

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Олег МАРЕНКОВ



2025 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Сіренка Максима Костянтиновича «Розробка та вдосконалення технології шарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки», представлені на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 - «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Витяг

з протоколу № 4 від 12 червня 2025 року міжкафедрального семінару фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Голова міжкафедрального семінару фізико-технічного факультету д-р тех. наук, проф., Санін А. Ф.

Секретар міжкафедрального семінару фізико-технічного факультету канд. тех. наук, доц. Лабуткіна Т.В.

ПРИСУТНІ: 21 з 25 членів міжкафедрального семінару: д-р. тех. наук, проф. А. Ф. Санін (05.02.01 – матеріалознавство), д-р. тех. наук, проф. М. М. Дронь (05.13.03 – системи і процеси управління); д-р. тех. наук, проф. С. О. Давидов (05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів); д-р. тех. наук, проф. Г. І. Сокол (05.11.06 – акустичні прилади і системи); д-р. тех. наук, проф. Манько Т. А. (05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів); канд. тех. наук, доц. А. В. Давидова (05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів); канд. тех. наук, доц. Т. В. Лабуткіна (05.13.03 – системи та процеси керування); канд. тех. наук, доц. Ю. В. Ткачов (05.07.02 – проек-

тування, виробництво та випробування літальних апаратів); канд. тех. наук, доц. В. Ю. Шевцов (05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів); канд. тех. наук, доц. В. Л. Бучарський (05.05.03 – двигуни та енергетичні установки); канд. тех. наук, доц. О. Є. Золотко (05.05.03 – двигуни та енергетичні установки); д-р. тех. наук, проф. Т. М. Кадильникова (05.02.02 – машинознавство); канд. тех. наук, доц. С. В. Клименко (05.13.06 – інформаційні технології); д-р. тех. наук, проф. Т. І. Русакова (05.26.01 – охорона праці); канд. тех. наук, доц. А. М. Кулабухов (05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів); д-р. тех. наук, проф. В. В. Авдеев (05.13.03 – системи і процеси управління); д-р. тех. наук, проф. В. О. Габрінець (05.05.03 – двигуни та енергетичні установки); д-р. тех. наук, проф. О. В. Голубек (05.13.03 – системи і процеси управління); канд. тех. наук, доц. Н. С. Ащепкова (05.13.03 – системи і процеси управління); канд. тех. наук, доц. С. О. Полішко (05.02.01 – матеріалознавство); канд. тех. наук, доц. О. В. Бондаренко (05.02.08 – технологія машинобудування) та інші. У засіданні також брали участь док. техн. наук, ст. дослідник Гусарова І.О., канд. фіз.-мат. наук, доц. Ліповський В.І.

Порядок денний: розгляд і обговорення дисертаційної роботи Сіренка Максима Костянтиновича «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки», представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 - «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Дисертацію виконано на кафедрі ракетно-космічних та інноваційних технологій фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Тема дисертації затверджена вченою радою Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, науковим керівником призначено кандидата технічних наук, доц. О.В. Карпович (протокол № 4 від 19.11.2020 р.) Підготовка здобувача третього рівня вищої освіти здійснювалася за акредитованою освітньо-науковою програмою «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» зі спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка (Сертифікат про акредитацію освітньої програми № 9835, дійсний до 01.07.2030).

СЛУХАЛИ:

Обговорення дисертації Сіренка Максима Костянтиновича «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки», представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 - «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

За результатами перевірки дисертаційної роботи Сіренка Максима Костянтиновича «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки» на плагіат програмою «StrikePlagiarism» виявлено унікальність тексту, яка складає 95,80%. Таким чином, на підставі перевірки зроблено висновок: робота Сіренка М.К. має високий рівень оригінальності і може бути допущена до захисту.

Перевірку на плагіат здійснювала комісія у складі: д-р. тех. наук, декан фізико-технічного факультету А. Ф. Санін; канд. тех. наук, доц. кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій С. О. Полішко; канд. тех. наук, доц. кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій О. В. Бондаренко.

Робота виконана на 4,19 авторських аркушах. Робота структурована, є анотація, зміст, вступ, основна частина, висновки, перелік джерел і додатки.

Доповідь М. К. Сіренка:

Доброго дня, шановна комісія, шановні присутні на даному семінарі. Тема моєї дисертаційної роботи на здобуття степені доктора філософії – Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки. Науковий керівник – Карпович Олена Володимирівна, доцент кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій, кандидат технічних наук. Актуальність теми полягає в тому, що проблеми підвищення експлуатаційних характеристик деталей та виробів, що отримані методами пошарового синтезу, вони актуальні і по сей день, як у сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки, так і взагалі. Тому що збільшується використання адитивного виробництва для виготовлення виробів прямого вжитку, і в авіаційній та ракетно-космічній техніці, і потреба підвищення експлуатаційних характеристик пов'язана в перш за все для підвищення питомих механічних властивостей для покращення масової досконалості техніки. Існують декілька способів підвищення характеристик виробів з полімерних матеріалів, отриманих методами пошарового синтезу, але основний і найбільш дієвий з них – використання полімерних композиційних матеріалів. За рахунок наявності в полімері матеріалу наповнювача, який має вищі механічні характеристики, кінцевий матеріал також має вищі характеристики, в порівнянні з базовим полімером. Таким чином покращуються експлуатаційні характеристики виробу. Пошаровий синтез взагалі дозволяє виготовляти вироби більш складної геометричної форми, дозволяє легше отримувати вироби, що пройшли оптимізацію форми. Вони мають більш складну геометрію, яку було б складно або неможливо виготовити традиційними способами мехобробки. І також можливо виготовлення деталей в готовому стані, як одна деталь, що актуально для виробів, які традиційно виготовляються як складальний комплект з декількох деталей. Також, оскільки методи пошарового синтезу – адитивне виробництво, коефіцієнт використання матеріалу набагато вищий через те, що немає видалення матеріалу з заготовки, а матеріал побудови просто додається, за рахунок чого і створюється деталь.

