0	-	2,0
Розділ 4. Гібридні процеси в адитивному виробництві					
Тема 4.1. Переваги та проблеми гібридного виробництва	1,0	1,0	-	-	-
Тема 4.2. Останні розробки та майбутні перспективи	2,0	2,0	-	-	-
Тема 4.3. Адитивне/субтрактивне гібридне виробництво металевих деталей методом DED	2,0	2,0	-	-	-
Тема 4.4. Поєднання ультразвукового впливу з технологіями 3D-друку методом PBF та DED	1,5	1,5	-	-	-
Тема 4.5. Інтенсифікація 3D-друку металевих виробів за допомогою впливу магнітного поля	5,0	1,5	-	-	3,5
Тема 4.6. Гібридний процес: DED та дробоструминне оброблення	2,0	2,0	-	-	-
Разом за розділом 4	13,5	10,0	-	-	3,5
Розділ 5. Постоброблення металевих виробів аерокосмічного призначення					
Тема 5.1. Виклики та перспективи впровадження технологій 3D-друку	2,0	2,0	-	-	-
Тема 5.2. Можливості технологій PBF-друку для виготовлення легких та міцних деталей аерокосмічного призначення	2,0	2,0	-	-	-
Тема 5.3. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі титану	4,0	2,0	-	-	2,0
Тема 5.4. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі алюмінію	4,0	2,0	-	-	2,0
Тема 5.5. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі нікелю	2,0	2,0	-	-	-
Разом за розділом 5	14,0	10,0	-	-	4,0
Розділ 6. Постоброблення металевих виробів медичного призначення					
Тема 6.1. Виготовлення медичних імплантів методом лазерного пошарового сплавлення порошку (LPBF)	1,5	1,5	-	-	-
Тема 6.2. Програми для створення 3D-моделей	1,5	0,5	-	-	1,5

Назви розділів та тем	Кількість годин				
	Всього	У тому числі			
		Лекції	Практ. заняття	Лабор. роботи	СРС
1	2	3	4	5	6
медичного призначення					
Тема 6.3. Особливості LPBF-принтерів для виготовлення дрібнорозмірних деталей	0,5	0,5	-	-	-
Тема 6.4. Комбіноване постоброблення дентальних імплантів	3,5	2,0	-	-	2,5
Тема 6.5. Особливості постоброблення виробів складної форми (стентів) виготовлених технологією LPBF	3,5	0,5	2,0	1,0	-
Разом за розділом 6	12,0	5,0	2,0	1,0	4,0
МКР (Частина 1)	2,0	1,0	-	-	1,0
МКР (Частина 2)	2,0	1,0	-	-	1,0
РГР	15,0				15,0
Залік	6,0				6,0
Всього годин	120	54	9	9	48

Лекційні заняття

Перелік запланованих лекційних занять до дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів" приведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Перелік лекційних занять

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, завдання на СРС з посиланням на літературу)
1	Лекція 1. Вступ. Мета та задачі навчальної дисципліни. Особливості адитивного виробництва. Основні завдання на СРС: Особливості поширення 3D-друку на світовому ринку.
2	Лекція 2. Технології адитивного виробництва металевих виробів: PBF, DED, BJ. Основні матеріали та програми для 3D-друку. Основні завдання на СРС: Які вимоги до збереження порошків для 3D-друку? Виробники 3D-принтерів на основі технології PBF.
3	Лекція 3. Технологія лазерного пошарового сплавлення порошку (LPBF). Програмне забезпечення для контролю процесу LPBF. Завдання на СРС: Оптимізація технології LPBF для виготовлення сплавів на основі алюмінію, титану та нікелю. Які складнощі виникають при використанні не типових матеріалів?
4	Лекція 4. Області застосування адитивних технологій. Поверхневі та об'ємні дефекти в 3D-друкованих виробах. Завдання на СРС: Приклади застосування адитивних технологій у виготовленні штампових

