

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний
(факультет)
Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студента Колесника Іллі Анатолійовича
(ПІБ)

академічної групи 132-22ск-2 ММФ
(шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____
(за наявності)

за освітньо-професійною програмою _____
(офіційна назва)

«Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів»

на тему Удосконалення конструкції спортивного обладнання з обґрунтуванням матеріалу і технології виготовлення
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Сазанішвілі З. В.			
розділів:				
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Сазанішвілі З. В.			
Функціональний аналіз та моделювання об'єкта розробки	Сазанішвілі З. В.			
Інженерно-технологічний	Ротт Н. О.			
Експлуатаційний	Федоряченко С. О.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Гаркавенко Д. В.			

Дніпро
2025

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
конструювання, технічної
естетики і дизайну
(повна назва)

Федоряченко С.О.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеню бакалавра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)**

студенту Колеснику Іллі Анатолійовичу академічної групи 132-22ск-2 ММФ
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою «Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів»

на тему Удосконалення конструкції спортивного обладнання з обґрунтуванням матеріалу і технології виготовлення затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 14.05.2025р. №369-с.

Розділ	Зміст	Термін виконання
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Аналіз стану питання та постановка задач роботи	20.05.2025
Функціональний аналіз та моделювання об'єкта розробки	Проведення функціонально-вартісного аналізу елементів важеля. Інженерний розрахунок. Моделювання та аналіз властивостей за допомогою МСЕ.	05.06.2025
Інженерно-технологічний	Обґрунтування технології термічної обробки та дослідження мікроструктури	15.06.2025
Експлуатаційний	Визначення видів та методів контролю якості тримача ковша навантажувача	20.06.2025

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

Сазанішвілі З. В.

_____ (прізвище, ініціали)

Дата видачі 14.05.2025

Дата подання до екзаменаційної комісії 26.06.2025

Прийнято до виконання

_____ **Колесник І. А.**

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 31 рис., 8 табл., 12 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СТРАХУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ФІТНЕС-ГАЧКИ, НАВАНТАЖЕННЯ, СТАЛЬ, ПОЛІМЕРИ, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ.

Мета роботи – розробка модифікованої конструкції фітнес-гачка з обґрунтуванням матеріалу і технології його виробництва.

Об'єкт дослідження – проектування та аналіз конструкції фітнес-гачка, що включає вибір матеріалів, технологій виготовлення та оцінку їх впливу на безпеку й ефективність експлуатації в умовах навантажень, характерних для важкої атлетики, пауерліфтингу та кросфіту.

У рамках дослідження було проведено аналіз конструкцій фітнес-гачків шляхом вивчення властивостей та можливостей комбінування різних матеріалів, зокрема металів та полімерів, які входять до їх складу. Основну увагу приділено оцінці впливу обраних матеріалів на експлуатаційні характеристики конструкції. Обґрунтовано доцільність використання окремих полімерних і металевих компонентів з метою досягнення їх найбільш ефективного поєднання, яке забезпечує високий рівень безпеки, стійкість до дії навантажень та оптимальні масогабаритні показники.

Отримані результати створюють підґрунтя для розроблення нових стандартів якості, зниження матеріаломісткості виробництва та підвищення конкурентоспроможності вітчизняних виробників на міжнародному ринку. Крім того, отримані дані відкривають перспективи для подальших досліджень у сфері комбінування матеріалів і технологій для створення інноваційного спортивного обладнання.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 РОЗДІЛ. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ	8
1.1 Сучасні тенденції розвитку страхувального обладнання	8
1.2 Аналіз сучасних конструкцій фітнес-гачків і вимог до їх експлуатації.....	10
1.3 Основні матеріали, які використовуються в галузі спортивного обладнання та їх хімічний склад	13
1.4 Постановка задач роботи.....	16
2 РОЗДІЛ. ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ.....	18
2.1 Функціонально-вартісний аналіз моделі фітнес-гачка.....	18
2.2 Побудова 3D-моделі конструкції фітнес-гачка	22
2.3 Модернізація фітнес-гачка	25
2.4 Розрахунок на міцність під час зрізу та зминання.....	28
2.5 Розрахунок МСЕ конструкції фітнес-гачка	31
2.6 Топологічна оптимізація модифікованого фітнес-гачка	37
2.7 Висновки до розділу 2	41
3 РОЗДІЛ. ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	42
3.1 Обґрунтування вибору матеріалів для фітнес-гачка	42
3.2 Технологія виготовлення модифікованої моделі фітнес-гачка.....	45
3.3 Аналіз екологічних аспектів виробництва	49
3.4 Можливості утилізації та переробки	51
3.5 Висновки до розділу 3	54

4 РОЗДІЛ. ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ	56
4.1 Аналіз дефектів, які виникають під час виробництва.....	56
4.2 Методи контролю якості фітнес-гачків.....	59
4.3 Економічна ефективність виготовлення фітнес-гачка з полімерних матеріалів	65
4.4 Висновки до розділу 4	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71

ВСТУП

В Україні зростає інтерес до здорового способу життя, регулярних тренувань і занять спортом, зокрема важкою атлетикою та пауерліфтингом. Це сприяє підвищеному попиту на безпечне та якісне спортивне обладнання, особливо страхувальне, яке забезпечує захист під час виконання вправ із великою вагою. Страхувальне обладнання відіграє ключову роль у тренажерних залах і на змаганнях, мінімізуючи ризики травм і сприяючи прогресу спортсменів.

Страхувальне обладнання включає широкий асортимент конструкцій, таких як силові рами, фітнес-гачки, страхувальні ремені, упори та балки. Ці елементи використовуються для фіксації штанги, підтримки під час вправ (наприклад, жиму лежачи чи тяги) і забезпечення безпеки в разі втрати контролю над вагою. Наприклад, фітнес-гачки, які фіксують штангу в силових рамах, підвищують безпеку під час інтенсивних тренувань.

Різноманітність конструкцій зумовлена специфікою видів спорту та умовами експлуатації. Під час розроблення такого обладнання враховуються випадкові фактори, що виникають у тренувальному чи змагальному процесі, що вимагає розрахунків і випробувань.

Фітнес-індустрія в Україні почала активно розвиватися в 1990–2000-х роках. Сьогодні в країні налічується понад 100 компаній, які займаються виробництвом спортивного обладнання. Серед провідних виробників варто відзначити InterAtletika, TopFitness, Wuotan, MV-Sport, BruStyle, Vasil та «Спорт Світ». Компанія «Спорт Світ», заснована в 1993 році, спеціалізується на виготовленні, зокрема страхувального обладнання для тренажерних залів.

Фітнес-гачки є одним із ключових продуктів цих компаній. Вони забезпечують надійну фіксацію штанги та підвищують безпеку під час тренувань із важкою вагою, що робить їх популярними в пауерліфтингу, важкій атлетиці та кросфіті.

Сучасне виробництво страхувального обладнання спирається на інноваційні матеріали та технології. Високоміцні сплави, ударостійкі полімери та карбонові елементи дозволяють знижувати вагу конструкцій без втрати міцності, а також підвищувати термін їхньої експлуатації. Наприклад, використання карбону в силових рамах забезпечує стійкість до значних навантажень.

Активно застосовуються верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) та адитивні технології, зокрема 3D-друк. Такі методи, як вибіркоче лазерне плавлення, дають змогу виготовляти деталі складної геометрії з високою точністю. Також для створення прототипів і вдосконалення конструкцій спортивного обладнання використовуються FDM-технології.

Впровадження автоматизації у виробництво страхувального обладнання, зокрема фітнес-гачків, значно підвищує точність і ефективність процесів. Однак складність конструкцій і високі вимоги до безпеки роблять контроль якості критично важливим етапом, що потребує застосування автоматизованих систем і залучення спеціалістів із відділу технічного контролю для забезпечення відповідності виробів встановленим стандартам.

Метою даної роботи є створення вдосконаленої моделі фітнес-гачка, обґрунтування оптимальних матеріалів і технологій виробництва для забезпечення достатньої міцності, безпеки та економічної доцільності, а також оцінки експлуатаційних властивостей через комп'ютерне моделювання і симуляцію напружено-деформованого стану.

Результати можуть бути застосовані в проєктуванні безпечних і економічно ефективних фітнес-гачків для тренажерних залів, спортивних центрів і професійних змагань. Вони також можуть бути використані в розробленні інноваційного спортивного обладнання з оптимізованими матеріалами та технологіями виробництва. Крім того, результати сприятимуть створенню нових стандартів якості для страхувального інвентарю в важкій атлетиці, пауерліфтингу та кросфіті.

1 РОЗДІЛ. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ

1.1 Сучасні тенденції розвитку страхувального обладнання

Із зростанням популярності професійного спорту, зокрема важкої атлетики, особливої актуальності набуває питання безпеки спортсменів під час виконання вправ із великою вагою. Важливу роль у цьому процесі відіграє спеціалізоване страхувальне обладнання, серед якого найбільш поширеними є силові рами. До їхнього складу часто входять додаткові елементи: страхувальні упори, фітнес-гачки, ремені безпеки, обмежувачі ходу штанги, амортизаційні платформи, зокрема, компоненти машини Сміта, а також елементи м'якого захисту, такі як накладки для грифу. Сукупність цього обладнання (рис. 1.1) виконує ключову функцію — мінімізацію ризику отримання травм під час тренувань із великою інтенсивністю, а також забезпечення стабільності та безперервності спортивного процесу під час виконання технічно складних вправ.

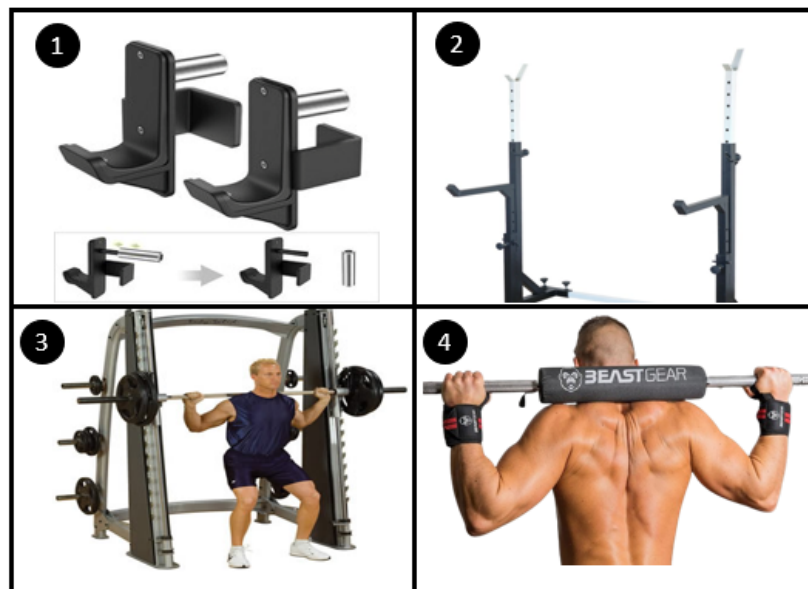


Рисунок 1.1 – Спортивне страхувальне обладнання: 1 – фітнес-гачки для стійки; 2 – страхові упори; 3 – машина Сміта; 4 – накладка для грифу.

