



Дизайн для адитивного виробництва

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>131 Прикладна механіка</i>
Освітня програма	<i>Конструювання та дизайн машин</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)/дистанційна/змішана</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>5 кредити ЄКТС, 150 год., Лекції – 36 год., практичні – 18 год., лабораторні – 18 год., СРС 78 год.</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Екзамен/ МКР/ ДКР</i>
Розклад занять	<i>За розкладом Департаменту навчальної роботи КПІ ім. Ігоря Сікорського http://roz.kpi.ua</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: д.т.н., проф. Саленко Олександр Федорович, тел. (097) 717-37-44 e-mail: Salenko2006@gmail.com Практичні/Лабораторні: к.т.н., доц. Джулій Дмитро Юрійович, тел. (093) 853-52-17 e-mail: dzhulii.dmytro@i11.kpi.ua</i>
Розміщення курсу	<i>Ресурс «Електронний кампус», classroom</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Дисципліна "Дизайн для адитивного виробництва" розглядає особливості проектування виробів для адитивного виробництва з різних матеріалів, включаючи метали, кераміку, полімери та композити, а також основні технології адитивного виробництва, що використовуються як для прототипування, так і для виготовлення функціональних деталей.

На сучасному етапі розвитку сучасної технології науково–технічний прогрес знаходить своє відображення в якісних змінах знарядь праці, продуктах праці, у впровадженні нових автоматизованих технологічних процесів як у системах матеріального виробництва, так і у системах управління різних рівнів. В результаті з'являються нові вироби й технології, змінюється номенклатура послуг, що надаються підприємствам, установам та фізичним особам, виникають принципово нові економічні об'єкти. Відбувається подальше зростання складності технічних об'єктів і систем, розширюється коло їх інформаційної взаємодії, збільшується невизначеність поведінки технічних систем в умовах швидкозмінного зовнішнього

середовища. Всі ці явища вимагають швидкого, адекватного реагування шляхом створення нових складних виробів у малих обсягах (практично одиничне виробництво), для яких адитивні процеси є найбільш ефективним засобом.

Широке поширення цифрових технологій в області проектування (CAD), моделювання та розрахунків (CAE) і механічної обробки (CAM) стимулювало вибуховий характер розвитку технологій 3D-друку, і в даний час вкрай складно вказати область матеріального виробництва, де в тій чи іншій мірі не використовувалися б 3D-принтери. Цифрові 3D-технології відкрили унікальні можливості відтворення найскладніших просторових форм, об'єктів та інженерних конструкцій, механізмів.

Метою дисципліни є набуття знань про використання адитивних технологій при виготовленні високоефективних деталей та особливостей проектування виробів для цих процесів.

Предмет навчальної дисципліни – особливості проектування та технологічної підготовки адитивного виробництва, особливості різних технологій пошарового виготовлення деталей.

Вивчення дисципліни сприяє набуттю наступних компетентностей:

Фахові компетентності

ФК10. Здатність застосовувати функціонально-орієнтовані на адитивні процеси модулі CAD-CAM систем.

ФК11. Здатність створювати елементи інженерних конструкцій, орієнтованих на застосування адитивних процесів, обирати обладнання, матеріали та призначати режими виготовлення деталей.

ФК12. Здатність прогнозувати фізико-механічні властивості виробу шляхом реалізації раціональної схеми його отримання, структурного та функціонального поділу на компоненти та застосування засобів та методів формування надійно відтворюваного виробу.

Завершитись навчання має наступними програмними результатами:

РН17. Використовувати спеціальне програмне забезпечення при проектуванні виробів і підготовці керуючих програм для адитивних машин, їх налагодження та управління процесом.

РН18. Застосувати адитивні процеси для виготовлення елементів інженерних конструкцій зі спеціальними властивостями.

РН19. Спроможність виконувати технологічну підготовку виготовлення виробу засобами адитивних технологій; обирати матеріали, призначати режими, оцінювати досягну точність виробу та очікувані фізико-механічні характеристики.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Вивчення даної дисципліни базується на знаннях, отриманих на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти. У свою чергу дисципліна «Дизайн для адитивного виробництва» є базою для подальшого вивчення дисциплін «Наукова робота за темою магістерської дисертації», «Практика», «Виконання магістерської дисертації».