	інструментів та металевих деталей автомобільної/енергетичної промисловості.
5	Лекція 5. Класифікація методів постоброблення 3D-друкованих металевих виробів. Критерії визначення ефективного методу в якості постоброблення 3D-друкованих металевих/композитних виробів. Завдання на СРС: Порівняння адитивного та традиційного процесу для отримання готового продукту/виробу.
6	Лекція 6. Гаряче ізостатичне пресування (HIP) в якості постоброблення. Завдання на СРС: Оцінка процесу HIP з точки зору енергоефективності та продуктивності.
7	Лекція 7. Особливості термічного об'ємного постоброблення 3D-друкованих виробів. Завдання на СРС: Вивчення режимів та умов термічного об'ємного постоброблення сплавів на основі титану та алюмінію?
8	Лекція 8. Поверхневе постоброблення 3D-друкованих виробів. Вивчення текстури поверхні та структуроутворення в 3D-друкованих виробах, включаючи вплив просторової орієнтації виготовлення на платформі в 3D-принтері. Завдання на СРС: Складові фізико-механічних властивостей поверхневого шару.
9	Лекція 9. Поверхневе постоброблення 3D-друкованих виробів лазерними технологіями: Лазерне поверхневе зміцнення/модифікування, лазерне полірування/текстурування. Завдання на СРС: Проаналізувати можливості лазерних установок імпульсної дії для постоброблення 3D-друкованих виробів медичного призначення після попереднього механічного оброблення.
10	Лекція 10. Поверхневе постоброблення 3D-друкованих виробів ультразвуковими технологіями: Ультразвукове ударне зміцнення та оздоблювання, ультразвукове вигладжування, та інш. Завдання на СРС: Які складнощі виникають при використанні не типових матеріалів?
11	Лекція 11. Поверхневе постоброблення 3D-друкованих виробів методами поверхнево пластичного деформування (ППД): Дробоструминне зміцнення, кавітаційне зміцнення, піскоструминне оздоблювання/очищення. Завдання на СРС: Оцінка напруженого стану в LPBF-друкованих металевих/композитних виробах.
12	Лекція 12. Поверхневе постоброблення 3D-друкованих виробів фінішними методами (магнітне полірування, електрохімічне полірування і т.д.). Завдання на СРС: Проаналізувати «зелені» технології для поверхневого полірування 3D-друкованих виробів.
13	Модульна контрольна робота (МКР) – Частина 1 Лекція 13. Комбіновані термомеханічні методи постоброблення. Завдання на СРС: Визначити обмеження в методах інтенсивного поверхнево-пластичного деформування LPBF-друкованих виробів на основі нікелю, виходячи із оброблюваної геометрії.
14	Лекція 14. Комбіновані термохімічні методи постоброблення. Завдання на СРС: Огляд хімічних моно-технологій, які було використано для постоброблення 3D-друкованих металевих виробів.
15	Лекція 15. Комбіновані поверхневі методи постоброблення.

	Завдання на СРС: Визначити перспективні схеми комбінованого постоброблення для підвищення надійності та міцності 3D-друкованих металевих виробів.
16	Лекція 16. Останні розробки та перспективні лазерні комбіновані технології поверхневого постоброблення. Завдання на СРС: Огляд раціональних схем/технологій постоброблення для досягнення як поліпшення якості поверхні, так й підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару.
17	Лекція 17. Гібридні процеси в адитивному виробництві. Переваги та проблеми гібридного виробництва. Останні розробки та майбутні перспективи. Завдання на СРС: Дослідження корозійної стійкості 3D-друкованих сплавів на основі нікелю шляхом гібридного процесу.
18	Лекція 18. Адитивне/субтрактивне гібридне виробництво металевих деталей методом DED. Завдання на СРС: Порівняння структуроутворення після гібридного 3D-виробництва в порівнянні із звичайним.
19	Лекція 19. Поєднання ультразвукового впливу з технологіями 3D-друку методом PBF та DED. Завдання на СРС: Порівняння ефектів в застосуванні ультразвукових технологій у вигляді комбінованої та гібридної схеми постоброблення.
20	Лекція 20. Гібридний процес: DED та дробоструминне оброблення. Завдання на СРС: Виклики застосування технології DED для виготовлення виробів складної форми.
21	Модульна контрольна робота (МКР) – Частина 2 Лекція 21. Можливості технологій 3D-друку для виготовлення легких та міцних деталей аерокосмічного призначення. Виклики та перспективи впровадження технологій 3D-друку. Завдання на СРС: Аналіз впроваджень технології LPBF в аерокосмічній промисловості.
22	Лекція 22. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі титану. Завдання на СРС: Порівняння механічних властивостей у LPBF-друкованих зразках на основі титану, отриманих різними 3D-принтерами.
23	Лекція 23. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі алюмінію. Завдання на СРС: Порівняння механічних властивостей у LPBF-друкованих зразках на основі алюмінію, отриманих різними 3D-принтерами.
24	Лекція 24. Особливості постоброблення 3D-друкованих виробів на основі нікелю. Завдання на СРС: Порівняння механічних властивостей у LPBF-друкованих зразках на основі нікелю, отриманих різними 3D-принтерами.
25	Лекція 25. Виготовлення медичних імплантів методом LPBF. Програми для створення 3D-моделей медичного призначення. Особливості LPBF-принтерів для виготовлення дрібнорозмірних деталей. Завдання на СРС: Аналіз стратегій сканування лазерного променя та технологічних режимів LPBF для виготовлення медичних імплантів.
26	Лекція 26. Комбіноване постоброблення дентальних імплантів. Особливості постоброблення виробів складної форми (стентів) виготовлених технологією LPBF.