Особливу увагу варто звернути на фітнес-гачки, які є ключовим елементом безпеки під час виконання таких вправ, як жим штанги лежачи, присідання зі штангою, станова тяга та інших вправ, де спортсмен працює з великою вагою. Фітнес-гачки встановлюються у спеціальні отвори в силовій рамі або стійці і дозволяють швидко і безпечно зафіксувати штангу в разі втрати контролю над нею. Сучасні моделі мають можливість регулювання висоти установки, а також полімерне покриття для запобігання пошкодження грифа і зниження шуму під час контакту з металом.

Попри значне різноманіття сучасного страхувального інвентарю та відчутний прогрес у його інженерному вдосконаленні, у цій сфері все ще залишаються актуальними низка проблемних аспектів. Зокрема, деякі конструктивні рішення передбачають надмірне використання матеріалів у процесі виробництва, що призводить до збільшення виробничої собівартості та, відповідно, до зростання кінцевої вартості виробу. Крім того, не всі зразки обладнання відповідають вимогам ергономіки, достатнього експлуатаційного ресурсу або ж не здатні ефективно функціонувати в умовах інтенсивних динамічних навантажень, характерних для професійного тренувального процесу.

Тому актуальним є питання удосконалення конструкції фітнес-гачків шляхом використання сучасних матеріалів та інноваційних технологій виготовлення. Особливу увагу приділяється для методів адитивного виробництва, які дозволяють створювати складні геометричні форми з точним контролем розміщення матеріалу. А з розвитком адитивних технологій точність створення такого обладнання буде тільки покращуватися, що дає певні можливості до виробників спортивного обладнання.

Застосування 3D-друку з високоміцних полімерів або армованих композитів може значно зменшити масу конструкції, одночасно підвищивши її міцність, функціональність та ергономіку. Також перспективним є використання сплавів на основі алюмінію або титану, що забезпечують високу міцність за відносно малій масі. Тому в даній роботі буде проведено аналіз

використання як полімерних, так і металевих матеріалів, щоб обрати більш оптимальний метод виробництва.

1.2 Аналіз сучасних конструкцій фітнес-гачків і вимог до їх експлуатації

Фітнес-гачки призначені для фіксації на стійках функціональних тренувальних рам (рис. 1.2) і використовуються з метою встановлення штанги з навантажувальними дисками. Завдяки прецизійному профілюванню гачки забезпечують надійне й безпечне опускання та підняття штанги під час виконання силових вправ. У професійному спорті вага снарядів може досягати 200 кг і більше, однак саме ця межа може бути прийнята як критична для оцінки міцності конструкції гачка. Основне навантаження зосереджується на зоні опори гачка, яка безпосередньо контактує з грифом штанги.



Рисунок 1.2 – Сійки функціональних тренувальних рам, на які встановлюють фітнес-гачки

Монтаж фітнес-гачків здійснюється на стійки тренувальних рам (рис. 1.3), які мають перфоровану поверхню з отворами, що дозволяють регулювати висоту розміщення елементів відповідно до вимог певної вправи. Така конструктивна особливість забезпечує високу адаптивність системи до індивідуальних потреб спортсмена без потреби у використанні додаткових інструментів чи механізмів. Універсальність і гнучкість конструкції роблять її

придатною для широкого спектра вправ, включаючи присідання з обтяженням, жим штанги, станову тягу та інші базові рухи у силовому тренінгу.

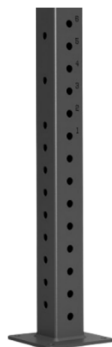


Рисунок 1.3 – Отвори тренувальної рами для встановлення штифтів

Сучасні виробники страхувального обладнання пропонують широкий спектр конструкцій фітнес-гачків, що різняться за геометричними параметрами, матеріалами виготовлення, максимально допустимим навантаженням і функціональними характеристиками (рис 1.4).

Вибір конструкції залежить від виду діяльності споживача: для особистого використання доступні дешевші та легші моделі, тоді як для професійних потреб, краще використовувати більш надійні та міцні конструкції. , які використовуються в сучасних спортивних залах (1 – легка конструкція фітнес-гачка, яка пропонується для любительського використання; 2 – легка конструкція із додатковими компонентами, у вигляді валка, який дозволяє комфортно налаштовувати положення штанги; 3 – більш міцна конструкція, для більш професійного використання із високою вагою; 4 – популярна конструкція, яка використовується в професійних спортивних залах, та закладах світового класу)



Рисунок 1.4 – Різноманітні конструкції фітнес-гачків

Одним із найпоширеніших типів таких кріплень є моделі формату «J-Hooks» (рис. 1.5), які знайшли широке застосування як у професійних тренувальних залах, так і в умовах домашнього використання завдяки своїй простоті, універсальності та високій надійності. Основними матеріалами для виготовлення цих елементів виступають конструкційні або леговані сталі, алюмінієві та титанові сплави, а також сучасні полімерні композити, які використовуються для допоміжних деталей з метою зменшення маси конструкції без втрати її фізико-механічних характеристик.



Рисунок 1.5 – Фітнес-гачки від компанії «BRIDGE» BFJ Combo Roller J-Hooks

Однак традиційні варіанти конструкцій фітнес-гачків нерідко супроводжуються високими витратами на виробництво, що зумовлено використанням вартісними матеріалами, таких як титан або леговані сталеві сплави. Застосування автоматизованих технологічних процесів здатне частково оптимізувати витрати, проте навіть за умов автоматизації залишається потреба у високоточному налаштуванні устаткування та залученні спеціалізованих виробничих підходів, що додатково впливає на загальну собівартість виробу.

1.3 Основні матеріали, які використовуються в галузі спортивного обладнання та їх хімічний склад

Найпоширеніші матеріали, які використовуються в галузі спортивного обладнання (особисто страхувального призначення) є – сталі, найчастіше використовується нержавіюча сталь, наприклад, AISI 304 або 316, та нержавіюча сталь 440C (табл 1.1) [3].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад нержавіючих сталей

Сплав	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Ti	Cu	Fe
AISI 304	до 0,8	до 0,8	до 0,2	9 - 11	до 0,02	до 0,035	17 - 19	-	до 0,5	до 0,3	ос н.
AISI 306	до 0,03	до 0,6	до 0,8	14 - 16	до 0,015	до 0,02	15 - 17	2,5 - 3	-	-	ос н.
AISI 404C	0,95 - 1,2	до 1,0	до 1,0	до 1,0	до 0,03	до 0,04	16 - 18	до 0,75	-	-	ос н.

Ці сталі часто застосовують у виробництві фітнес-обладнання, оскільки вони мають чудову корозійну стійкість і міцність, що необхідно для витримування великих навантажень та довготривалої експлуатації.

Алюміній - легкий, але міцний матеріал, який часто використовується у виробництві фітнес-аксесуарів, таких як фітнес-гачки або тягові гачки, упори, та балки.

Алюмінієвий сплав 6005А (табл. 1.2) використовується для виготовлення конструкційних елементів середньої міцності, добре піддається термічній обробці та пластичній деформації. Він характеризується задовільними механічними властивостями та достатньою корозійною стійкістю, що робить його придатним для застосування в умовах помірних експлуатаційних навантажень.

Алюмінієвий сплав 6061 призначений для виготовлення деталей, що працюють в умовах середніх і високих навантажень. Він належить до термооброблюваних і добре деформованих сплавів, має підвищені міцнісні характеристики та забезпечує оптимальну корозійну стійкість в експлуатаційних умовах.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад алюмінієвих сплавів [4]

Сплав	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6061	0,40 – 0,80	0,7	0,15 – 0,40	0,15	0,8 – 1,2	0,04 – 0,35	0,25	0,15
6005А	0,50 – 0,90	0,35	0,3	0,5	0,40 – 0,70	0,30	0,20	0,10

Обидва алюмінієві сплави 6005 та 6061 є високоякісними матеріалами, проте їх вибір визначається специфікою експлуатаційних вимог. Сплав 6005 доцільніше застосовувати у конструкціях, де важливою є достатня міцність і здатність до зварювання. Натомість сплав 6061 доцільно використовувати у випадках, коли на перший план виходить естетичний вигляд виробу та ефективність екструзійної обробки, зокрема під час виготовленні дверей, вікон або декоративних елементів будівель. Найважливіше, щоб алюмінієвий матеріал був анодований для підвищення стійкості до зношування і

поліпшення зовнішнього вигляду. Анодування алюмінію – це технологічний процес, який надає металу унікальні властивості. Таким чином алюміній стає міцним, та стійким до дії навколишнього середовища.

Титанові сплави (табл. 1.3) використовуються рідше із-за своєї високої ціни, проте можуть використовуватися для страхувального обладнання професійного рівня завдяки своїм міцним технічним характеристикам. Титан – це легкий, довговічний дуже міцний та корозійностійкий матеріал з високим показником питомої міцності, який використовується у виробництві високоякісного спортивного обладнання.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад титанового сплаву [4]

Сплав	Al	V	Fe	O	C	N	H
Grade 2 (6Al-4V)	5,50 - 6,75	3,50 - 4,50	до 0,40	до 0,20	до 0,08	до 0,05	до 0,015

У західних моделях фітнес-гачків для виготовлення основних конструкційних елементів найчастіше застосовуються високоякісні нержавіючі сталі (AISI 304, 316, 440C), алюмінієві сплави (зокрема алюміній 6061) та титанові сплави (Grade 2 6Al-4V). Їх механічні властивості наведено в табл. 1.4

Таблиця 1.4 – Властивості сплавів, що використовуються в конструкційних елементах фітнес-гачку [5]

Сплави	Щільність, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Міцність, МПа
Нержавіюча сталь 440C	7800	206,7	861,25
Титановий сплав Grade 2 (6Al-4V)	4510	102,81	344,5
Алюмінієвий сплав Al 6061	2700	68,9	310

Ці матеріали обрані з урахуванням їх високої механічної міцності, корозійної стійкості та довговічності, що критично важливо для спортивного обладнання, призначеного для роботи з великими навантаженнями.

Огляд продукції, представленої на ринку, показав, що найчастіше використовуються саме титанові сплави.