Мета дослідження - підвищення механічних та експлуатаційних властивостей виробів з полімерних композиційних матеріалів на основі нових конструктивних і технологічних рішень з використанням методів 3D-друку. Наступні завдання були поставлені і розв'язані у дослідженні для досягання мети: проаналізувати та визначити основні досягнення та недоліки існуючих технологій пошарового синтезу полімерних композиційних матеріалів; дослідити вплив технологічних параметрів на експлуатаційні властивості виробів з полімерних композиційних матеріалів, що отримані методами пошарового синтезу; обґрунтувати вибір матеріалів

матриці та армуючих елементів; розробити конструкцію і виготовлено технологічне оснащення; дослідити вплив параметрів 3D-друку на структуру і властивості отриманого матеріалу; розробити раціональні схеми і режими отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів з використанням методу 3D-друку, та провести моделювання композиційного матеріалу і виробу з урахуванням реальних умов експлуатації для підтвердження експериментальних даних.

Об'єкт дослідження – пошаровий синтез виробів з полімерних композиційних матеріалів. Предмет дослідження – схеми, методи та параметри технології виготовлення полімерних композиційних матеріалів пошаровим синтезом. Методи дослідження – при проведенні дослідження використані методи дослідження структури матеріалу, випробування механічних властивостей, методи твердотільного моделювання, методи чисельного моделювання з розрахунковою симуляцією методом скінчених елементів. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами - дисертаційна робота виконана в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара в рамках держбюджетної теми «Створення і удосконалення технологій і матеріалів для ракетних засобів ураження на основі інноваційних конструкторсько-технологічних рішень», № державної реєстрації 0123U101855. Апробація матеріалів дослідження - по матеріалам дослідження були опубліковані 4 статті у фахових журналах категорії Б, опубліковані тези доповідей у збірках тез Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції «Людина і Космос» 2023, 2024 і 2025 років та міжнародної конференції Challenges and Issues of Modern Science у 2023 та 2024 роках.

Перший розділ був присвячений аналізу тенденцій використання технологій, методів, та матеріалів для пошарового синтезу деталей з полімерних та полімерних композиційних матеріалів. Пошаровий синтез, який включає в себе певну сукупність технологій адитивного виробництва, які полягають в тому, що вироби виготовляються додаванням матеріалу вихідної сировини, на відміну від традиційних способів виробництва, у яких матеріал видаляється з заготовки певного об'єму та форми. Виходячи з цього, одна з переваг технологій пошарового синтезу – покращення коефіцієнту використання матеріалу у виробництві та зменшення об'ємів заготівельних операцій через відсутність потреби отримувати заготовки чи мати заготівельне виробництво, таке як лиття, штампування або пресування. Оскільки виріб виготовляється в стані готового для використання умовно за одну операцію, це зменшує потребу у технологічних пристроях для утримання і встановлення заготовок та деталей між операціями, в порівнянні з традиційними видами виробництва. Пошаровий синтез дозволяє проектувати та виготовляти вироби, що було б складно або неможливо виготовити традиційними технологіями. Через можливість більш вільного проектування, вироби можуть виготовлятися з меншої кількості деталей чи взагалі як одна деталь. Також це дозволяє розробляти і виготовляти вироби з оптимізованою топологією.

Було розглянуто деякі види пошарового синтезу, які найбільш популярні авіаційній та ракетно-космічній промисловості, а саме – Stereolithography та Direct Light Processing, Fused Deposition Modeling, PolyJet та Binder Jetting.

Було вибрано як способи для подальшого дослідження FDM та SLA/DLP. FDM має широкий асортимент матеріалів, низьку вартість матеріалів, високу ударну в'язкість полімерів, що використовуються. Він використовується для масово-габаритних зразків, для прототипування, різних технологічних пристроїв і обладнання, для інструментів, для ремонтних деталей, а також для виготовлення деталей БПЛА (безпілотних літальних апаратів) або ракет-носіїв надлегкого класу. SLA та DLP (Stereolithography та Direct Light Processing) мають набагато високу точність, вищу якість поверхні та вищу швидкість синтезу. Але на відміну від термопластичних полімерів, смола яка в них використовується, набагато більш крихка. Тому зазвичай цей спосіб використовується для виробництва зразків зразки для аеродинамічних випробувань, майстер-моделі для лиття.

Були проаналізовані полімерні матеріали для пошарового синтезу для FDM (Fused Deposition Modeling) друку. Вони були умовно розділені на два типи – стандартні та інженерні. Стандартні філаменти використовуються в усіх професійних рівнях, тобто від домашніх і аматорських принтерів до професійних і промислових установок. Інженерні, тобто високотемпературні філаменти, навпаки мають призначення для деталей з високими експлуатаційними вимогами, для використання в установках професійного рівня. Вони всі потребують друку при більш високій температурі, потребують закритої друкувальної камери і температури сопла друкувальної головки більше 320 градусів.