	Завдання на СРС: Порівняння механічних властивостей у LPBF-друкованих зразках на основі кобальту, отриманих різними 3D-принтерами. Порівняння механічних властивостей у LPBF-друкованих зразках з нітинолу, отриманих різними 3D-принтерами.
27	Залік

Практичні заняття

Основними завданнями циклу практичних занять є закріплення теоретичних положень. Цикл практичних занять має ціллю закріплення головних тем навчальної дисципліни, які засвоєно теоретично. В зв'язку з тим, що головним його завданням є надання знань і умінь вибору якісного порошку в якості вихідного матеріалу та позиціювання розробленої 3D моделі на робочій платформі, а також ефективної стратегії лазерного пошарового сплавлення порошкового матеріалу та постоброблення. Перелік запланованих практичних занять до дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів" приведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Перелік практичних занять

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань	Кількість годин
1	Практичне заняття 1. Визначення дефектів в LPBF-друкованих металевих виробах після гарячого ізостатичного пресування	2,0
2	Практичне заняття 2. Визначення поверхневих дефектів у виробах медичного призначення, виготовлених методом LPBF	1,0
3	Практичне заняття 3. Оцінку ефективності ультразвукового поверхневого оброблення в якості фінішного інструменту для постоброблення LPBF-друкованих виробів, підданих термічному обробленню	2,0
4	Практичне заняття 4. Розробка комбінованого технологічного процесу для термомеханічного постоброблення 3D-друкованих виробів (турбінна лопатка)	2,0
5	Практичне заняття 5. Особливості розробки 3D-моделей та стратегій LPBF для виготовлення стентів	2,0

Лабораторні заняття

Основні завдання циклу лабораторних занять полягають в практичному закріпленні головних тем навчальної дисципліни, оволодінні сучасними методами постоброблення (лазерне / ультразвукове / дробоструминне зміцнення, магнітне полірування) та їх впливу на морфологію (шорсткість, хвилястість) поверхні, твердість поверхні та поверхневих/об'ємних дефектів у суперсплавах на основі нікелю/кобальту. Крім того, сучасні методики дослідження якості, структури, поверхневих та об'ємних дефектів в LPBF-друкованих та постоброблених металевих виробах, буде застосовано в даній навчальній дисципліні. Знайомство з устаткуванням навчальної лабораторії обов'язково супроводжується інструктажем з техніки безпеки. Перелік запланованих лабораторних робіт до дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів" приведено у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4. Перелік лабораторних робіт

№ з/п	Назва лабораторної роботи	Кількість годин
1	Лабораторна робота 1. Дослідження морфології поверхні та твердості в приповерхневому шарі LPBF-друкованому суперсплавів на основі нікелю, обробленому лазерним ударним зміцненням	2,0
2	Лабораторна робота 2. Дослідження впливу ультразвукового поверхневого зміцнення та оздоблювання на об'ємні дефекти в LPBF-друкованому жаростійкому сплаві Інконель 718	2,0
3	Лабораторна робота 3. Дослідження морфології поверхні в LPBF-друкованих зразках із Інконель 718, сформованої дробоструминною постобробленням	2,0
4	Лабораторна робота 4. Визначення поверхневої твердості в LPBF-наддрукованих та постоброблених металевих виробах	2,0
5	Лабораторна робота 5. Дослідження LPBF-друкованих малогабаритних конструкцій (стенти) до та після постоброблення	1,0

6. Самостійна робота студента

Всього на опрацювання навчальної дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів" в рамках навчального плану підготовки бакалаврів спеціальності професійного спрямування "Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій" відведено 48 годин самостійної роботи, з яких 15 годин планується на виконання розрахунково-графічної роботи (РГР), 2 год. на підготовку до модульної контрольної роботи (МКР) та 6 год. на підготовку до заліку. 25 годин самостійної роботи відводиться на підготовку до лекційних, практичних та лабораторних занять, а також на самостійне опрацювання навчальної дисципліни (табл. 6.1).

Таблиця 6.1. Перелік тем та питань на самостійне опрацювання

№ з/п	Назви тем і питань, що виносяться на самостійне опрацювання та посилання на навчальну літературу	Кількість годин СРС
1	Тема 1.1. ASTM 52900: 2015 Адитивні технологічні процеси. Базові принципи. Частина 1. Терміни та визначення.	1,0
2	Тема 1.2. Метод екструзії матеріалу (Material Extrusion) та інші адитивні технології для виготовлення не металевих виробів.	1,0
3	Тема 1.3. Виробництво порошків металів. Технологія відцентрової атомізації для отримання порошків для АМ-машин. Основні металеві порошки для 3D-друку. Порівняння ціни металевих порошків на ринку в Україні, Європі та Америці. Композитні матеріали в 3D-друці.	1,0
4	Тема 1.4. Структура стандартів адитивного виробництва. Термінологія ISO 17296-1; Процеси/Матеріали ISO 17296-2; Методи випробовування ISO 17296-3; Проектування/формати даних ISO 17296-4.	1,0
5	Тема 1.5. Критерії застосування адитивних технологій. Технічні характеристики деталей.	2,0
6	Тема 2.2. Механізми «заліковування» пористості методом гарячого ізостатичного пресування.	0,5