1.4 Постановка задач роботи

З огляду на актуальність розробки вдосконалена конструкція має відповідати вимогам фізико-механічних характеристик, простоти виготовлення, а також бути адаптованою до використання сучасних виробничих технологій, зокрема адитивного виробництва.

У зв'язку з цим особливої ваги набуває необхідність вибору матеріалів, та обґрунтування технологічного процесу виготовлення. Доцільність створення модернізованої конструкції передбачає дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів, моделювання виробу та проведення чисельного аналізу його напружено-деформованого стану. Задля ефективного виконання дослідження визначено такі основні завдання:

1. Проаналізувати наявні технічні рішення фітнес-гачків з метою виявлення їх переваг і недоліків та визначення напрямів конструктивного вдосконалення.

2. Провести функціонально-вартісний аналіз конструкції фітнес-гачка з урахуванням її основних елементів.

3. Розробити тривимірну модель фітнес-гачка, враховуючи особливості профілювання, способу кріплення до тренувальної рами, ергономічні вимоги та можливості зниження маси без втрати міцності.

4. Провести інженерний аналіз напружено-деформованого стану розробленої конструкції з використанням методу скінченних елементів з метою виявлення зон концентрації напружень, максимальних деформацій, коефіцієнту запасу міцності і подальшої топологічної оптимізації геометрії.

5. Обґрунтувати доцільність використання обраних матеріалів та технології виготовлення для експлуатації в умовах інтенсивного силового навантаження.

6. Розробити методику контролю якості готового виробу та його складових, спрямовану на забезпечення надійності та довговічності конструкції у процесі експлуатації.

2 РОЗДІЛ. ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ

2.1 Функціонально-вартісний аналіз моделі фітнес-гачка

Функціонально-вартісний аналіз (ФВА) є комплексним методом оцінювання економічної ефективності виробів, що забезпечує системний підхід до оптимізації технічних, експлуатаційних та економічних характеристик шляхом аналізу співвідношення між функціональними можливостями та витратами на їх реалізацію. У контексті розробки модернізованої конструкції фітнес-гачка, який є ключовим елементом страхувального обладнання у важкій атлетиці, застосування ФВА дозволяє виявити резерви для зниження витрат без втрати надійності, міцності та ергономічності. Конструкція фітнес-гачка має відповідати високим вимогам до несучої здатності, стійкості до статичних і динамічних навантажень, а також забезпечувати простоту виготовлення й експлуатаційну зручність. Обґрунтування вибору матеріалів, технологій і геометричних рішень відіграє вирішальну роль у досягненні оптимального балансу між вартістю та функціональними характеристиками.

Основною метою ФВА є ідентифікація та усунення необґрунтованих витрат на всіх етапах життєвого циклу виробу – від розробки до експлуатації. Метод передбачає встановлення зв'язку між вартістю реалізації окремих функцій і їхньою значущістю для споживача, що сприяє раціоналізації проєктних рішень, технологій і ресурсів. Завдяки цьому ФВА забезпечує можливості для впровадження інноваційних матеріалів, топологічної оптимізації конструкції та автоматизованого моделювання, зберігаючи або навіть покращуючи споживчу цінність виробу.

Методологія ФВА ґрунтується на послідовному виконанні кількох етапів. Спочатку визначаються функції, які виконує виріб або його окремі компоненти, поділяючи їх на основні, що відповідають головному призначенню, і допоміжні, які сприяють підвищенню ефективності чи

комфорту використання. Далі оцінюється вартість реалізації кожної функції, враховуючи витрати на матеріали, енергоресурси, робочу силу та технологічне обладнання. На наступному етапі аналізуються альтернативні способи реалізації функцій із метою мінімізації витрат без погіршення якості чи технічних характеристик. Завершальним кроком є вибір оптимального варіанту, який забезпечує виконання всіх функцій за найнижчих можливих витрат.

ФВА широко застосовується в інженерії, виробництві та суміжних галузях, де необхідний баланс між вартістю, функціональністю та якістю. У сфері спортивного обладнання цей підхід дозволяє не лише знизити собівартість виробництва, але й підвищити конкурентоспроможність продукції на ринку.

Конструкція фітнес-гачка західного зразка складається з кількох функціональних елементів, кожен із яких виконує специфічні завдання. Основні компоненти, виготовлені зі сталі або титану, забезпечують високу міцність і стійкість до значних статичних і динамічних навантажень, що є критично важливим для безпечної фіксації штанги в силових рамах. Полімерні або прорезинені деталі виконують допоміжні функції, зокрема амортизацію, зниження шуму під час експлуатації та захист поверхонь від тертя й механічних пошкоджень. Важливим елементом є валок, який забезпечує горизонтальне переміщення штанги, сприяючи її центруванню та зменшенню ризику перекосів, що можуть призвести до травмування спортсмена.

Функціональні характеристики елементів конструкції фітнес-гачка детально описано в таблиці 2.1, де наведено їх призначення, матеріали та вклад у загальну ефективність виробу. Аналіз цих даних у рамках ФВА дозволяє виявити елементи з надлишковими витратами, оцінити доцільність використання альтернативних матеріалів, таких як композити чи високоміцні полімери, і запропонувати конструктивні зміни для зниження маси виробу без втрати міцності.

Таблиця 2.1 – Таблиця функціонально аналізу для фітнес-гачку

Елементи		Функція	
Позначення	Назва	Позначення	Опис
E1	Металеві стінки фітнес-гачка	Ф1	Виступають основним конструктивним елементом, що сприймає основні статичні та динамічні навантаження під час експлуатації.
E2	Прорезинені частини фітнес-гачка	Ф2	Забезпечують амортизацію, знижують рівень шуму під час використання, а також захищають від тертя та механічних пошкоджень.
E3	Валок із полімерного матеріалу	Ф3	Забезпечує центрування штанги та підвищує безпеку тренувального процесу.
E4	Стрижень кріплення	Ф4	Виконує функцію жорсткого кріплення конструкції до стійки через відповідні отвори, забезпечуючи надійність і стабільність фіксації.
E5	Додатковий елемент фіксації	Ф5	Служить допоміжним засобом закріплення гачка в отворі профільної стійки, запобігаючи його обертанню навколо осі.

У результаті функціонального аналізу були визначені основні конструктивні елементи фітнес-гачка західної моделі та встановлено ключові функції, які виконує кожен з них. Для подальшого дослідження необхідно провести оцінку параметрів значущості, вартості та ефективності кожного елемента (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Оцінка параметрів значимості елементів фітнес-гачку

Елементи	Функція	Значимість,%	Вартість,%	Ефективність
Металеві стінки фітнес-гачка	Ф0	45	41	1,1
Прорезинені частини фітнес-гачка	Ф1	10	7	1,43
Валок із полімерного матеріалу	Ф2	5	16	0,3
Стрижень кріплення	Ф3	15	18	0,83
Додатковий елемент фіксації	Ф4	25	18	1,39
Всього		100	100	

Проаналізувавши дані таблиці 2.2, можна зробити висновок, що полімерний валок конструкції має найменшу ефективність – 0,3, а також нижчу значимість – 5%. Це обґрунтовано тим, що вагу штанги до 100 кг можна переміщувати своїми силами, а тому для більшості спортсменів, які

використовують невелику вагу цей елемент конструкції є не доцільним. Особливу увагу доцільно приділити вибору матеріалу, для основних елементів (металеві стінки), його вартість складає 41% конструкції, тому дослідження рішення для оптимізації матеріалу саме для цього елемента є першочерговим. Також модернізації потребує металевий стрижень який має коефіцієнт ефективності 0,83.

Інші елементи, додаткові фіксуючі компоненти, хоч і мають нижчі індивідуальні показники ефективності, залишаються конструктивно необхідними. Вони забезпечують надійність встановлення гачка на тренувальну стійку та стабільність під час експлуатації, а отже, не можуть бути виключені з конструкції.

2.2 Побудова 3D-моделі конструкції фітнес-гачка

У конструкції моделі прототипу фітнес-гачка використовуються сталеві нержавіючі сплави або титан у якості основного матеріалу, які найбільше навантажуються. Також в конструкції передбачені додаткові прорезинені або полімерні частини, функція яких зменшення тертя штанги і її фіксація.

Також у якості додаткової допомоги для регулювання центру ваги штанги у конструкції присутній ролик на бронзовому підшипнику ковзання, який допомагає рухати штангу вліво або вправо. Проаналізувавши отримані дані зроблено висновок, що даній моделі необхідно оптимізувати вибір матеріалу, та зробити порівняння завдяки випробуванням симуляції на динамічні та статичні навантаження, та після отриманих результатів зробити висновок.

У роботі створено моделювання прототипу фітнес-гачка (рис. 2.1), та проведено аналіз розподілу навантажень методом скінченних елементів. Також було показано модель збірки у розібраному вигляді (рис. 2.2) для більш наглядного прикладу використання матеріалів та кріпильних елементів, які використовуються в фітнес-гачках західних виробників спортивного обладнання.