Були розглянуті існуючі технології і методи виготовлення полімерних композиційних матеріалів пошарового синтезу, були наведені 6 основних методів армування. Відповідно, наведені їх переваги і недоліки. В якості основних недоліків, які були визначені для подальшого дослідження, це: неможливість вибіркового армування виробів в межах шару, недотримання неперервності волокна і однорідності волокна в межах шару, і наявність домішок у препрегу, що зменшує точність прогнозування результатів. Як завдання до подальшого дослідження встановлені: дослідити вплив технологічних параметрів на експлуатаційні властивості виробів з полімерних композиційних матеріалів, обґрунтувати вибір матеріалів матриці та армуючих елементів, розробити раціональні схеми і режими отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів з використанням методу 3D-друку, розробити конструкцію і виготовити технологічне оснащення, дослідити вплив параметрів 3D-друку на структуру і властивості отриманого матеріалу і провести моделювання композиційного матеріалу і виробу з урахуванням реальних умов експлуатації.

Матеріали і методи досліджень, це розділ 2. У якості основного матеріалу було прийнято рішення використовувати стандартні філаменти. Інженерні філаменти не підходять, по-перше, складність або неможливість маніпуляцій з технічним обладнанням в камері побудови, і обмеження по конструкціям 3D-принтерів, що накладає обмеження на конструкцію технологічного обладнання. Особливості використання волокна при пошаровому синтезі полягають в тому, що воно має фізичну присутність, створює додаткові пори; викликає нерівномірне охолодження через контакт полімеру з волокном, що має відмінну від основного полімеру теплоємність; погіршення міжшарової адгезії через наявність волокна; і те що во-

но повинно бути просушене та очищене для попередження виникнення бульбашок та погіршення зчеплення волокна з полімером. Через вимоги по полімеру, а саме – якісну міжшарову адгезію, малий коефіцієнт розмірної усадки та добра текучість у розплавленому стані, був обраний полімер соРЕТ.

Серед волокон армування розглядались скловолокно, вуглецеве волокно та базальтове. По недолікам і перевагам було обрано базальтове волокно, хоча воно має доволі середні характеристики, але через його технологічну легкість роботи з ним, було прийняте рішення використовувати саме його.

Структура та схема розробленого методу армування. Перед розробкою методу армування було поставлено умови до нього, тобто: забезпечення неперервності волокна, створення прогнозованої ортотропії, забезпечення міжшарової неперервності для мінімізації дефектів закріплення волокна біля межі шару, контроль положення одиничних волокон, утримання положення волокна відносно деталі впродовж всього процесу 3D-друку і дотримання натягу волокна для попередження його зміщення під час руху сопла друкувальної головки поверх або поблизу нього.

Сутність розробленого методу армування: одиничні волокна, нитки або джгути композиційного волокна прокладаються набором між шарами деталі безпосередньо в процесі 3D-друку. Спочатку, при підготовці до друку, нарізається необхідний комплект волокна, ці волокна закріплюються в технологічному обладнанні, виконується друк декількох шарів без армування, після чого йде пошарове прокладання армуючого волокна, відповідно до заданої структури армування. Це може бути прокладання через кожний шар надрукованого полімеру, через два шари, три і так далі. Після закріплення кожного шару волокна задрукуванням не виконується обрізання матеріалу – зберігається суцільність не тільки в межах шару, а і міжшарова суцільність.

Структуру і схему розробленого методу армування графічно показано на слайді. Є волокно, яке йде між шарами пластику на зображенні. Волокно жовтим кольором, пластик – сірим, і деякі фото процесу армування.

Методи дослідження були розглянуті, в основному. Для дослідження були обрані методи випробування на розтяг. Випробування на розтяг можливі з використанням стандартів та обладнання, яке використовується для металевих матеріалів. Відповідно до стандарту ДСТУ ISO 6892-1:2019 були зроблені зразки, наведений ескіз зразків та характеристики машини, на якій проводились випробування. Було розроблено технологічне обладнання, яке складається з нерухомої частини, яка встановлюється на платформу побудови, та рухомої частини, яка використовується для утримання волокна.

Випробування на міцність – досліджувалися два варіанта зміни параметрів. Це зміна відстані між шарами армування та зміна щільності заповнення деталі. Наведені параметри друку, наведено виготовлення зразків, зразки з армуванням. Зовнішній вид зразків перед і після випробувань. Результати випробувань рознесені по варіантам. Проаналізовані діаграми і зроблені апроксимуючі формули, залежності, вони представлені на графіках.

Було встановлено, що в порівнянні з базовим зразком без армування, найбільший приріст міцності забезпечується армуванням в кожному шарі, тобто – з відстанню армування 0.3 мм, і відстань між шарами армування є основним фактором впливу на кінцеві характеристики матеріалу.

Розділ 4 – розрахунок деталі для верифікації. Була створена за допомогою CAD деталь, з урахуванням її реальних експлуатаційних параметрів і реального впливу сил на неї. Була проведена симуляція методом кінцевих елементів для визначення сили руйнування і проведені експериментальні дослідження для порівняння розрахункового та фактичного навантаження.

Основні висновки:

- У процесі дослідження було розглянуто поточний стан пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів. Основним недоліком було прийнято недотримання суцільності армуючого волокна в межах шару та неможливість точно та вибірково контролювати положення армуючого волокна в межах шару
- Досліджено вплив технологічних параметрів на експлуатаційні властивості виробів з полімерних композиційних матеріалів, що отримані методами пошарового синтезу. Так, встановлено, що відстань між шарами армування є значущим та основним фактором впливу на кінцеві характеристики отриманих виробів. Встановлена пряма залежність між зменшенням відстані між армованими шарами та збільшення властивостей міцності виробу.
- Обґрунтування вибору основного матеріалу полімеру та матеріалу армування проведено відповідно до критеріїв мінімізації впливу технологічних недоліків та можливості експериментального проведення армування. Так, у якості основного матеріалу був обраний представник стандартних полімерів, соРЕТ, а в якості волокна армування – базальтове волокно.
- Для виконання розробленого методу армування було створено технологічне оснащення, що встановлюється на 3D-принтер.
- Досліджено вплив параметрів 3D-друку на властивості отриманого матеріалу. Так, хоча основним фактором впливу на характеристики виробу є відстань між шарами волокна армування, щільність структур заповнення також впливає на міцність та модуль пружності матеріалу. Було встановлено пряму залежність між збільшенням щільності заповнення та підвищенням механічних характеристик матеріалу.
- Встановлено, що за раціональних умов армування та режимів друку, в порівнянні з референсним зразком, межа міцності збільшується на 81%, до 57,1 МПа, межа плинності – на 95% до 51,5 МПа, а модуль пружності – на 109% до 3,24 ГПа.
- Проведено моделювання композиційного матеріалу і виробу з урахуванням реальних умов експлуатації. Потреба у цьому пов'язана з тим, що експлуатаційні властивості деталі, отриманої з використанням методу 3D-друку, залежать не лише від властивостей матеріалу, а й від геометрії деталі та напрямків впливу навантажень на неї.

Як наукову та практичну новизну можна винести наступне.

Наукова новизна:

- розроблено нові схему та метод армування деталей волокном в процесі пошарового синтезу для отримання полімерного композиційного матеріалу, які полягають у тому, що армування виконується прокладанням волокна між друкованими шарами основного полімеру з збереженням суцільності волокна;
- встановлено, що армування деталей базальтовим волокном дозволяє підвищити, у випадку найкращих характеристик в залежності від параметрів армування, межу міцності армованого матеріалу на 80% та модуль пружності на 101% по відношенню до неармованого матеріалу;
- доведено, що основним фактором впливу на характеристики виробу є відстань між армованими шарами і встановлена залежність властивостей полімерного композиційного матеріалу від щільності заповнення деталі і відстані між шарами армування. Це дозволяє прогнозувати властивості кінцевого полімерного композиційного матеріалу та активно впливати на них шляхом зміни параметрів армування та 3D-друку;
- з використанням розробленої моделі армованого полімеру отримано значення властивостей виробів, виготовлених з використанням методів 3D-друку.

Практична цінність:

- розроблена схема і метод армування виробів волокном при використанні FDM/FFF 3D-друку, з описом впливу технологічних параметрів друку та рекомендацій щодо їх вибору, розроблено технологічне оснащення для армування, що встановлюється на 3D-принтер з кінематикою типу Delta і прийоми виконання армування;
- запропоновано та обґрунтовано методику механічних випробувань полімерних композиційних матеріалів з шароватою структурою, що отримані методом 3D-друку;
- результати дослідження впроваджені в освітній процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара та Національного центру аерокосмічної освіти молоді імені О.М. Макарова (акти впровадження прикладені в додатках А і Б).

Дякую за увагу, доклад завершено.

ЗАПИТАННЯ ТА ВІДПОВІДІ:

Питання канд. тех. наук, доц. Бучарського В.Л. :

Яке відношення ця робота має до спеціальності 134 Авіаційна та ракетно космічна техніка?

Відповідь: Деталі, які були розглянуті, в тому числі та, що була виготовлена для верифікаційного дослідження, використовуються в ракетно-космічній техніці. Деталь, що виготовлена для верифікаційного дослідження, є частиною механізму розділення на ракеті-носії Ariane 4. Перелік деталей, для виготовлення яких може бути використаний даний метод армування, наведений по тексту дисертації.

Ця верифікаційна деталь підпадає під особливості 3D-друку? Чим зумовлений вибір такої деталі?

Відповідь: Ця деталь була взята, щоб показати відповідність властивостей матеріалу в не залежності від форми деталі, тому що характеристики матеріалу були отримані для стандартних зразків випробувань на розтяг. Але одна з особливостей 3D-друку у тому, що експлуатаційні властивості деталі залежать від матеріалу і від геометрії деталі.

Питання док. тех. наук, проф. Дроня М.М.:

Не зважаючи на дуже широкий охват, чи мали якесь впровадження в проєкті «Студентська ракета»?

Відповідь: Так, для виготовлення деталей наземного обладнання. Для випробувального стенду, як деталь у частині стенду випробувань двигуна.

Які у вас показники були, коли ви визначали, чи підходить матеріал? Це питома міцність чи питома жорсткість?

Відповідь: Питома міцність та технологічність матеріалу.

Питання канд. фіз.-мат. наук, доц. Ліповського В.І.:

Ми знаємо, що композити мають ортотропію властивостей. Коли ви зробили експеримент, то чому не прив'язали значення механічних властивостей до конкретної структури ортотропії? У вас не визначено як воно прив'язано до лутку, вздовж чи поперек, як воно прив'язано?

Відповідь: Ці результати отримані для структури, коли випробування на розтяг виконувались саме вздовж волокна.

Це необхідно показати. У вас може бути різна структура, різний напрямок навантаження... Температура – це теж важливий фактор.

Відповідь: Це внесено по тексту в дисертації. Вироби, що виготовлені таким методом, повинні розроблятися та виготовлятися так, щоб напрям експлуатаційного зусилля діяв вздовж напрямку волокна. Вздовж волокна досягаються найбільші механічні характеристики.

Питання док. тех. наук, ст. досл. Гусарової І.О.:

Чому ви вибрали базальтове волокно, а не вуглецеве, яке має більш кращі характеристики і більш широко застосовується в ракетно-космічній техніці?

Відповідь: Базальтове волокно, хоча і має нижчі показники міцності і жорсткості, було обрано через більшу технологічність. Через потребу знімати опрєтування у випадку вуглецевого волокна, воно ламке, схильне до розпушування. Було обрано базальтове волокно, тому що воно більш технологічне в цьому плані.