3. Зміст навчальної дисципліни

- Тема 1 Термінологія і класифікація адитивних процесів. Історичний аспект технологій адитивного виробництва. Типи використовуваного обладнання.
- Тема 2 Адитивні машини. Принципи машин BED Deposition and Direct Deposition. Основи будови зазначених машин. Використовувані матеріали і засоби. Джерела теплоти. Розміщення об'єктів на робочих столах обладнання.
- Тема 3 Машини і обладнання для вирощування металевих виробів. Основні механізми формування робочих шарів моделі. Явища теплопоглинання та теплопереносу у системі. Забезпечення точності друку.
- Тема 4 Адитивні технології та порошкова металургія. Задачі створення моделей та виробів. Фазові та структурні перетворення під час процесу. Проблеми точності. Проблеми порожнистості деталей.
- Тема 5 Комп'ютерна томографія та контроль готових виробів Принцип комп'ютерної томографії виробів. Проблеми збору інформації. Обмін інформацією, її накопичення, зберігання та обробка. Використання засобів ультразвукового контролю для проведення діагностики виробів.
- Тема 6 Застосування FDM-процесу для виготовлення моделей і деталей машинобудування Особливості створення моделей і деталей машинобудування. Вимоги з точності. Вимоги зі щільності, вимоги з міцності деталей. Забезпечення сталих умов друку встановленням теплових екранів та баластних елементів.
- Тема 7 Дослідження процесів вирощування виробів із закладними елементами. Можливість встановлення закладних елементів. Забезпечення сумісності характеристик друкованих виробів із закладними елементами. Проблеми виникнення концентраторів напружень.
- Тема 8 Методи параметричної оптимізації структурно-складних технічних систем. Постановка задачі. Вибір відповідних критеріїв. Композиція та декомпозиція складної технічної системи.
- Тема 9 Надійність процесу 3D-друку. Причини втрати сталості під час вирощування деталей. Матеріальне та технічне забезпечення процесу. Відновлення процесу після різних видів збоїв. Дефектність виробів.
- Тема 10 Виробництво оболонкових виробів стільникової структури. Застосування спеціальних прийомів для підвищення точності виробів. Принципи проектування стільникових конструкцій. Пласкі панелі та тіла обертання. Побудова моделей для друку. Розташування спеціальних та жертвовних елементів на моделі для передування відшарування та залишкової деформівності виробу. Вимоги до жертвовних елементів.
- Тема 11 Використання 3-д процесів у хірургії та протезуванні. Основи друку

трабекулярних остеоструктур. Вимоги до подібних структур, їх реологічні властивості. Відтворення прототипів та готових виробів для суглобової імплантації та протезування.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Основна література

1. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с.
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/619/1122/2283-1?inline=1>.
2. Адитивні технології: навч. посіб. / Т.Р. Ганєєв, І.О. Прибисько, М.М. Руденко, І.О. Петренко – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 105 с.
<http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/27993/%d0%9f%d0%be%d1%81%d1%96%d0%b1%d0%bd%d0%b8%d0%ba%20%d0%90%d1%82%d0%b8%d1%82%d0%b8%d0%b2%d0%bd%d1%96%20%d1%82%d0%b5%d1%85%d0%bd%d0%be%d0%bb%d0%be%d0%b3%d1%96%d1%97.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
3. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.
<https://events.pstu.edu/bioart/wpcontent/uploads/sites/3/2020/04/3d-printing-for-biomedical-applications-lec.pdf>

Додаткова література

1. 3-D Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.uasvision.com>.
2. Khoshnevis B. et al. Metallic part fabrication using Selective Inhibition Sintering (SIS). Department of Industrial and Systems Engineering University of South California, Los Angeles, CA 90089, USA.
3. Sabina L. Campanelli et. Al. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process. Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy.
4. Techel A. et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), интернет-издание Laser Institute of America.
5. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker., 2015. – 498 с. – (Second Edition).

6. Rheological models of trabecular structures joint implants obtained by additive processes. O. Salenko, M. Kryshchuk, N. Havrushkevych, H. Habuzian, D. Dzhulii. - Mechanics and Advanced Technologies 8 (2 (101)), 182-194.
7. Increasing the Strength of Thin-walled Products Obtained by FDM Using the Thin Surface Films. M. ZAGIRNYAK, O. SALENKO, W. ALNUSIRAT, L. GOLOVKO, V. OREL, ... Przegląd Elektrotechniczny 2024 (3).