7	Тема 2.3. Порівняння експлуатаційних параметрів в 3D-друкованих виробів, отриманих при термічному постобробленні у вакуумі і без вакууму.	1,5
8	Тема 2.4. Що таке регулярні й не регулярні мікрорельєфи?	1,5
9	Тема 2.5. Перспективи лазерного легування 3D-друкованих виробів.	1,5
10	Тема 2.6. Механізми формування мікрорельєфу на поверхні методом ультразвукового вигладжування.	0,5
11	Тема 2.7. Механізми формування наноструктури методами ППД.	0,5
12	Тема 2.8. Вплив електрохімічного полірування на навколишнє середовище.	0,5
13	Тема 3.4. Собівартість лазерних комбінованих технологій поверхневого постоброблення 3D-друкованих виробів.	2,0
14	Тема 4.5. Оцінка впливу магнітного поля під час процесу LPBF на залишкові напруження та структуроутворення.	3,5
15	Тема 5.3. Постоброблення виробів медичного призначення на основі титану. Порівняння поверхневих методів постоброблення в контексті отримання шорсткості на поверхні.	2,0
16	Тема 5.4. Постоброблення виробів на основі алюмінію. Комбіновані термомеханічні методи постоброблення.	2,0
17	Тема 6.2. Проаналізувати поточні досягнення та обмеження у використанні технологій PBF в медицині.	1,5
18	Тема 6.4. Визначити критерії для формування текстури поверхні в 3D-друкованих дентальних імплантів для вибору методу постоброблення	2,5
Разом		25

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів"

Викладання навчальної дисципліни базується на загально прийнятих нормах та за традиційними правилами, які спонукають студентів бути зацікавленими в отриманні знань з навчальної дисципліни "Постоброблення 3D-друкованих металевих виробів".

Правила відвідування занять та поведінки на заняттях

Для здобувачів вищої освіти очної форми навчання відвідування занять/консультацій не є обов'язковим. Поважними причинами для неявки на заняття/консультації є хвороба або академічна мобільність, які необхідно підтверджувати документами. Відсутність здобувача на заняттях/консультаціях передбачає самостійне опрацювання матеріалу та не звільняє здобувача від виконання завдання на самостійну підготовку або завдання поточного та підсумкового контролю. За об'єктивних причин (наприклад, міжнародна мобільність) навчання може відбуватись в он-лайн формі за погодженням з деканом факультету (директором інституту).

Порядок, умови захисту та оформленням відповідних текстових та графічних матеріалів, якість рішень і терміни їх виконання оцінюються балами, що відображене в рейтинговій системі оцінювання (PCO).

Проведення атестації здобувачів здійснюється відповідно до Положення про екзаменаційну комісію та атестацію здобувачів вищої освіти в КПІ ім. Ігоря Сікорського. Докладніше: <https://osvita.kpi.ua/node/35>.

Політика щодо оскарження оцінювання

Якщо здобувач вищої освіти не згоден з оцінюванням його знань він може оскаржити виставлену викладачем оцінку у встановленому порядку. Порядок повторного проходження здобувачами вищої освіти контрольних заходів урегульовані процедурами Положення про організацію освітнього процесу у ДДТУ Докладніше: <https://osvita.kpi.ua/node/39>.

Політика дедлайнів та перескладань

Порядок ліквідації академічних заборгованостей в Університеті реалізується відповідно до Положення про поточний, календарний та семестровий контроль результатів навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського. Детальніше: <https://osvita.kpi.ua/node/32>.

Перескладання заліку відбувається із дозволу адміністрації НН ІМЗ ім. Є.О. Патона за наявності поважних причин (наприклад, лікарняний). У разі виникнення заборгованостей з навчальної дисципліни або будь-яких форс-мажорних обставин, студенти мають зв'язатися з викладачем по доступних (наданих викладачем) каналах зв'язку для розв'язання проблемних питань та узгодження алгоритму дій для відпрацювання.

Політика академічної поведінки і етики

Студенти мають бути толерантним, поважати думку оточуючих, заперечення формулювати в коректній формі, конструктивно підтримувати зворотний зв'язок на заняттях.

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Академічна доброчесність здобувачів вищої освіти є важливою умовою для опанування результатами навчання за дисципліною і отримання задовільної оцінки з поточного та підсумкового контролів. Запозичення мають бути оформлені відповідними посиланнями. Списування є забороненим. Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Інші правила та етапи засвоєння навчальної дисципліни, спрямовані на досягнення позитивного результату під час різних видах контролю, повинні відповідати нормативним документам Університету та не суперечити законодавству України.