Ви вдосконалювали технологію за рахунок доопрацювання програмного забезпечення чи апаратури?

Відповідь: В основному апаратну частину. В програмному забезпеченні лише вводились технологічні паузи і відведення друкувальної головки.

Питання канд. тех. наук, доц. Карповича І.І.:

Чи користувались ви методиками для прогнозування властивостей матеріалу і порівнювали з дослідними зразками?

Відповідь: Безпосередньо такої методики немає. Є прогнозування, яке включає в себе розрахування налаштувань параметрів армування за апроксимаційними залежностями.

Тобто тільки емпіричний метод?

Відповідь: Ні, використовувались як експериментальні методи, так і чисельні розрахунки властивостей.

Чи є там адгезія? Який тип взаємодії волокна з матрицею?

Відповідь: Не використовується додаткове нагрівання і процес відбувається при атмосферному тиску. Взаємодія виключно за рахунок механічного зчеплення.

Питання канд. тех. наук, доц. Дуднікова В.С.:

Чи розглядали ви потенційну можливість патентного захисту вашої технології?

Відповідь: Ні, не розглядав, можливо варто розглянути в проміжку часу до захисту.

Питання доктора. тех. наук, проф. Давидова С.О.:

Чи було порівняння з механічною обробкою, наприклад по масі деталі? Чи було порівняння по вартості?

Відповідь: Дослідження по масі не проводилось, так як проводилось дослідження саме в спектрі пошарового синтезу полімерних матеріалів. Порівняння по вартості також не проводилось.

На графіках тільки три точки? Як планувався експеримент, чому так мало точок?

Відповідь: При дослідженні, наприклад, відстані між шарами армування, ми обмежені кроком товщини шару, і ми обмежені максимальним розміром зразка. Товщина одного шару – 0,3 мм, при іншому шарі можливо брати іншу товщину шару.

Питання канд. тех. наук, доц. Лабуткіної Т.В.:

Ви говорили, що шар, на який викладаються нитки, це абсолютно жорстка поверхня. Як вам здається, можливо краще було б врахувати у моделі процесу, у технології виготовлення, що матеріал прогинається під ниткою?

Відповідь: Матеріал, який екструдуюється, виходить в в'язкому стані, але він застигає в процесі друку цього шару. Нитка просто спирається на надруковану поверхню, звичайно з натягом, але таких ефектів, щоб нитка проминала пластик, немає.

ВИСТУП НАУКОВОГО КЕРІВНИКА:

О.В. Карпович, кандидат тех. наук, доцент кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій

Максим Костянтинів Сіренко вже давно пов'язаний з нашою кафедрою. Він навчався і студентом і аспірантом, і тут же на кафедрі виконував свою дисертаційну роботу. Звісно, під час виконання, як і в усіх, були відповідні труднощі, які пов'язані як і з виготовленням нового оснащення, так і з виконанням експериментів, випробувань. Але, не зважаючи на такі труднощі, тому ще тема нова, по ній мало матеріалу. Є деякі експериментальні повідомлення в Інтернеті, і довести це до наукового дослідження було, скажімо так, досить важко, тому що немає хороших методик. Незважаючи на те, Максим Костянтинів зміг побороти всі труднощі і отримати цікаві і нові результати. Міцність матеріалу підвищилась

майже в 1,8 разів. Це гарний показник, який можна використовувати для будь-яких деталей, не тільки в РКТ. Незважаючи на те, що робота спрямована тільки на розвиток єдиного варіанту армування, вона відкриває новий напрямок дослідження з керування направленням волокна за конструкцією деталі та за напрямком навантаження. Особливість цього методу – використання звичайного 3D-принтеру, який можна оснастити додатковим обладнанням для армування, і таким чином отримати потрібний матеріал. Тому я вважаю, що результати отримані як в науковому плані, так і в практичному плані дуже гарні. Вони відображають суть роботи і дозволяють продовжити це дослідження, відкрити новий напрямок досліджень, отримати ще кращі результати. Але для дисертаційної роботи і для того, як діапазону досліджень, які ми планували, ми практично все виконали. Я зі свого боку вважаю, що робота завершена, і пропоную роботу Сіренка Максима Костянтиновича рекомендувати до захисту. Дякую.

В ОБГОВОРЕННІ ДИСЕРТАЦІЇ М.К. СІРЕНКА ВЗЯЛИ УЧАСТЬ:

Доктор. тех. наук, проф. Санін А.Ф.: запропонував всім взяти участь у обговоренні представлених результатів.

Канд. тех. наук, ст. викл. Колесніченко О.В.: Стосовно мети дослідження – можливо варто додати пункт, наприклад – удосконалення технології виготовлення та поліпшення механічних характеристик за рахунок вибіркового армування силових елементів, можливо таке. Я хотів би додати наступне, що знаю Максима Костянтиновича вже давно, ще як студента. Пам'ятаю, як він піклувався за всю групу, допомагав одногрупникам. Стосовно того, що це дуже серйозна людина, дуже відповідально відноситься до своєї роботи. Тому я думаю, що рекомендуючи до захисту його дисертацію, ми зробимо вірно.

Секретар міжкафедрального семінару канд. тех. наук Лабуткіна Т.В.:

З науковою роботою Сіренка М.К. ми вже знайомі. Спостерігаючи дослідження Сіренка М.К. ми бачили, як розвивалась ця наукова робота. Вона завжди викликала інтерес, запитання, спонукала до обговорень. За останній рік дисертаційне дослідження Сіренка М.К. набуло вже такого високого класу, що може бути рекомендовано до захисту. Безумовно підготовлена робота може бути рекомендована до захисту і як кваліфікаційна, автор якої вже є фахівцем відповідного рівня, і як якісне, завершене наукове дослідження.