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

На лекціях подається теоретичний матеріал та наводяться приклади використання адитивних процесів при виготовленні спеціальних виробів. Під час лекційних занять розглядаються наступні питання:

- Термінологія і класифікація адитивних процесів;
- Адитивні машини. Принципи машин BED Deposition and Direct Deposition. Загальні вимоги до виробів, відтворюваних адитивними процесами;
- Машини і обладнання для вирощування металевих виробів. Особливості технологій, технологічне оснащення;
- Адитивні технології та порошкова металургія;
- Основи дизайну виробів, отримуваних адитивними процесами. Використання відповідних CAD-CAM систем, програмних модулів;
- Принципи проектування виробів із закладними елементами, використання спеціальних баластних елементів для передування деформаціями і розшаруванню;
- Особливості проектування технологічних процесів адитивного виробництва з урахуванням поділу деталі на елементи (слайсінгу). Режими процесів, прогнозування продуктивності, якості та точності виробу;
- Застосування FDM-процесу для виготовлення моделей і деталей машинобудування;
- Застосування спеціальних алгоритмів оптимізації форм елементів деталі при дії силового навантаження;
- Раціональне проектування просторових і фермових конструкцій. Обрання критерію оптимізації. Усунення елементів виробу, які не можуть бути відтворені при пошаровому слайсінгу;
- Надійність процесу 3D-друку.

Роботи лабораторного практикума

На практичних/лабораторних роботах студенти опановують основи технологічної та конструкторської підготовки адитивного виробництва. Роботи, розроблені та запропоновані студентам, мають індивідуальний, дослідницький характер.

Перелік лабораторних робіт:

Робота 1 Проектування моделей із врахуванням обмежувальних чинників для FDM 3-D друку в спеціальних модулях CAD-CAM систем.

Робота 2 Створення керуючих програм для машин 3-д друку типу DUPLICATOR, ANYCUBIC.

Робота 3 Розробка процесу виготовлення елементів інженерних конструкцій зі спеціальними властивостями. Друкування тестових деталей

Робота 4 Генерація виробу за завданням викладача. Технологічна підготовка адитивного процесу

Робота 5 Друк тонких легкодеформівних елементів та стільникових систем. Використання спеціального технологічного оснащення.

Робота 6 Дослідження точності та відтворюваності процесів при друкуванні тестових деталей. Вплив температурних процесів на точність та якість виробу.

Робота 7 Порівняння характеристик міцності тестових деталей. Друк остеоструктур для хірургічної імплантації.

Практичні заняття

Тематика практичних робіт, що проводяться зі студентами, відповідає лекційній тематиці, з більшим акцентуванням на практичних навичках та на опануванні прийомів дизайну заданих деталей, аналізі можливих похибок, забезпечення інженерної точності виробу та відтворюваності процесу. Поєднання практичних і лабораторних робіт дозволяє більш ефективно сприймати матеріал курсу, формує практичні навички проектування інженерних виробів та їх використання на практиці.

Роботи діляться на групи:

– Генеративний дизайн, використання спеціальних прийомів конструювання виробів та оптимізації його елементів;

– Технологічна підготовка адитивного виробництва, застосування спеціального програмного забезпечення та програмно-апаратних комплексів;

– Симуляція процесу адитивного виробництва, його реалізація на FDM-принтерах. Скорочення часу друку за рахунок раціональної топології руху друкувальних головок та конструкції відтворюваного виробу. Формування спеціальних профільних елементів.

ДКР

До тематики ДКР відносяться особливості підготовки та налаштування обладнання для адитивного виробництва оптимізованих деталей.

6. Самостійна робота студента

Години, відведені на самостійну роботу студента, призначені для опанування навчальної дисципліни, зокрема, підготовка до лекцій та лабораторних/практичних робіт, а також підготовка до модульної контрольної роботи та екзамену. Також до самостійної роботи відноситься опрацювання літературних джерел для розширення знань лекційного матеріалу.

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Відвідування занять

Відвідування лекцій чи відсутність на них, не оцінюється. Проте, студентам рекомендується відвідувати заняття, оскільки на них викладається теоретичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для виконання екзаменаційного завдання та ДКР.

Відвідування практичних/лабораторних робіт є обов'язковим. У разі відсутності студента на роботі, у тому числі і за станом здоров'я, йому необхідно пропущену роботу відпрацювати. На одному занятті (2 год.) можна відпрацювати лише одну пропущену роботу.