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Поточний контроль

За темою лекційних занять, на практичних роботах проводяться експрес опитування за пройденими раніше темами, які спонукають кращому розумінню матеріалу, що викладається, та опитування за темою лекції або заняття.

Календарний контроль

Для контролю поточного стану виконання вимог **силабусу** двічі на семестр за графіком навчального процесу Університету або Інституту проводяться модульні контрольні роботи, а система оцінювання наведена в PCO навчальної дисципліни.

Семестровий контроль

В якості контролю знань, опанованих студентами за семестр викладання навчальної дисципліни, навчальним планом передбачено складання заліку, умови допуску до якого та принцип оцінювання викладено в PCO навчальної дисципліни.

Рейтингова система оцінювання результатів навчання студентів за навчальної дисципліни

Розподіл навчального часу за видами занять і завдань навчальної дисципліни згідно з робочим навчальним планом кредитного модуля.

Рейтинг студента з навчальної дисципліни розраховується виходячи із 100-бальної шкали та складається з балів, отриманих за:

1. МКР (2 частини відповідно під час першої та другої атестації);
2. Виконання та захист лабораторних робіт (4,5 занять);
3. Виконання та захист практичних робіт (4,5 занять);
4. Активність на лекційних заняттях, тестові контролі / блиц опитування (27 занять);
5. Виконання РГР.

Система рейтингових балів

1. Модульна контрольна робота. Ваговий бал – 15 балів, тобто 2×15 балів (для двох атестацій).

МКР поділяється на дві контрольні роботи тривалістю по одній акад. годині, які охоплюють матеріали всіх розділів і тем навчальної дисципліни.

Кожна частина модульної контрольної роботи виконується в формі письмової відповіді на контрольні/тестові завдання. Максимальна оцінка за частину МКР складає 15 балів.

Максимальна кількість балів за МКР складає 2 частини $\times 15$ балів = 30 балів, що становить 30% від підсумкового рейтингу. Під час виконання кожної частини модульної контрольної роботи студентам дозволяється користуватися власним рукописним конспекту.

Критерії оцінювання:

- 14-15 балів виставляється, коли правильна відповідь, можливо з несуттєвими зауваженнями, повнота відповіді більша 90%;
- 11-13 балів виставляється, коли є не принципові зауваження, повнота відповіді більша 75%;
- 9-10 балів виставляється, коли є принципові зауваження, але можна вважати що суть питання розкрита, повнота відповіді не менша 60%;
- 0 балів виставляється, коли суть питання не розкрита та/або повнота відповіді менша 60%.

2. Лабораторні роботи. Ваговий бал – 3 бали.

В ході вивчення навчальної дисципліни студенти виконують 5 лабораторних робіт. Кожна з них за підсумками захисту оцінюється за п'ятирівневою системою з максимальним балом 3. Оцінка за лабораторні роботи, захищені із запізненням, знижується на кількість занять, які минули від заняття, встановленого розкладом навчального процесу на захист даної роботи. Максимальна оцінка за лабораторну роботу, виконану та захищену із запізненням більше чотирьох занять від встановленого терміну, становить 0 балів.

Максимальна кількість балів за відпрацювання всіх лабораторних робіт дорівнює $3 \text{ бали} \times 5 = 15$ балів, що становить 15% від підсумкового рейтингу.

Критерії оцінювання:

- 2,5-3 бали виставляється, коли правильна відповідь, можливо з несуттєвими зауваженнями, повнота відповіді більша 90%;
- 1,5-2 бали виставляється, коли є не принципові зауваження, повнота відповіді більша 75%;
- 1 бал виставляється, коли є принципові зауваження, але можна вважати що суть питання розкрита, повнота відповіді не менша 60%;
- 0 балів виставляється, коли суть питання не розкрита та/або повнота відповіді менша 60%.

3. Практичні роботи. Ваговий бал – 3 бали.

На практичних заняттях студенти опановують головні теми навчальної дисципліни. Таких задач виділено 5. Кожна з них за підсумками захисту оцінюється за п'ятирівневою системою з максимальним балом 3. Оцінка за завдання, виконані з запізненням, знижується на кількість занять, які минули від заняття, встановленого розкладом навчального процесу на захист даної роботи. Максимальна оцінка за практичну роботу, виконану та захищену із запізненням більше чотирьох занять від встановленого терміну, становить 0 балів. Максимальна кількість балів за відпрацювання всіх завдань на практичних заняттях дорівнює $3 \text{ балів} \times 5 = 15 \text{ балів}$, що становить 15% від підсумкового рейтингу.

Критерії оцінювання:

- 2,5-3 бали виставляється, коли правильна відповідь, можливо з несуттєвими зауваженнями, повнота відповіді більша 90%;
- 1,5-2 бали виставляється, коли є не принципові зауваження, повнота відповіді більша 75%;
- 1 бал виставляється, коли є принципові зауваження, але можна вважати що суть питання розкрита, повнота відповіді не менша 60%;
- 0 балів виставляється, коли суть питання не розкрита та/або повнота відповіді менша 60%.