Кандидат тех. наук, доц. Карпович І.І.:

Я згоден, що робота повністю завершена, і її можна рекомендувати до захисту. Хочу також нагадати, що Сіренко М.К. стояв у витоків створення лабораторії 3D-друку на фізико-технічному факультеті Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Саме він складав, створював великий принтер з габаритами зони друку 1000 мм x 400 мм x 400 мм. Сіренко М.К. також багато працював щодо вдосконалення інших видів принтерів лабораторії, виготовляв пристрої та обладнання для лабораторії, і при цьому навчався у аспірантурі, в інженерній школі. Фактично, вже декілька років максимум очолює лабораторію 3D-друку. І завжди в нього вистачає час на активну участь у виставках, у профорієнтаційній

роботі. Сіренко М.К. не тільки вчений, а й добрий працівник. Так що я підтримую.

ВИСНОВОК

Актуальність теми дисертації. Проблема підвищення експлуатаційних характеристик деталей та виробів, що отримані методами пошарового синтезу, залишається актуальною і по цей день. Особливо це пов'язано зі збільшенням використання адитивного виробництва виробів прямого вжитку в сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки. Це пов'язано з потребами підвищення питомих механічних властивостей для покращення масової досконалості техніки та зменшення сухої ваги конструкції.

Зокрема, один із методів підвищення характеристик полімерних виробів – використання полімерних композиційних матеріалів замість звичайних однокомпонентних полімерів. За рахунок наявності наповнювача з більш високими параметрами міцності, полімерні матеріали мають вищі характеристики в порівнянні з базовим полімером. Таким чином, навіть без зміни до конструкції виробів покращується міцність та/або жорсткість деталей, що підвищує їх допустимі навантаження. Найбільший приріст експлуатаційних характеристик та коефіцієнту масової досконалості виробів може бути досягнутий поєднанням використання полімерних композиційних матеріалів з виготовленням деталей методами пошарового синтезу. Пошаровий синтез дозволяє виготовляти вироби більш складної геометрії та форм, отриманих в результаті оптимізації топології. У більшості випадків виробництво таких топологічно-оптимізованих виробів традиційними способами виробництва набагато складніше або взагалі неможливе, через потреби використання технологічних пристроїв складної конструкції та необхідність обробки форм складної просторової конфігурації. Методи пошарового синтезу дозволяють суттєво зменшити потребу у обробці складної геометрії, бо виріб виготовляється методами синтезу вже в готовому вигляді з набагато меншим об'ємом операцій подальшої обробки. Також, оскільки методи пошарового синтезу є адитивним виробництвом, коефіцієнт використання матеріалу у такому виробництві набагато вищий.

Таким чином, вдосконалення технологій пошарового синтезу з полімерних композиційних матеріалів залишається актуальним завданням для підвищення експлуатаційних характеристик виробів та покращення масової досконалості.

Затвердження теми та плану дисертації. Тема дисертації «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки» затверджена вченою радою Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, науковим керівником призначено кандидата технічних наук, доц. О.В. Карпович (протокол № 4 від 19.11.2020 р.).

Особистий внесок автора. Автором дисертаційної роботи самостійно критично проаналізовано фахову наукову літературу за тематикою дослідження, відібрано та опрацьовано технічний матеріал для досліджень, проведено розрахунки та експе-

рименти, здійснено аналітичну обробку отриманих результатів. Сформульовано основні положення дисертаційної роботи, практичні рекомендації та висновки. Підготовлено до друку наукові праці, в яких викладено основні положення дисертації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, які сформульовані в дисертації. Достовірність ґрунтується на значному обсязі фактичного матеріалу, використанні необхідних та сучасних теоретичних та експериментальних методів, методів аналізу даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблено нові схему та метод армування деталей волокном в процесі пошарового синтезу для отримання полімерного композиційного матеріалу, які полягають у тому, що армування виконується прокладанням волокна між друкованими шарами основного полімеру з збереженням суцільності волокна;

2. Встановлено, що армування деталей базальтовим волокном дозволяє підвищити, у випадку найкращих характеристик в залежності від параметрів армування, межу міцності армованого матеріалу на 80% та модуль пружності на 101% по відношенню до неармованого матеріалу;

3. Доведено, що основним фактором впливу на характеристики виробу є відстань між армованими шарами і встановлена залежність властивостей полімерного композиційного матеріалу від щільності заповнення деталі і відстані між шарами армування. Це дозволяє прогнозувати властивості кінцевого полімерного композиційного матеріалу та активно впливати на них шляхом зміни параметрів армування та 3D-друку;

4. З використанням розробленої моделі армованого полімеру отримано значення властивостей виробів, виготовлених з використанням методів 3D-друку.

Практичне значення результатів дослідження.

1. Розроблена схема і метод армування виробів волокном при використанні FDM/FFF 3D-друку, з описом впливу технологічних параметрів друку та рекомендацій щодо їх вибору, розроблено технологічне оснащення для армування, що встановлюється на 3D-принтер з кінематикою типу Delta і прийоми виконання армування;

2. Запропоновано та обґрунтовано методику механічних випробувань полімерних композиційних матеріалів з шароватою структурою, що отримані методом 3D-друку;

3. Результати дослідження впроваджені в освітній процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара та Національного центру аерокосмічної освіти молоді імені О.М. Макарова.

Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих працях та особистий внесок у них автора. Основні матеріали дисертаційної роботи відображено у 4 статтях у вітчизняних фахових виданнях категорії Б, 5 матеріалів міжнародних та вітчизняних конференцій.