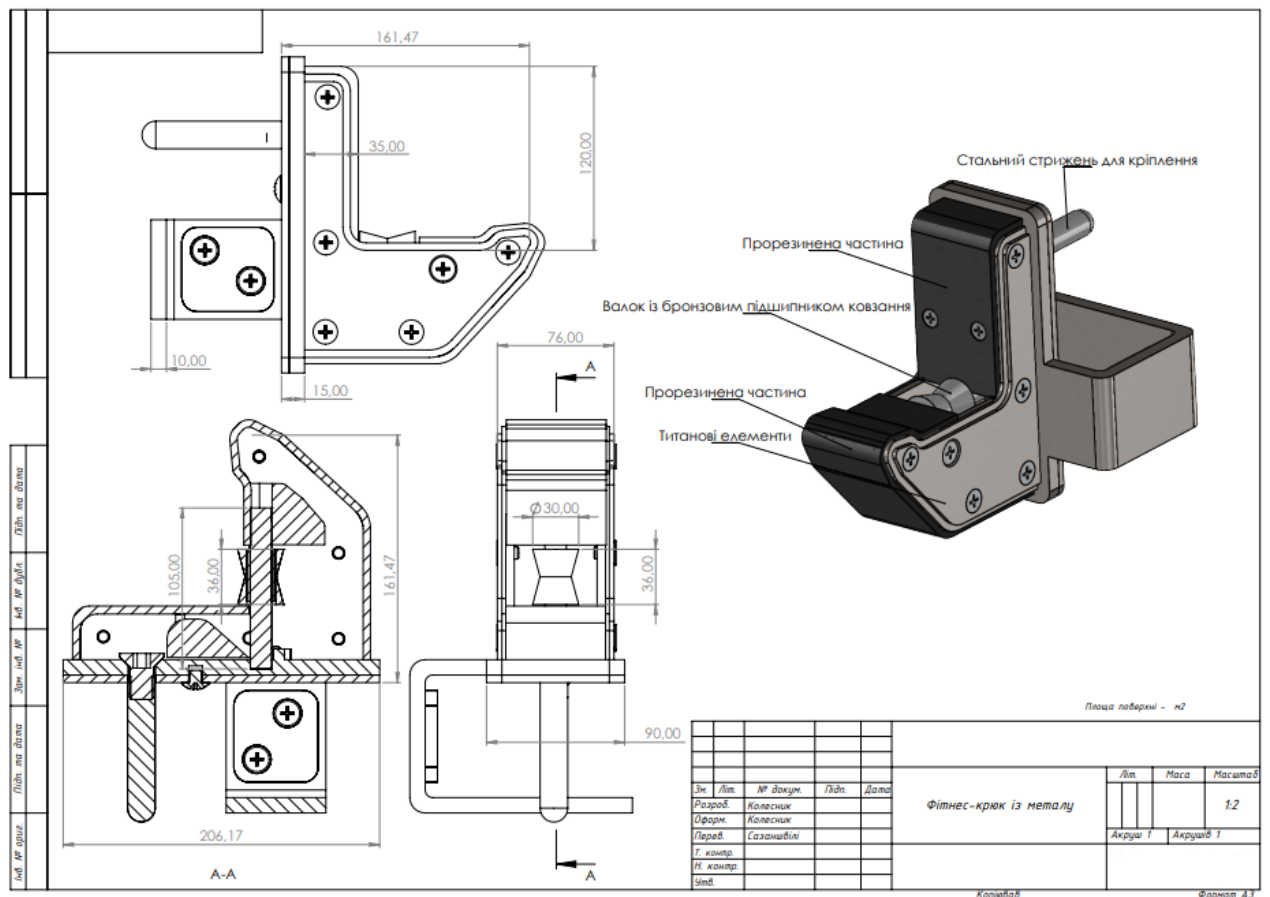


Рисунок 2.1 – Габарити та вигляд в розрізі моделі прототипу фітнес-гачка

Відповідно до аналітичного порівняння матеріалів було обрано нержавіючу сталь 440С із підвищеним вмістом вуглецю (0,95–1,2%), яка гарантує високу міцність виробу та його здатність витримувати значні навантаження. Ця сталь має корозійну стійкість, що робить її незамінною для використання в спортивному інвентарі завдяки підвищеним умовам використання та зберігання. Додаткові елементи конструкції виробу (рис. 2.3, а) виготовляються з полімерів UHMW Black, що дозволяє зменшити вагу виробу та додати елементи дизайну.

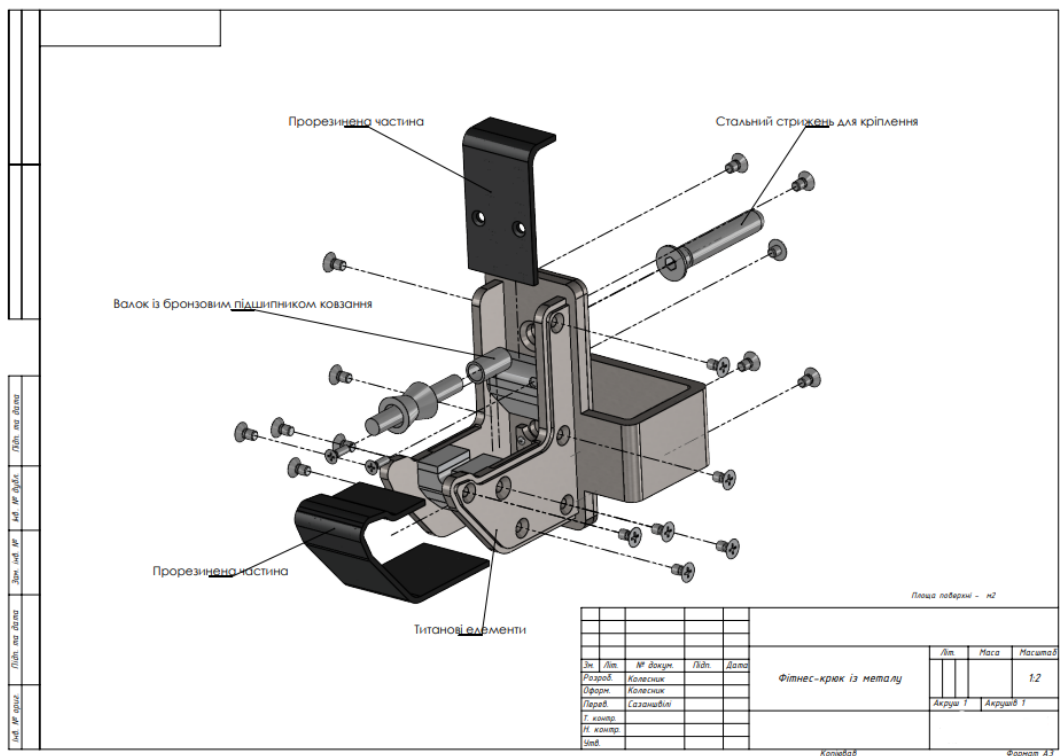


Рисунок 2.2 – Вид західної моделі фітнес-гачка у розібраному вигляді

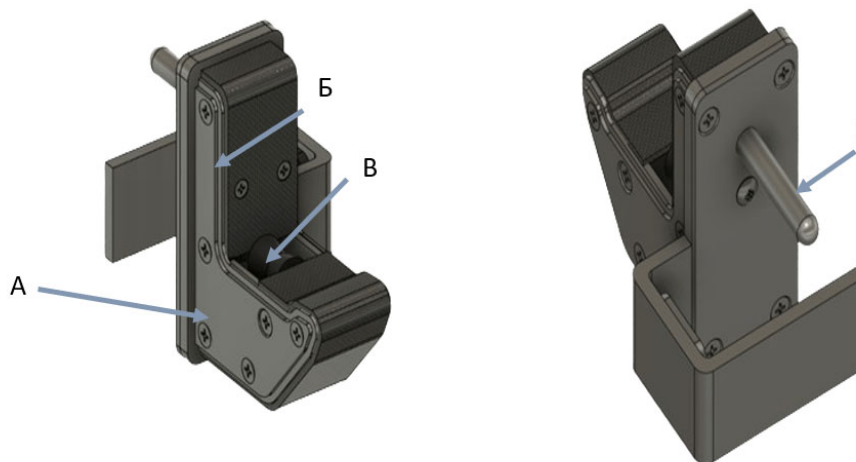


Рисунок 2.2 – Модель фітнес-гачка зі сталі:

а – додаткові елементи, б – основа, в – валок, г – стрижень.

Основна концепція фітнес-гачка полягає у наявності валка із пластику UHMW Black в середині конструкції (рис. 2.4, а), який дозволяє регулювати положення грифу для зручності під час виконання вправ завдяки зручному регулюванню центру ваги для штанги.

Валок обертається завдяки бронзовому підшипнику ковзання [5] на стрижні зі сталі 440С. Також цей стрижень за своєю конструкцією служить опорою, що кріпиться всередині конструкції балки (рис 2.4, б) і утримує фітнес-гачок на стійці.

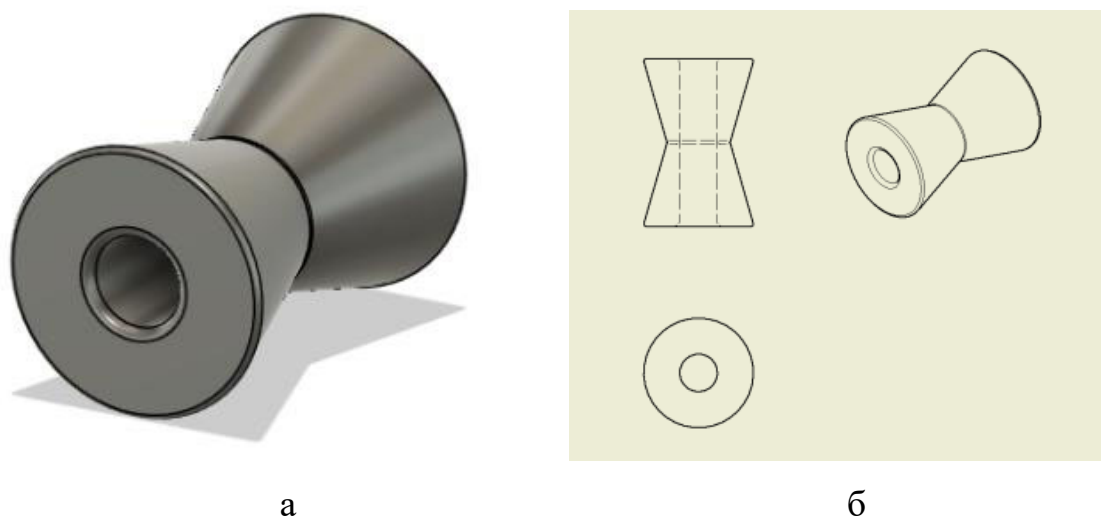


Рисунок 2.4 – Модель та креслення валку із пластику UHMW Black

Порівняно з традиційними фітнес-гачками, модифікована модель матиме спрощений процес виготовлення із використанням меншої кількості номенклатури і матеріалів.

2.3 Модернізація фітнес-гачка

Функціонально-вартісний аналіз конструкції прототипу фітнес-гачка виявив наявність значної кількості компонентів, які ускладнюють процес виробництва та призводять до підвищених витрат матеріалів. У зв'язку з цим запропоновано модифіковану модель фітнес-гачка, що спрощує конструкцію та зменшує матеріалоємність. Властивості матеріалів для 2 варіанту фітнес-гачку наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Властивості матеріалу для 2 варіанту фітнес-гачку

Матеріали валка				Матеріали основних елементів			
Матеріал и	Міцність, МПа	Щільність , кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Матеріал и	Міцність, МПа	Щільність , кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа
EPX 150	79	1090	2,9	EPX 82	80	1160	2,8
Thermopl astic Resin	114	1280	3,3	Nylon 12	82,8	1130	2,93
Rubber nitrile	15	1200	0,002	Polyeth erketon eketone	61	1390	5,8

Як і в попередньому варіанті, валок прокручується завдяки підшипнику ковзання на стрижні, закріпленому по середині виробу, який потребує змащення. Для валка обрано матеріал Thermoplastic Resin, який забезпечить необхідну гнучкість і пружність.

Матеріалом, призначеного для основних компонентів обрано високоміцний матеріал з епоксидної смоли та карбону EPX 82, який має високу зносостійкість.