4. Активність на заняттях, тестові контролі / бліц опитування. Ваговий бал – 10 балів.

5. Виконання розрахунково-графічної роботи. Ваговий бал – 30 балів.

Розмір шкали:

- творчо виконана робота – 26-30 балів;
- роботу виконано з незначними недоліками – 16-25 балів;
- роботу виконано з певними помилками – 12-15 балів;
- роботу не зараховано (завдання не виконане або є грубі помилки) – 0 балів.

Примітка: За кожний тиждень запізнення з поданням РГР на перевірку нараховується штрафний $r_{ш}$ – 1 бал (усього не більше – 5 балів).

Розмір шкали PCO з навчальної дисципліни дорівнює сумі вагових балів контрольних заходів протягом семестру і складає: $RD = 30 + 15 + 15 + 10 + 30 = 100 \text{ балів}$.

Рейтингова оцінка (RD) з навчальної дисципліни формується як сума всіх рейтингових балів.

Умови атестації та допуску до заліку

Умовою позитивної першої атестації (на 7 тижні) є отримання не менше 15 балів, написавши МКР (частина 1), виконавши 1 або 2 задачі згідно практичних занять та захистивши 1 лабораторну роботу (на час атестації).

Умовою позитивної другої атестації (на 13 тижні) – отримання не менше 25 балів, написавши МКР (частина 2), виконавши 2 або 3 задачі згідно практичних занять та захистивши 2–3 лабораторні роботи (на час атестації).

Умовою допуску до заліку є написання 2-х частин МКР, зарахування всіх лабораторних та практичних робіт, а також виконання РГР. Студенти, які не виконали умови до заліку не допускаються.

Студенти, які виконали усі передбачені індивідуальні завдання, лабораторно-практичну частину курсу та РГР ($RD \geq 60 \text{ балів}$), мають можливості:

- не складати залік, отримавши семестрову оцінку (залік) без додаткових випробувань відповідно до набраного рейтингу (табл. 8.1);
- складати залік з метою підвищення оцінки (балів) за даною навчальною дисципліною на останньому за розкладом занятті у вигляді співбесіди.

Таблиця 8.1. Відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

У випадку, коли залікову контрольну роботу виконують з метою підвищення оцінки (балів), здобувач отримує більшу з оцінок, що отримані за результатами співбесіди або за рейтингом («м'яка» РСО).

Студенти, які бажають скласти залік з метою підвищення балів, можуть покращити набрану оцінку на один ступінь вище за університетською шкалою тільки одного разу під час проведення заліку.

Студенти, які виконали усі передбачені індивідуальні завдання, лабораторно-практичну частину курсу та РГР, але мають рейтингову оцінку менше 60 балів ($RD \leq 60$ балів), повинні виконати письмову контрольну роботу, яка оцінюється у 70 балів максимум, виходячи із передбачених 30 балів за виконання семестрового індивідуального завдання – РГР.

Критерії оцінювання виконання письмової залікової роботи:

На заліку студенти, які мають рейтингову оцінку менше 60 балів, повинні виконати письмову контрольну роботу з максимальною оцінкою 70 балів. Кожне завдання повинно містити чотири теоретичних запитання (завдання) і одне практичне. Кожне завдання складено з Переліку запитань до заліку з навчальної дисципліни. Кожне запитання оцінюється у 14 балів за такими критеріями:

- «відмінно», повна відповідь, не менше 95% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – 14 балів;
- «дуже добре» майже повна відповідь, не менше 85% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – 13 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь, не менше 75% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або є незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями) – 12 балів;
- «задовільно», неповна відповідь, не менше 65% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – 10-11 балів;
- «достатньо», неповна відповідь, не менше 60% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – 8-9 балів;
- «незадовільно», відповідь не відповідає умовам до «достатньо», менше 60% – 0 балів.

До відомості семестрового контролю викладач заносить рейтингові бали, отримані здобувачем у семестрі або суму балів за результатами виконання залікової контрольної роботи і розрахунково-графічної роботи, та оцінку відповідно до цих балів.

9. Додаткова інформація з навчальної дисципліни

Загальний перелік орієнтовних питань, які виносяться до експрес-контролю та заліку, наведено в Додатку А.