Публікації Сіренка М.К. відповідають вимогам пп. 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня

доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами).

Список робіт, опублікованих за темою дисертації, та конкретний внесок здобувача:

1. Сіренко, М., & Карпович, О. (2023). Перспективи розвитку 3d-друку виробів у авіаційній та ракетно-космічній галузі із полімерних матеріалів з композиційним армуванням. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 9-14. <https://doi.org/10.15421/452202> (стаття фахова, категорії Б) (особистий внесок: збір та систематизація інформації про досягнення та недоліки існуючих технологій, аналіз можливостей використання адитивних технологій в галузі)

2. Сіренко, М., & Карпович, О. (2023). Моделювання вузла подавання армуючого волокна при 3d-друку виробів із полімерних матеріалів з композиційним армуванням у авіаційній та ракетно-космічній галузі. *Journal of Rocket-Space Technology*, 31(4), 116-120. <https://doi.org/10.15421/452315> (стаття фахова, категорії Б) (особистий внесок: аналіз переваг і недоліків типів волокна, розробка моделі подавального пристрою та виготовлення його, дослідження працездатності різних тяглових елементів)

3. Сіренко, М., & Карпович, О. (2024). Методи контролю якості деталей РКЛА, що виготовлені методом 3d-друку з композиційних полімерних матеріалів. *Journal of Rocket-Space Technology*, 33(4-27), 55-61. <https://doi.org/10.15421/452408> (стаття фахова, категорії Б) (особистий внесок: збір та систематизація інформації про типи та види способів аналізу, контролю та досліджень, аналіз особливостей їх використання для виробів з полімерних та полімерних композиційних матеріалів, що отримані методом 3d-друку)

4. Сіренко, М., & Карпович, О. (2025). Експериментальне дослідження міцносних характеристик деталей армованих композиційним волокном. *Journal of Rocket-Space Technology*, 34(1), 31-38. <https://doi.org/10.15421/452503> (стаття фахова, категорії Б) (особистий внесок: розробка методу та способу армування, розробка та виготовлення технологічного обладнання, виготовлення зразків для випробувань)

Список публікацій, які засвідчують апробації матеріалів дисертації

1 М.К. Сіренко, О.В. Карпович. Розробка способу пошарового армування волокном деталей РКЛА при FFF 3d-друці // XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос». Збірник тез. – 2023. С. 205.

М.К. Сіренко, О.В. Карпович, Н.С. Носкова. Розробка вузла подавання армуючого волокна при FDM 3D-друці виробів для РКЛА // XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос». Збірник тез. – 2024. С. 232.

М.К. Сіренко, О.В. Карпович. Методи наповнення композиційним волокном деталей РКЛА, що були отримані методами адитивного виробництва. // XXVII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос». Збірник тез. – 2025. С. 280.

Sirenko, M., & Karpovych, O. (2023). Improvement of the reinforcing fiber feed node for 3D printing of composite-reinforced products. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 160-164. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/31>

Sirenko, M., & Karpovych, O. (2024). Improvement of reinforcement technique of parts with composite fiber in FDM 3D-printing. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 148-152. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/170>

На підставі заслуховування та обговорення доповіді М.К. Сіренка про основні положення дисертаційної роботи, питань та відповідей на них, виступів фахівців

УХВАЛИЛИ:

1. Вважати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованості, наукової та практичної цінності здобутих результатів дисертація Сіренка Максима Костянтиновича на тему «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки» відповідає вимогам, викладеним у «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44).

2. Рекомендувати дисертацію Сіренка Максима Костянтиновича на тему «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки» до захисту в спеціалізованій вченій раді для разового захисту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

3. Клопотати перед вченою радою університету розглянути питання про створення спеціалізованої вченої ради для разового захисту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка Сіренка Максима Костянтиновича у такому складі:

№ з/п	Прізвище, ім'я по батькові	Місце основної роботи. Підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності за якою захищена дисертація. Рік присудження	Вчене звання	Наукові публікації
1	Санін Анатолій Федорович (голова)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Міністерство освіти і науки України,	Доктор технічних наук, 05.02.01 - матеріалознавство, 2003 р.	професор за кафедрою технології виробництва, 2005 р.	1. Кулик, О., Санін, А., Солнцев, В., Сухий, К., Зайчук, О., & Карпович, І. (2023). Конструкторсько-технологічна система з розробки і експлуатації надлегких суборбітальних ракетних комплексів. <i>Journal of Rocket-Space Technology</i> , 31(4), 88-105.

№ з/п	Прізвище, ім'я по батькові	Місце основної роботи. Підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності за якою захищена дисертація. Рік присудження	Вчене звання	Наукові публікації
		декан фізико-технічного факультету			https://doi.org/10.15421/452312 (стаття фахова, категорії Б) 2. Yermakhanova, A., Sanin, A., Meirbekov, M., & Baiserikov, B. (2021). Investigation of dielectric and strength properties of organoplastics. Review. <i>Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources</i> , 322(3), 89–102. https://doi.org/10.31643/2022/6445.3 3 (індекс Scopus) 3. Шашко, Ю., Кулик, О., Максимчук, Р., & Санін, А. (2021). Election of optimal methods for cleaning blades of closed monowheels of turbopump units obtained by the additive method of direct laser powder sintering. <i>Aerospace Technic and Technology</i> , 0(4), 53-62. https://doi.org/10.32620/akt.2021.4.08 08 (стаття фахова, категорії Б)
2	Гусарова Ірина Олександрівна (опонент)	Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», провідний науковий співробітник	Доктор технічних наук, 05.02.01 - матеріалознавство, 2021 р.	Старший дослідник, 2022 р.	1. Гусарова, І. О., Потапов, О. М., Горелов, Б. М., Манько, Т. А., & Фролов, Г. О. (2024). Композиційні термостійкі матеріали для багатофункціонального покриття. <i>Космічна наука і технологія</i> , 28(1), 43–50. https://doi.org/10.15407/knit2022.01.043 (стаття фахова, категорії Б) 2. Роменская, О. П., Манько, Т. А., & Гусарова, И. А. (2022). Плазменная обработка, как метод повышения реакционной способности угленаполнителя, при взаимодействии с эпоксидной матрицей. <i>System Design and Analysis of Aerospace Technique Characteristics</i> , 27(2), 130-135. https://doi.org/10.15421/471932 (стаття фахова, категорії Б) 3. Евдокименко, Ю., Гусарова, И., Фролов, Г., Кисель, В., Боровик,