Відвідування модульних контрольних робіт є обов'язковим. Якщо студент пропустив МКР з поважних причин, наприклад, за станом здоров'я, то за наявності підтверджуючого документа (довідки) він може протягом тижня написати пропущену контрольну роботу. В іншому випадку МКР не оцінюється. Перескладання модульної контрольної роботи на вищу оцінку не передбачено.

Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами. Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень. Детальніше: НАКАЗ №НОН/228/2022 ВІД 21.07.2022 "Про затвердження нової редакції положення про апеляції в КПІ ім. Ігоря Сікорського", https://document.kpi.ua/2022_НОН-228.

Академічна доброчесність

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>.

Норми етичної поведінки

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>.

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

Поточний контроль: практичні/лабораторні роботи, модульні контрольні роботи, ДКР, експрес опитування за темою заняття.

Календарний контроль: провадиться 2 рази на семестр за встановленим графіком як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: екзамен.

Рейтингова оцінка R студента з дисципліни складається з балів, які він отримує за:

- виконання 4 практичних/лабораторних робіт $r1$;
- модульну контрольну роботу $r2$;
- ДКР $r3$
- екзамен $r4$.

Додатково РСО передбачає можливість нарахування заохочувальних та штрафних балів.

Практичні/лабораторні роботи (r1) (Комплексні).

Оцінюється 4 виконаних завдання. Ваговий бал однієї роботи – 5 балів. Мінімальна кількість балів, яка повинна бути набраною, щоб робота вважалась зарахованою складає 3 бали, тобто 60% від максимальної кількості за одну роботу (табл. 1). Роботи захищається на наступних парах у визначені терміни.

Таблиця 1

Рейтингові бали за одну практичну/лабораторну роботу

Бали	Критерії оцінювання
5,0	Робота виконана повністю, зауважень немає, є відповіді на всі запитання.
4,5	Робота виконана з несуттєвими зауваженнями, у відповідях трапляються неточності.
4,0	Робота виконана з зауваженнями, є відповіді на більшість запитань.
3,5	Робота виконана з помилками, є відповіді лише на частину запитань.
3,0	Робота виконана із значними помилками, є відповіді лише на окремі питання.
0,0	Робота не виконана, звіт не представлений.

Мінімальна кількість балів за всі роботи:

$$r1_{min} = 3 \times 4 = 12 \text{ балів.}$$

Максимальна кількість балів за всі роботи:

$$r1_{max} = 5 \times 4 = 20 \text{ балів.}$$

Роботи захищається на наступних парах у визначені терміни.

Модульна контрольна робота

Робочим навчальним планом передбачено проведення однієї модульної контрольної роботи (МКР) в обсязі 2 год. МКР відбувається у вигляді двох контрольних робіт по 1 годині кожна.

Одна контрольна робота складається з кількох завдань. Завдання оновлюються кожного семестру. Ваговий бал однієї контрольної роботи – 10 балів.

Оцінювання контрольної роботи здійснюється відповідно до таблиці 2.

Таблиця 2

Рейтингові бали за одну контрольну роботу

Бали	Критерій оцінювання
10,0	Вірна відповідь більш, ніж на 95 % питань
9,0	Вірна відповідь більш, ніж на 85 % питань

8,0	Вірна відповідь більш, ніж на 75 % питань
7,0	Вірна відповідь більш, ніж на 65 % питань
6,0	Вірна відповідь більш, ніж на 60 % питань
0,0	Вірна відповідь менш, ніж на 60 % питань або студент був відсутній

Максимальна кількість балів за дві контрольні роботи відповідно складає:

$$r2 = 10 \text{ балів} \times 2 = 20 \text{ балів}$$

ДКР

Виконання ДКР передбачає освоєння теоретичного та практичного матеріалу за індивідуальними завданнями. Ваговий бал однієї ДКР – 20 балів.

Оцінювання ДКР здійснюється відповідно до таблиці 3.

Таблиця 3

Рейтингові бали за ДКР

Бали	Критерій оцінювання
20,0	Робота виконана повністю, зауважень немає, є відповіді на всі запитання.
18,0	Робота виконана з несуттєвими зауваженнями, у відповідях трапляються неточності.
16,0	Робота виконана з зауваженнями, є відповіді на більшість запитань.
14,0	Робота виконана з помилками, є відповіді лише на частину запитань.
12,0	Робота виконана із значними помилками, є відповіді лише на окремі питання.
0,0	Робота не виконана, звіт не представлений.