Приклад завдання на РГР наведено в Додатку Б.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено:

доцентом кафедри ЛТФТ, к.т.н., доцент, Лесиком Дмитром Анатолійовичем

Ухвалено:

кафедрою Лазерної техніки та фізико-технічних технологій НН ІМЗ ім. Є.О. Патона (протокол № 6 від 18 грудня 2024)

Погоджено:

Методичною комісією НН ІМЗ ім. Є.О. Патона (протокол № 5/25 від 24 січня 2025)

Перелік питань:

1. Навести блок-схему методів адитивного виробництва металевих виробів. Пояснити відмінності між традиційним та адитивним виробництвом.
2. Розкрити особливості адитивного виробництва металевих виробів методами пошарового сплавлення порошку (PBF) та спрямованого осадження енергії (DED). Особливості поширення 3D-друку на світовому ринку.
3. Навести й схарактеризувати основні матеріали для 3D-принтерів. Виробники 3D-принтерів на основі технології PBF.
4. Навести схему і розкрити особливості технології спрямованого лазерного осадження (DLD). Пояснити переваги та недоліки методу DLD в порівнянні з іншими методами спрямованого осадження енергії (DED).
5. Навести схему і розкрити особливості технології електронно-променевого пошарового сплавлення порошку (EB-PBF). Пояснити відмінності технології EB-PBF від LPBF.
6. Навести схему і розкрити особливості технології струминного нанесення сполучного (BJ). Пояснити відмінності технології BJ від LPBF.
7. Навести схему і розкрити особливості технології лазерного пошарового сплавлення порошку (LPBF). Навести шляхи для підвищення продуктивності процесу LPBF.
8. Розкрити особливості повторного використання порошків для виготовлення металевих виробів високої якості методом LPBF.
9. Розкрити особливості виготовлення композитів на основі нікелю та титану методом LPBF.
10. Схарактеризувати типові поверхневі та об'ємні дефекти в PBF-друкованих виробах.
11. Розкрити критерії для визначення/вибору ефективного методу в якості постоброблення 3D-друкованих металевих/композитних виробів.
12. Навести схему і відзначити мету застосування гарячого ізостатичного пресування (HIP) для постоброблення 3D-друкованих металевих виробів. Пояснити функціональне призначення високошвидкісного охолодження оброблюваних деталей.
13. Розкрити особливості гарячого ізостатичного пресування (HIP) жаростійких сплавів, виготовлених методом LPBF. Пояснити зміною яких параметрів HIP можна керувати структуроутворенням та щільністю матеріалу.
14. Навести типові методи термічного об'ємного постоброблення LPBF-друкованих виробів, виходячи із практичних застосувань та типу матеріалу.
15. Навести температурно-часові циклограми для термічного об'ємного постоброблення LPBF-друкованих суперсплавів на основі нікелю.
16. Навести температурно-часові циклограми для термічного об'ємного постоброблення LPBF-друкованих суперсплавів на основі кобальту.
17. Розкрити особливості впливу термічного об'ємного постоброблення на структуру та механічні властивості сплавів на основі титану, виготовленого методом LPBF.
18. Розкрити особливості впливу кріогенної постобробки на механічні властивості та залишкові напруження сплавів на основі алюмінію, виготовленого методом LPBF.
19. Навести блок-схему методів поверхневого постоброблення 3D-друкованих металевих виробів.
20. Навести схему і розкрити особливості лазерного ударного зміцнення 3D-друкованих металевих виробів. Розкрити поверхневі ефекти у LPBF-друкованих металевих виробах після лазерного ударного постоброблення.
21. Розкрити особливості впливу лазерного повторного оплавлення поверхні LPBF-друкованих металевих виробів на якість поверхневого шару, представивши схему оброблення.
22. Навести схему і розкрити особливості лазерного полірування 3D-друкованих металевих виробів. Пояснити зміною яких параметрів лазерного технологічного устаткування можна керувати процесом полірування.
23. Навести блок-схему методів ультразвукового поверхневого постоброблення, які використовуються для поліпшення якості поверхневого шару 3D-друкованих металевих виробів,

методом LPBF та DLD. Пояснити вплив геометрії оброблюваної поверхні (виробу) на вибір відповідної технології ультразвукового постоброблення.

24. Навести схему і розкрити особливості мікрофрезерування LPBF-друкованих металевих виробів.

25. Розкрити особливості впливу відцентрованого постоброблення на морфологію поверхні та фізико-механічні властивості LPBF-друкованих металевих виробів, навівши переваги даного методу для обробки виробів складної геометричної форми.

26. Розкрити особливості впливу кавітаційного постоброблення на морфологію поверхні та фізико-механічні властивості LPBF-друкованих металевих виробів, навівши схеми обробки.

27. Розкрити особливості впливу піскоструминного та дробоструминного постоброблення на морфологію поверхні та фізико-механічні властивості LPBF-друкованих металевих виробів, підкресливши ефективні схеми оброблення.

28. Розкрити особливості впливу електрохімічного (полірування) постоброблення на морфологію поверхні та фізико-механічні властивості LPBF-друкованих металевих виробів. Назвати основні недоліки даного методу постоброблення.

29. Розкрити особливості впливу магнітного (полірування) постоброблення на морфологію поверхні та фізико-механічні властивості LPBF-друкованих металевих виробів. Назвати основні недоліки даного методу постоброблення.

30. Навести блок-схему комбінованих методів поверхневого постоброблення 3D-друкованих металевих виробів.