№ з/п	Прізвище, ім'я по батькові	Місце основної роботи. Підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності за якою захищена дисертація. Рік присудження	Вчене звання	Наукові публікації
					Д., & Бучаков, С. (2021). Thermal characteristics of the heat protection package of the engine body at programmed heating. <i>Aerospace Technic and Technology</i> , 0(4sup1), 74-82. doi: https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4sup1.11 (стаття фахова, категорії Б)
3	Аджамський Сергій Вікторович (опонент)	Інститут транспортних систем і технологій НАН України, старший науковий співробітник	Доктор філософії, 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка, 2021 р.	-	1. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., & Baduk, S. (2024). The influence of changing the combinations of the manufacturing parameters using the SLP technology of the main body - post-border - border on the continuity and roughness of the samples. <i>Aerospace Technic and Technology</i> , 0(4sup2), 123-130. doi: https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4sup2.17 (стаття фахова, категорії Б) 2. Adjamskiy S., Kononenko A., Podolskyi R. (2024). Аналіз технологічних способів мінімізації залишкових внутрішніх напружень при SLM. <i>System technologies</i> , 3(152). doi: https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-152-2024-01 (стаття фахова, категорії Б) 3. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., & Baduk, S. (2022). Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy Manufactured by the SLM Method. <i>Science and Innovation</i> , 18(5), 85-94. https://doi.org/10.15407/scine18.05.085 (стаття фахова, категорії А)
4	Дронь Микола Михайлович (реце-	Дніпровський національний університет	Доктор технічних наук, 05.13.03 -	Професор за кафедрою проекту-	1. Dreus, A., Yemets, V., Dron, M., Malaychuk, V., & Dubovik, L. (2023). Prerequisites for creating

№ з/п	Прізвище, ім'я по батькові	Місце основної роботи. Підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності за якою захищена дисертація. Рік присудження	Вчене звання	Наукові публікації
	нзент)	імені Олеса Гончара, Міністерство освіти і науки України, професор кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій	системи і процеси керування, 1999 р.	вання та конструкції, 2001 р.	ultra-light launch vehicles with polymer bodies. <i>System Design and Analysis of Aerospace Technique Characteristics</i>, 32(1), 25-40. https://doi.org/10.15421/472303 (стаття фахова, категорія Б) 2. Dreus, A., Yemets, V., Dron, M., Yemets, M. and Golubek, A. (2022), "A simulation of the thermal environment of a plastic body of a new type of launch vehicle at the atmospheric phase of the trajectory", <i>Aircraft Engineering and Aerospace Technology</i>, Vol. 94 No. 4, pp. 505-514. https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2021-0100 (Scopus) 3. Dreus A. Yu., Dron M. M., Dubovik L. G., Strembovskiy V. V. Assessment of the possibility of using polymers in the bodies of promising launch vehicles based on the heat resistance factor. <i>Space Science and Technology</i>. 2023. 29, № 6 (145). P. 3—12. https://doi.org/10.15407/knit2023.06.003 (стаття фахова, категорія А)
5	Ліповський Володимир Іванович (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, доцент кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій	Кандидат фізико-математичних наук, 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла (технічні науки), 1988 р.	Доцент за кафедрою технічної механіки, 1992 р.	1. Даниленко, В., & Ліповський, В. (2025). Огляд технології плавленого осадження полімерних матеріалів для аерокосмічного застосування. <i>Journal of Rocket-Space Technology</i>, 34(1), 21-30. https://doi.org/10.15421/452502 (стаття фахова, категорія Б) 2. Векілов, С., Ліповський, В., Марчан, Р., Пустовий, Р., & Логвиненко, А. (2024). Експериментальне дослідження шорсткості поверхонь деталей рідинних ракетних двигунів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій. <i>Journal of Rocket-Space Technology</i>, 33(4-29), 23-34.

№ з/п	Прізвище, ім'я по батькові	Місце основної роботи. Підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності за якою захищена дисертація. Рік присудження	Вчене звання	Наукові публікації
					https://doi.org/10.15421/452447 (стаття фахова, категорія Б) З. Векілов, С. Ш., & Ліповський, В. І. (2023). Особливості розвитку методів аддитивного виробництва у застосуванні до РРД. <i>Journal of Rocket-Space Technology</i> , 32(4), 23-38. https://doi.org/10.15421/452326 (стаття фахова, категорія Б)

Усі кандидатури членів ради відповідають вимогам пп. 14, 15 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами).

Результати відкритого голосування:

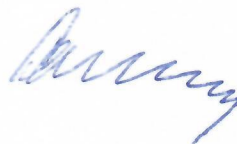
«За» – 21 осіб.

«Проти» – немає.

«Утрималися» – немає.

Рішення прийнято одностанно.

Голова міжкафедрального семінару



Анатолій САНІН

Секретар



Тетяна ЛАБУТКІНА