Додатково у моделі передбачено використання стрижнів із різьбою для кріплення фітнес-гачка на стійці (рис. 2.5 а, б), що незначно збільшить витрати на виробництво, але підвищить стійкість кріплення. У якості доповнення додається ескіз, яке відображає деталі конструкції. (рис. 2.5, б).

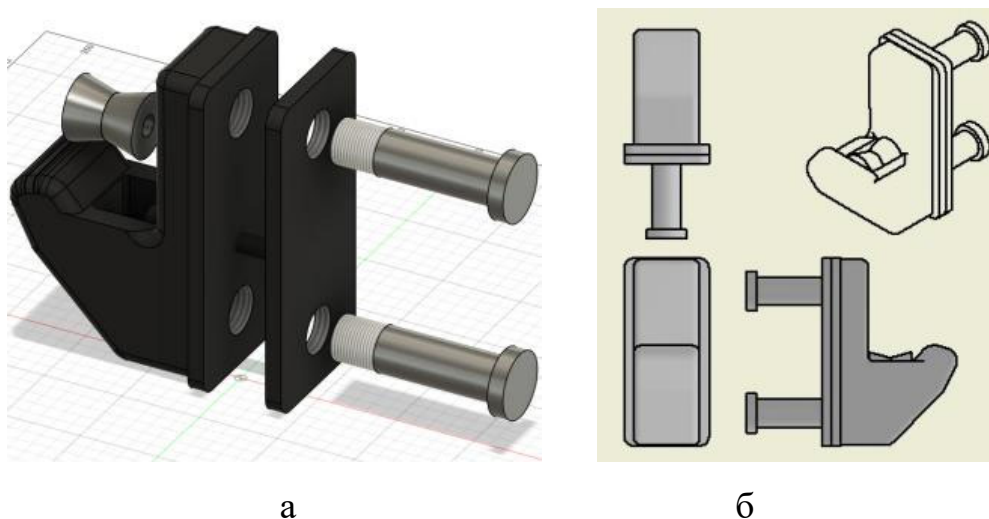


Рисунок 2.5 – Виріб в розібраному вигляді та ескіз валка

Запропонована модель виготовляється із застосуванням адитивних технологій, однак результати функціонально-вартісного аналізу вказали на недоцільність використання валка в конструкції. У зв'язку з цим було розроблено спрощений варіант моделі (рис. 2.6, 1), який також базується на використанні технології 3D-друку. З метою зниження матеріаломісткості конструкції додатково було оптимізовано систему кріплення: замість традиційного вузла запропоновано застосування різьбового з'єднання з використанням гайки (рис. 2.6, 2), що забезпечує надійніше фіксування елементів А також було видалено задню кришку конструкції.

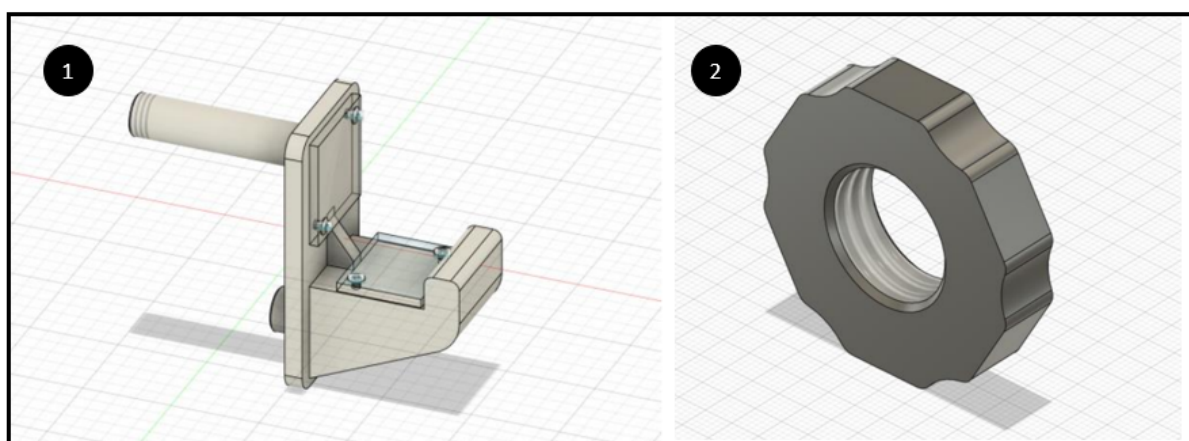


Рисунок 2.6 – Модифікована модель без використання валка

Таким чином, розроблена модифікована конструкція може вважатися базовим варіантом для подальших інженерних і технологічних досліджень, оскільки вона враховує результати функціонально-вартісного аналізу, характеризується зменшеною складністю, підвищеною ефективністю використання матеріалів та удосконаленою системою кріплення. Саме ця модель обрана як опорна для проведення комп'ютерного моделювання, симуляцій навантажень та подальшого техніко-економічного обґрунтування доцільності її впровадження у виробництво.

2.4 Розрахунок на міцність під час зрізу та зминання

В фітнес-гачку присутні такі з'єднувальні елементи, які потребують додатковий розрахунок на міцність під час зрізу та зминання. Цей елемент – стрижень на задньому ребрі конструкції, та гайка яка на нього вгвинчується (рис. 2.7). Вони слугують фіксацією фітнес-гачка у отворі тренувальної рами.

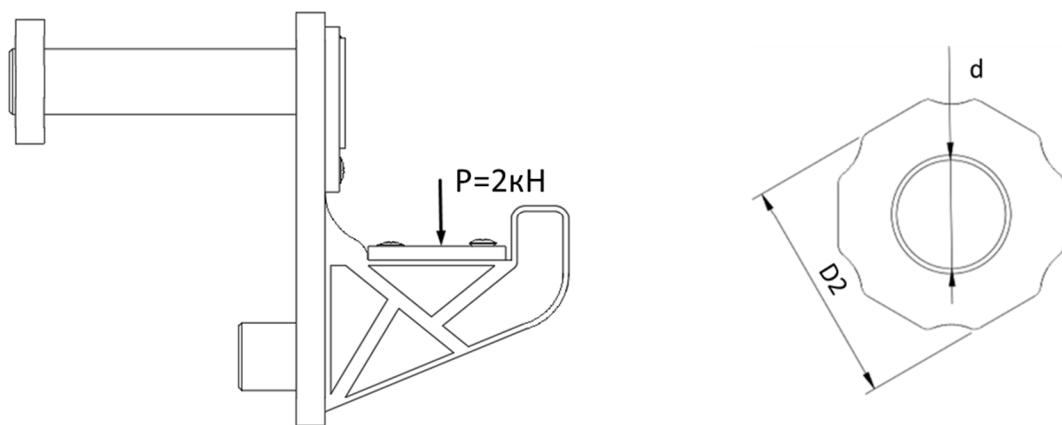


Рисунок 2.7 – Креслення елементів з'єднувальних конструкцій:

d – внутрішній діаметр гайки; D_1 – діаметр стрижня; D_2 – зовнішній діаметр гайки

Основні значення які потрібні під час розрахунку це внутрішній діаметр гайки $d = 22$ мм, його зовнішній діаметр $D_2 = 45$ мм, та діаметр стрижня $D_1 = 24$ мм. Розрахуємо внутрішній діаметр гайки із вимог напружень зрізу.

Якщо $[\tau]_{\text{ср}}$ – допустиме напруження на зріз – $25 \text{ МПа} = 25 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$,
 $[\sigma]_{\text{см}} = 240 \text{ МПа} = 240 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ – допустиме напруження на розтяг.

Оскільки зсув відбувається по кільцевій поверхні між внутрішнім та зовнішнім діаметрами, площа зсуву (циліндрична поверхня) визначається за формулою 2.1.

$$A_{\text{зс}} = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d^2), \quad (2.1)$$

Напруження зрізу визначається за формулою 2.2.

$$\tau_{\text{зр}} = \frac{P}{A_{\text{зр}}} = \frac{P}{\frac{\pi(D_2^2 - d^2)}{4}} = \frac{4P}{\pi(D_2^2 - d^2)} \leq [\tau]_{\text{зр}}, \quad (2.2)$$

де P – поперечна сила (половина ваги штанги на один гачок) визначається за формулою 2.3.

$$P = \frac{m \cdot g}{2} = \frac{400 \cdot 9,81}{2} = 1962 \text{ Н} \approx 2000 \text{ Н} = 2 \text{ кН} \quad (2.3)$$

Підставимо значення у формули 2.1 і 2.2.

$$A_{\text{зр}} = \frac{\pi}{4}(0,045^2 - 0,022^2) = 0,00121 \text{ м}^2$$

Тоді напруження на зріз:

$$\tau_{\text{зр}} = \frac{2000}{0,00121} = 1,65 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,65 \text{ МПа}$$

За заданих геометричних параметрів гайки напруження зрізу становить $1,65 \text{ МПа}$, що менше за допустимі 25 МПа – умова міцності на зріз виконується.

Якщо сила $P = 2000 \text{ Н}$ прикладена на вільному кінці стрижня, довжиною $0,1 \text{ м}$, а інший кінець жорстко закріплений у гайці, то стержень працює як консольна балка з навантаженням на кінці. У такому випадку потрібно виконати розрахунок на згин.

Для консольної балки, навантаженої силою P на вільному кінці, максимальний момент виникає біля місця закріплення:

$$M = P \cdot L, \quad (2.4)$$

де M — вигинальний момент, Н·м;

P — сила, Н;

L — довжина консолі (стрижня), м.

Для стрижня круглого поперечного перерізу момент опору W визначається за формулою 2.5.

$$W = \frac{\pi D^3}{32}, \quad (2.5)$$

де D — діаметр стрижня, м;

W — момент опору, м³.

Максимальне напруження на згин визначається за формулою 2.6.

$$\sigma_{\text{згин}} = \frac{M}{W} = \frac{32 \cdot P \cdot L}{\pi \cdot D^3} \leq [\sigma]_{\text{згин}}, \quad (2.6)$$

Підставляємо вихідні дані у формулу 2.6.

$$\sigma_{\text{згин}} = \frac{32 \cdot 2000 \cdot 0,1}{\pi \cdot (0,024)^3} \approx 147 \cdot 10^6 \text{ Па} = 147 \text{ МПа}$$

За умови довжини стрижня 0,1 м, сила 2000 Н не перевищує допустиме напруження згину. Стрижень діаметром 24 мм витримає навантаження без руйнування.

В результаті розрахунків підтверджено, що з'єднання "стрижень – гайка" у разі навантаження $P=2000$ Н, задовольняє умовам міцності як на зріз, так і на згин. Можна вважати, що конструкція є надійною за заданих умов.