Максимальна кількість балів за ДКР відповідно складає:

$$r3 = 20 \text{ балів}$$

Штрафні та заохочувальні бали

Загальний рейтинг з дисципліни включає штрафні та заохочувальні бали, які додаються до суми вагових балів усіх контрольних заходів.

Нарахування штрафних балів не передбачено.

Заохочувальні бали можуть нараховуватися за виконання творчих робіт: робота у наукових гуртках з підготовкою матеріалів доповідей або статей для публікації, участь у наукових і науково-практичних конференціях і семінарах, олімпіадах з дисципліни, конкурсах робіт, рефератів та оглядів наукових праць, аналіз сучасної нормативно-правової бази з дисципліни у країні та її відповідність вимогам міжнародних стандартів тощо. Кількість нарахованих балів залежить від отриманих результатів.

Загальна сума заохочувальних балів не може перевищувати 10% від рейтингової шкали, тобто $100 \times 0,1 = 10$ балів.

Умови рубіжної атестації

Календарний контроль з навчальної дисципліни (освітнього компонента) проводиться, як правило, на 7-8 та 14-15 тижнях кожного семестру. Умовою отримання позитивної оцінки з календарного контролю з навчальної дисципліни є значення поточного рейтингу здобувача не менше, ніж 50 % від максимально можливого на час проведення такого контролю. Результати календарного контролю заносяться у модуль "Календарний контроль" Електронного кампусу.

Критерії семестрового оцінювання

Рейтингова система оцінювання складається з балів, отриманих здобувачем за результатами заходів поточного контролю, ДКР, заохочувальних та штрафних балів. Рейтингова оцінка доводиться до здобувачів на останньому занятті з дисципліни в семестрі.

Друга складова – це екзаменаційна оцінка, призначена для оцінювання окремих завдань на екзамені.

Умови допуску до екзамену – відсутність заборгованостей з практичних/лабораторних робіт, виконання МКР та ДКР.

Екзамен відбувається за розкладом екзаменаційної сесії, затвердженим директором інституту. Екзамен проводиться в письмовій формі. Час написання екзамена складає не менше 60 хвилин. Екзаменаційне завдання складається з двох питань. Питання максимально оцінюється у відповідно 20 балів. Максимальна кількість балів отриманих за екзамен складає 40 балів:

$$R4 = 40 \text{ балів.}$$

Критерій екзаменаційного оцінювання визначається як сума якості відповідей на кожне завдання білета за табл. 4.

Таблиця 4

Кількість балів за одне завдання білета

Бали	Критерій оцінювання
20,0	Відмінна відповідь (не менше 95% інформації), можливі несуттєві зауваження та неточності
18,0	Дуже добра відповідь (не менше 85% інформації), помилок немає, відповідь на переважну більшість питань, творче мислення
16,0	Добра відповідь (не менше 75% інформації), помилок немає, відповідь на більшість питань, окремі недоліки
14,0	Задовільна відповідь (не менше 65% інформації) є зауваження, відповідь на частину питань
12,0	Достатня відповідь (не менше 60% інформації), суттєві помилки, відповідь на окремі питання.
0,0	Відповідь невірна або менше 60% інформації, або вона відсутня.

Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни

За результатами заходів поточного контролю з дисципліни, ДКР, заохочувальних балів та екзамена:

$$R = r1 + r2 + r3 + r4 = 20 + 20 + 20 + 40 = 100 \text{ балів}$$

Для отримання відповідної оцінки з дисципліни студент має набрати певну кількість балів, згідно з таблицею перерахунку (табл. 5).

Таблиця перерахунку рейтингових балів в оцінки

Рейтингова оцінка здобувача	Університетська шкала оцінок рівня здобутих компетентностей
95 – 100	Відмінно
85 – 94	Дуже добре
75 – 84	Добре
65 – 74	Задовільно
60 – 64	Достатньо
Менше 60 балів	Незадовільно
Не виконані умови допуску до семестрового контролю	Не допущено

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус) склав:

Професор кафедри конструювання машин,
доктор технічних наук

Олександр САЛЕНКО

Ухвалено кафедрою конструювання машин- (Протокол №17 від 20.06.2025 р.)

Погоджено методичною комісією навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту (Протокол №11 від 27.06.2025 р.).