31. Навести перспективні термомеханічні методи/схеми постоброблення LPBF-друкованих сплавів на основі алюмінію, нікелю, титану.

32. Розкрити особливості впливу термохімічних методів постоброблення LPBF-друкованих металевих виробів. Пояснити відмінності термомеханічних методів від термохімічних методів.

33. Навести перспективні лазерні комбіновані методи поверхневого постоброблення LPBF-друкованих металевих виробів.

34. Навести блок-схему гібридних методів поверхневого постоброблення 3D-друкованих металевих виробів. Переваги та проблеми гібридного виробництва.

35. Розкрити особливості адитивного/субтрактивного гібридного виробництва металевих деталей методом DED/DLD, представивши схеми оброблення.

36. Розкрити особливості впливу магнітного поля під час процесу LPBF на властивості 3D-друкованих металевих виробів.

37. Розкрити особливості впливу високочастотних коливань під час процесу LPBF на властивості 3D-друкованих металевих виробів.

38. Розкрити особливості впливу дії (додаткового) лазерного променя під час процесу LPBF на властивості 3D-друкованих металевих виробів.

38. Розкрити особливості впливу дії (додаткового) лазерного променя під час процесу LPBF на властивості 3D-друкованих металевих виробів.

39. Порівняння структуроутворення (сплав Інконель) після гібридного 3D-виробництва в порівнянні із традиційним виробництвом.

40. Розкрити особливості постоброблення 3D-друкованих виробів аерокосмічного призначення.

41. Розкрити особливості постоброблення LPBF-друкованих виробів медичного призначення (дентальні імпланти).

42. Розкрити особливості постоброблення LPBF-друкованих виробів медичного призначення (стенди).

43. Розкрити особливості постоброблення LPBF-друкованих виробів медичного призначення (імплант суглоба).

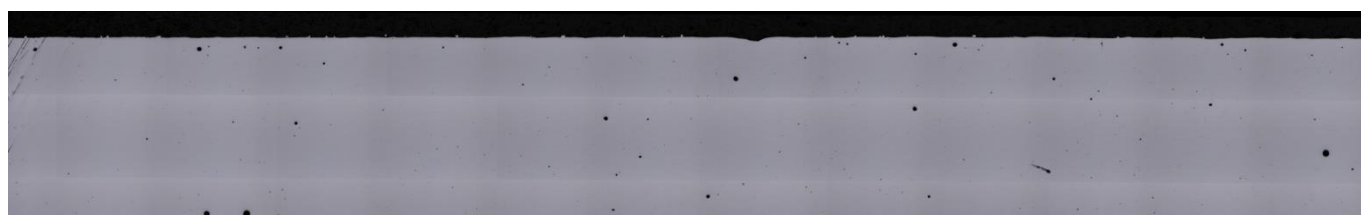
44. Навести приклади застосування адитивних технологій у виготовлення штампових інструментів.

45. Навести приклади застосування адитивних технологій у виготовлення металевих деталей автомобільної/енергетичної промисловості.

Приклад завдання на РГР:

1. Визначити величину пористості та виконати аналіз структурних дефектів у приповерхневому шарі (на визначеній глибині) LPBF-друкованому виробу із сплаву на основі нікелю (в двох площинах ZX та XY) до та після поверхневого постоброблення, використовуючи ілюстрації оптичної мікроскопії та спеціального програмного забезпечення. Не менше 3-х областей взяти для аналізу, визначивши середню величину пористості у відносних величинах. Зробити висновки на основі отриманих результатів.

На рис. Б.1 показано загальний вигляд досліджуваних зразків, сфокусувавшись на аналізі приповерхневої пористості в межах 0-0.25 мм від поверхні. Відстань від поверхні залежить від типу методу постоброблення й може відрізнятися.



(a)



(б)

Рис. Б.1. Оптичні ілюстрації приповерхневого шару у LPBF-друкованому виробу (XY вісь) із сплаву на основі нікелю до (а) та після постоброблення (б) методом механічного оброблення.

Статистичну оцінку вище зазначених ілюстрацій виконуємо за допомогою спеціального програмного забезпечення, відобразивши результати до таблиці Б.1.

Таблиця Б.1. Результати оцінки структурних дефектів (пористості) у сплаві Інконель 718 до та після постоброблення методом механічного оброблення (поверхнева пластична деформація)

0-0.25 мм	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean	IntDen
1_SD_LPBF_300x[S].jpg	31	336	10.839	0.166	255	2763.871
1-SD_постобробка_300x[S].jpg	20	49	2.450	0.024	53.888	108.000

За отриманими результатами (Табл. Б.1) видно, кількість пористості у приповерхневому шарі LPBF-друкованого виробу (XY вісь) із сплаву на основі нікелю зменшується після поверхневого постоброблення за рахунок інтенсивного пластичного деформування.