2.5 Розрахунок МСЕ конструкції фітнес-гачка

Метод скінченних елементів (МСЕ) є одним із потужніших та поширеніших чисельних методів у галузі інженерного аналізу складних фізико-механічних процесів. Його застосування дозволяє моделювати поведінку тіл і конструкцій під дією різноманітних навантажень, враховуючи геометричну складність об'єкта, фізико-механічні властивості матеріалів, граничні умови та характеристики взаємодії між елементами.

Основною метою аналізу МСЕ є отримання розрахункової інформації про напружено-деформований стан конструкцій, що дає змогу на етапі проектування приймати технічно обґрунтовані рішення щодо форми, товщини, типу матеріалу або доцільності додаткових підсилень.

МСЕ широко впроваджується у багатьох галузях техніки, зокрема в машинобудуванні, авіації, будівництві, біомедичних дослідженнях та розробці спортивного обладнання. Завдяки використанню сучасного програмного забезпечення, такого як Fusion 360, Ansys, стало можливим проводити високоточні віртуальні експерименти, що дозволяють суттєво зменшити кількість фізичних прототипів, скоротити витрати на тестування та оптимізувати конструкцію ще на етапі її проектування.

У межах даного дослідження метод скінченних елементів застосовується з метою порівняльного аналізу механічної поведінки полімерного фітнес-гачка відносно його сталевого аналога. В роботі використано симуляцію напружено-деформованого стану в програмних продуктах Fusion 360 та Ansys. Основна увага зосереджена на вивченні реакції матеріалів конструкції на навантаження, зокрема деформації під дією статичних сил. Такий підхід дозволяє оцінити працездатність, надійність і доцільність заміни металевих елементів конструкції на полімерні.

Для перевірки надійності конструкцій проведено симуляцію статичного навантаження.

У звичайних умовах тренувального процесу в комерційних або професійних тренажерних залах типова вага штанги під час стандартних силових вправ не перевищує 100–150 кг. Проте, з метою забезпечення достатнього запасу міцності конструкції та орієнтації на екстремальні умови експлуатації, характерні для змагального рівня у важкій атлетиці чи пауерліфтингу, для розрахунків було прийнято навантаження від штанги загальною масою 400 кг. З урахуванням того, що конструкція передбачає використання пари фітнес-гачків (рис. 2.8), навантаження рівномірно розподіляється між ними, тож на кожен гачок припадає маса 200 кг, що еквівалентно 2000 Н.



Рисунок 2.8 – Розподіл навантаження штанги між двома фітнес-гачками

Для вихідного варіанту конструкції фітнес-гачка взято титановий сплав Grade 2. За результатами інженерного аналізу методом скінченних елементів було виявлено, що найменш стійкою до навантажень зоною є область згину та валка, де максимальні еквівалентні напруження досягають значення 188,49 МПа (рис. 2.9).

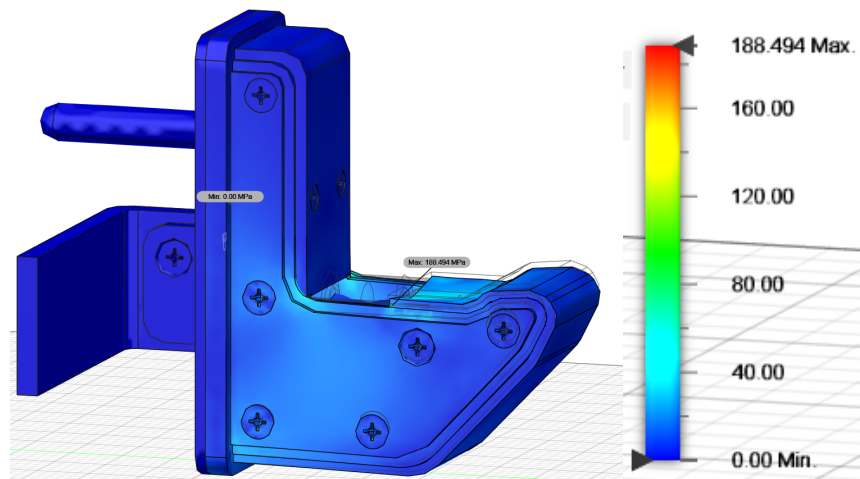


Рисунок 2.9 – Напруження конструкції вихідного фітнес-гачку

Найбільша лінійна деформація в конструкції становить 0,158 мм (рис. 2.10). Такий рівень деформації свідчить про еластичну поведінку матеріалу в межах допустимих навантажень

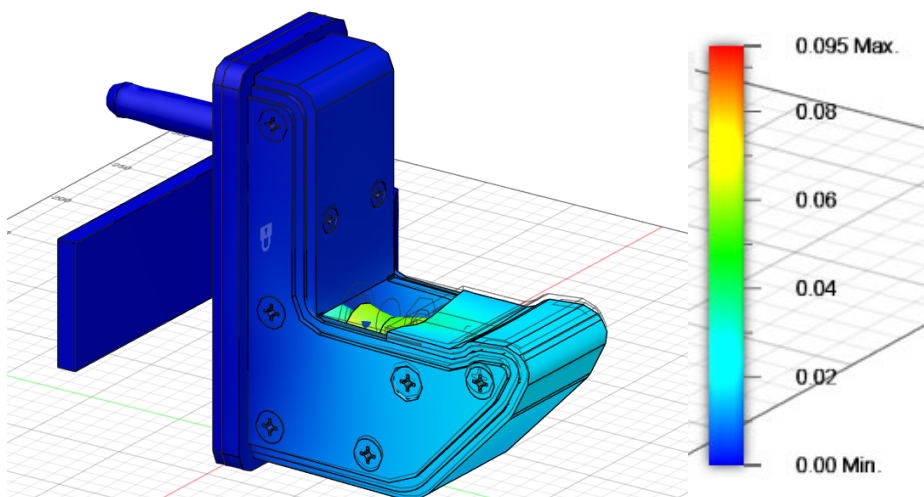


Рисунок 2.10 – Деформації конструкції вихідного фітнес-гачку

Під час проведення симуляції вихідного варіанту фітнес-гачка, мінімальне значення коефіцієнту безпеки становило 1,178, (рис. 2.11).

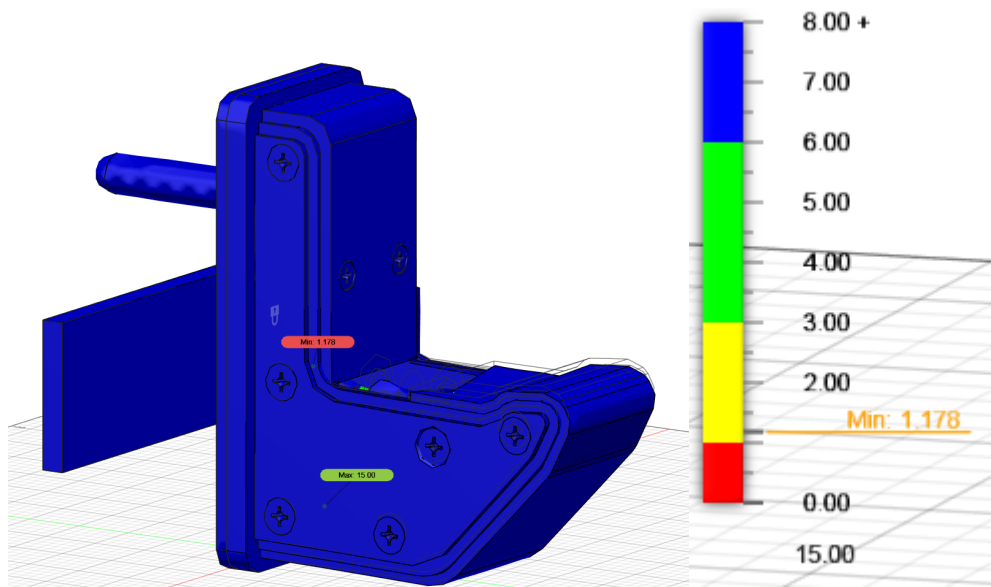


Рисунок 2.11 – Коефіцієнт запасу міцності конструкції вихідного фітнес-гачку

Для модифікованого варіанту конструкції фітнес-гачка в процесі симуляції задано матеріал EPX 82 (Carbon). У даному випадку найбільші напруження за статичних навантажень становлять 72,81 МПа

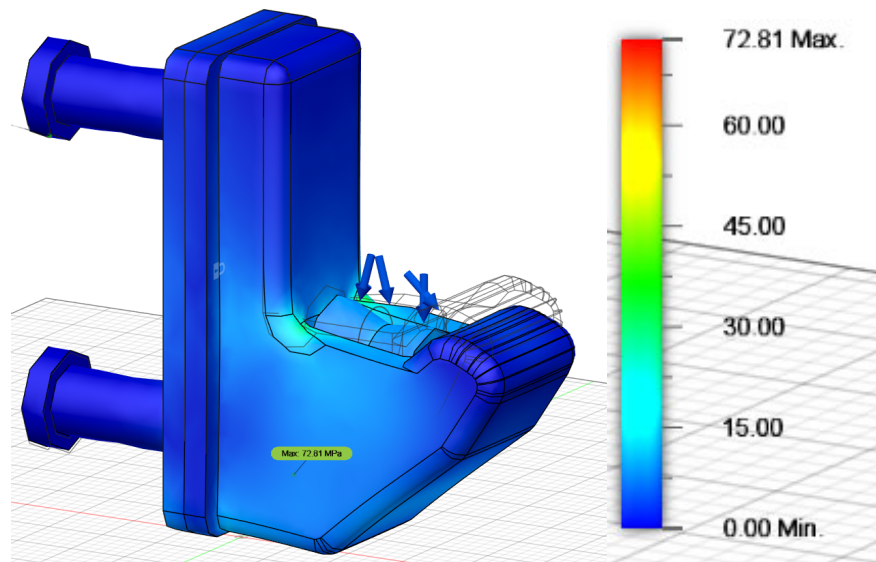


Рисунок 2.12 – Напруження конструкції модифікованого фітнес-гачку

Деформація зосереджується в аналогічній зоні конструкції, що і у вихідній конструкції, а її максимальне значення становить 0,592 мм, що також є допустимою.

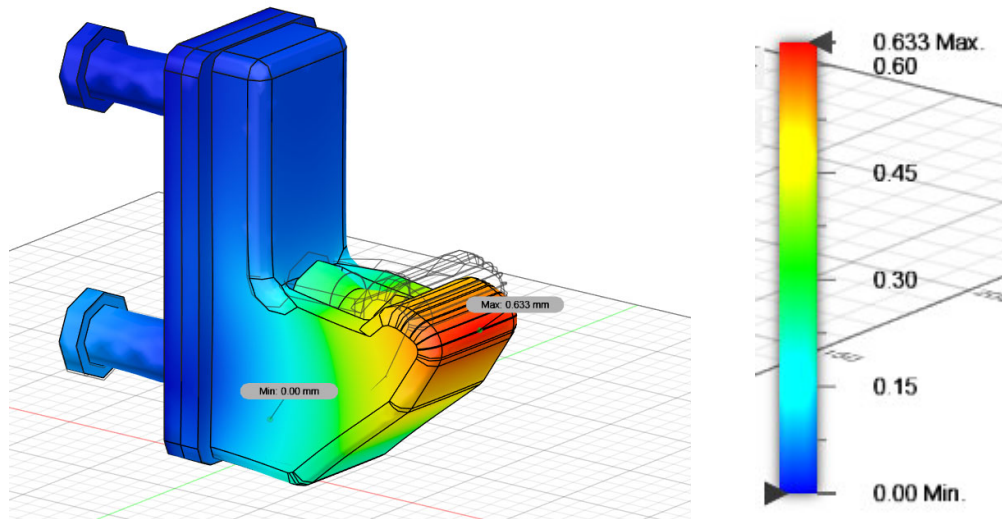


Рисунок 2.13 – Деформації конструкції модифікованого фітнес-гачку

Мінімальне значення коефіцієнту запасу міцності для конструкції становило 1,892, що було зафіксовано в критичній зоні напружень (рис. 2.14).

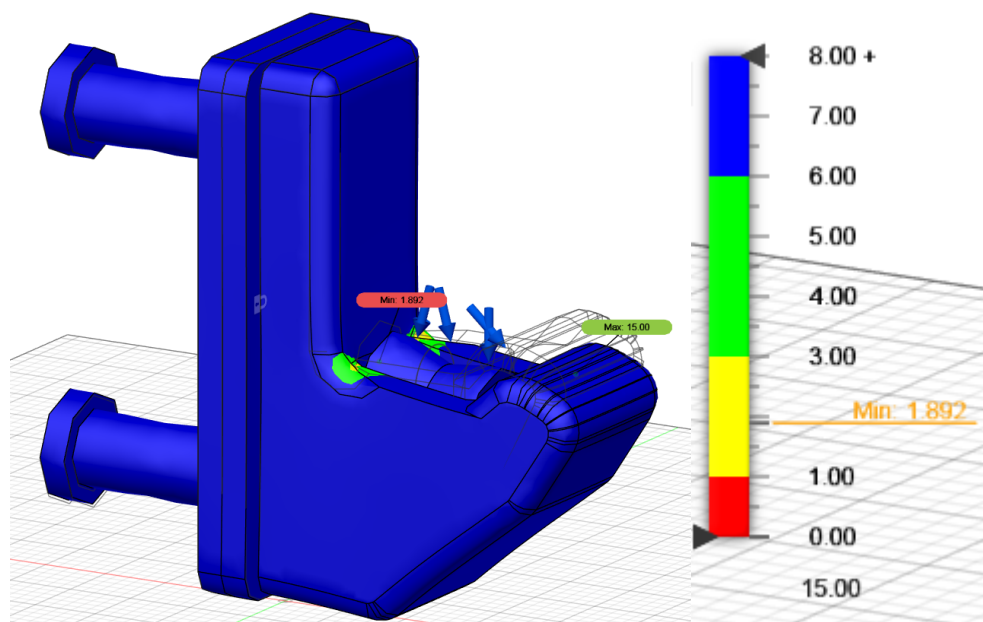


Рисунок 2.14 – Коефіцієнт запасу міцності конструкції модифікованого фітнес-гачку

Отримані результати свідчать про те, що використання EPX 82 (Carbon) забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики для виробу. Симуляція підтвердила здатність конструкції витримувати навантаження 2000 Н без критичних деформацій.

Далі проведемо аналіз максимального напруження, деформації і коефіцієнту запасу міцності остаточної конструкції, яка не використовує валок, має додаткові ребра жорсткості і змінене кріплення. Під час розрахунку взято характеристики матеріалу PCTG.

У даному випадку зона найбільшого напруження (32,85 МПа) спостерігається в точці переходу від вертикального до горизонтального сегмента гачка – саме тут розташована опорна площина.

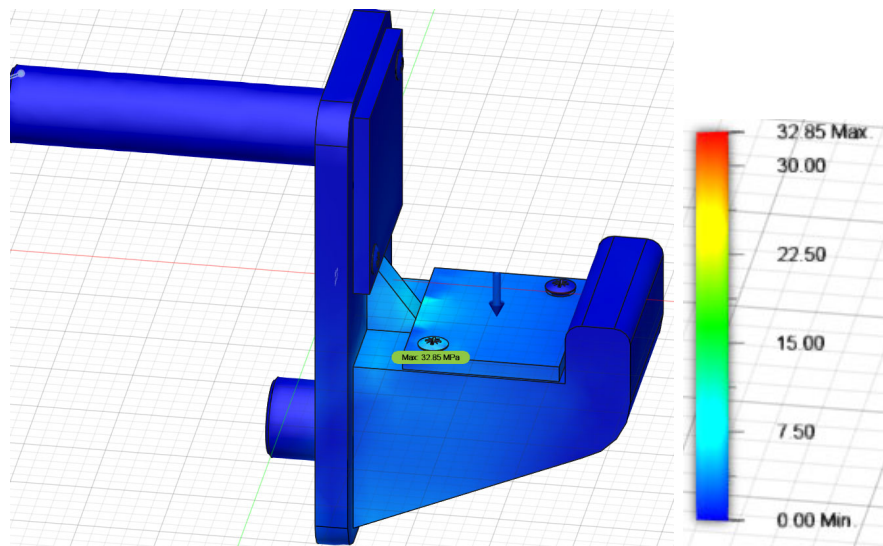


Рисунок 2.15 – Напруження конструкції остаточного фітнес-гачку

Речення про деформацію (чи співпадає місце х попередніми, максимальне значення)

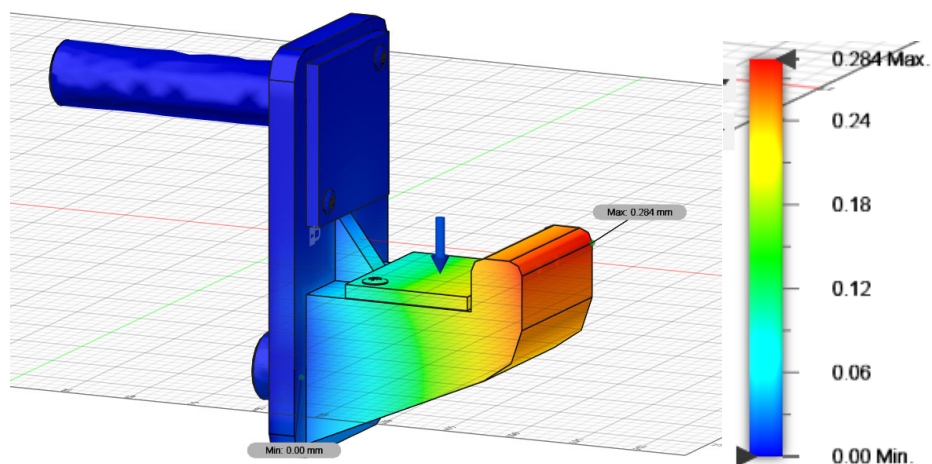


Рисунок 2.16 - Деформації конструкції вихідного фітнес-гачку

Коефіцієнт безпеки, що становить 1,15 (рис. 2.17), перебуває на межі допустимого значення і свідчить про граничний рівень навантажувальної здатності конструкції. Однак, з урахуванням того, що в розрахунках використовувалось навантаження, яке значно перевищує середні показники, характерні для стандартних тренувань (було прийнято вагу штанги 400 кг), отримане значення можна вважати задовільним. Це підтверджує достатню надійність конструкції в умовах експлуатації, навіть за підвищених силових навантажень, характерних для змагального рівня.

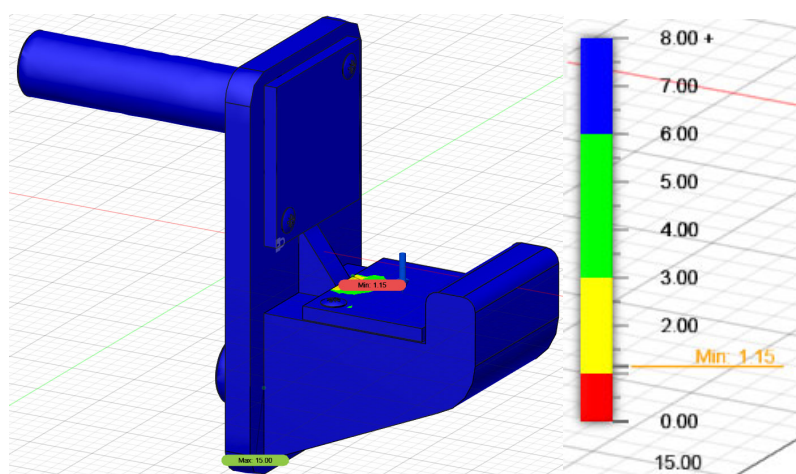


Рисунок 2.17 – Коефіцієнт запасу міцності конструкції остаточного фітнес-гачку

Проведене моделювання дозволило оцінити працездатність та запас міцності модифікованої конструкції фітнес-гачка, підтвердивши її придатність до використання за високих навантажень, та переконатися, що гачок здатен витримувати великі навантаження без ознак критичних деформацій чи втрати функціональності.

2.6 Топологічна оптимізація модифікованого фітнес-гачка

У запропонованій моделі максимальний запас міцності становить 32,85 МПа, тому доцільним є подальше вдосконалення моделі фітнес-гачка за допомогою топологічної оптимізації, з метою зменшення ваги конструкції

шляхом вилучення надлишкових ділянок, що не беруть участі у несучій здатності.

Топологічна оптимізація – це метод комп'ютерного інженерного моделювання, який дозволяє раціонально перерозподілити матеріал у межах заданого об'єму конструкції для забезпечення максимальної ефективності її роботи. У результаті такого аналізу формується геометрія, яка забезпечує необхідну жорсткість і міцність конструкції за мінімальною масою. Застосування топологічної оптимізації (рис. 2.18) у випадку фітнес-гачка дозволить ідентифікувати ті зони конструкції, які не зазнають суттєвих механічних впливів і можуть бути частково або повністю вилучені без втрати міцнісних властивостей. Це дозволить зменшити масу виробу, що є важливим як з точки зору зручності для користувача, так і з позиції економічної ефективності виробництва. Крім того, очікується зниження матеріаломісткості та вартості виготовлення, оптимізація процесу адитивного друку, а також підвищення загального коефіцієнта безпеки виробу.

Окрім зменшення кількості матеріалу, конструкція буде вдосконалена шляхом додавання додаткових ребер жорсткості та кріпильних елементів, які підвищать загальну стабільність виробу та забезпечать рівномірний розподіл навантажень. Це особливо актуально під час роботи з ваговими навантаженнями понад 200 кг та більше, коли незначні деформації або зсуви можуть призвести до втрати функціональності або навіть травмування користувача.

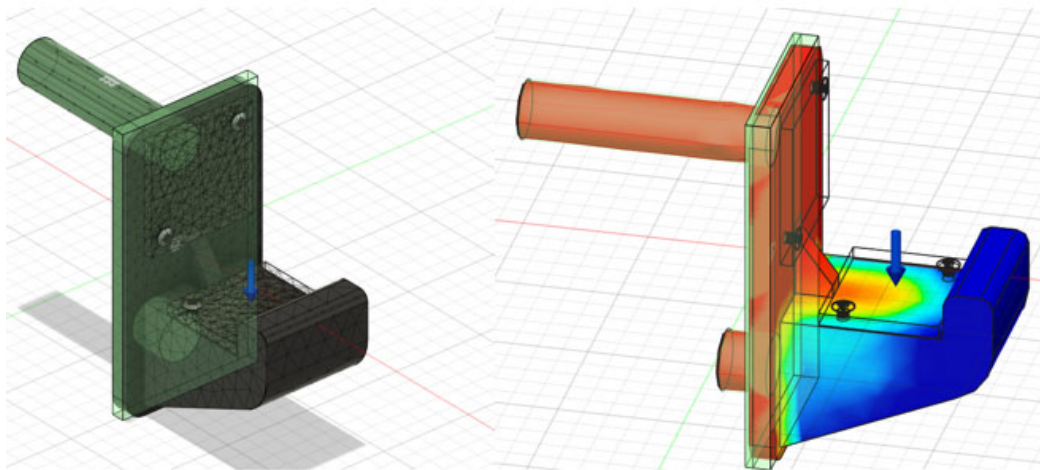


Рисунок 2.18 – Топологічний розрахунок

Після отриманих розрахунків можна переходити до створення остаточної конструктивної моделі фітнес-гачка з урахуванням результатів топологічної оптимізації, вибраного матеріалу та додаткових елементів кріплення (рис. 2.19), з подальшим та його випробуванням у віртуальному або реальному середовищі.

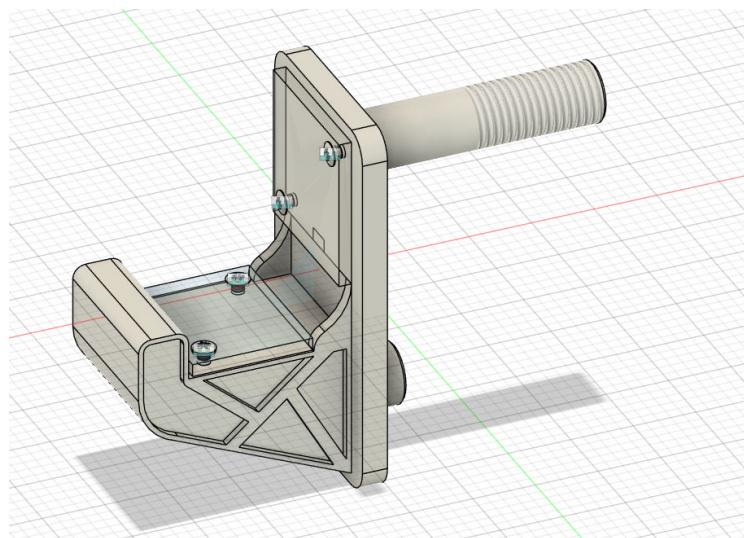


Рисунок 2.19 – Остаточна модель з топологічною оптимізацією

Ця програмна система є одним із провідних інструментів у галузі інженерного аналізу і широко застосовується для моделювання фізичних процесів, пов'язаних із механікою деформівного твердого тіла, термодинамікою, вібраціями та іншими видами впливів. Завдяки

використанню методу скінченних елементів (МСЕ), програмне забезпечення дозволяє точно відтворити реакцію матеріалу на задані навантаження, враховуючи геометричні особливості, фізико-механічні властивості матеріалу, граничні умови та типи закріплень. У даному випадку для чисельного аналізу використовуються параметри, максимально наближені до умов реальної експлуатації фітнес-гачків, зокрема, значення допустимих навантажень, які виникають під час роботи з важкими штангами, діапазон робочих температур та типові місця прикладання зусиль. Це створює основу для подальшої коректної оцінки ефективності запропонованого технічного рішення.

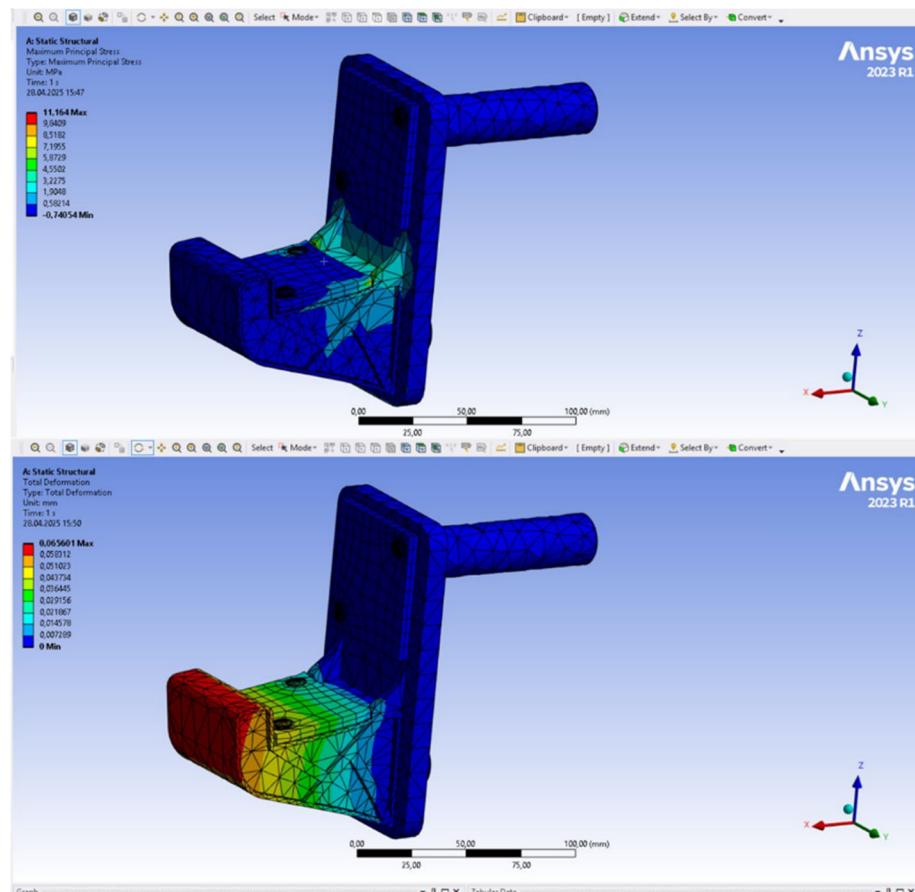


Рисунок 2.20 – Виконання розрахунків на статичні напруження в Ansys

Застосування розрахунку топологічної оптимізації дозволило зменшити масу фітнес-гачка шляхом раціонального перерозподілу матеріалу без втрати механічних характеристик. У результаті було створено модель зниженої маси із застосуванням топологічної оптимізації, що забезпечує оригінальне

конструктивне рішення. Це також сприятиме зниженню витрат на виробництво завдяки меншому обсягу використаного матеріалу.

2.7 Висновки до розділу 2

У даному розділі було здійснено функціонально-вартісний аналіз для фітнес-гачка, що дозволило виявити основні функції конструкції та порівняти їх із витратами на виробництво. Аналіз продемонстрував, що головними функціональними елементами до фітнес-гачка є стінки гачка, додаткові елементи та стрижень. Серед основних характеристик цих конструкційних елементів важливе місце займає зручність використання під час тренувального процесу, що має бути збережена і в модифікованій моделі. Особлива увага приділялась здатності витримувати вагу грифу з навантаженням, яка може сягати 400 кг, з розподіленням навантаження по 200 кг на кожен гачок.

У ході роботи було виконано чисельне моделювання методом кінцевих елементів у програмному забезпеченні Fusion 360, що дало змогу оцінити поведінку гачка під умовами навантаження у 200 кг. Моделювання дозволило підтвердити достатній рівень міцності конструкції та виявити слабкі місця та зони концентрації напружень, що стало основою для подальшого вдосконалення та топологічної оптимізації виробу.

Наступним етапом було проведено топологічну оптимізацію, яка дозволила знизити масу виробу без втрати фізико-механічних характеристик. Це рішення не лише покращило ергономічність, а й дозволило зменшити кількість витраченого матеріалу під час виробництва та підвищення його економічної ефективності на етапі виробництва.

3 РОЗДІЛ. ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Обґрунтування вибору матеріалів для фітнес-гачка

У процесі розробки конструкції фітнес-гачків особлива увага була приділена вибору матеріалів, які переважно використовуються в адитивних технологіях, зокрема 3D-друку, оскільки ці технології дають змогу створювати складні просторові форми з високим рівнем точності, водночас забезпечуючи економію сировини, гнучкість проектування та можливість швидкої модифікації конструкцій без зміни технологічного оснащення. Матеріали, що застосовуються в 3D-друку, мають відповідати низці ключових вимог, серед яких найважливішими є висока механічна міцність, стійкість до статичних і динамічних навантажень, а також стійкість до зношування.

Для забезпечення високої несучої здатності фітнес-гачка під час експлуатації, особливо під час роботи з великими ваговими навантаженнями, базовими критеріями для вибору матеріалу були: межа міцності на розтягнення, модуль Юнга, щільність, ударна в'язкість, а також стабільність характеристик під час тривалого циклічного навантаження. Обрані матеріали повинні були пройти попередню оцінку за сукупністю цих параметрів, а також мати доведену ефективність у сфері виготовлення елементів спортивного обладнання.

Серед обраних полімерів, які наразі найактивніше використовуються у 3D-друку для створення нашої конструкції, слід відзначити такі, як EPX 82 (Carbon), Thermoplastic Resin, Nylon 12, а також високоміцні термопласти, зокрема Polyetherketoneketone (PEKK). Кожен із них має свої переваги та недоліки, які було проаналізовано в контексті використання в різних частинах конструкції.

Матеріал EPX 82 (Carbon) є армованим термореактивним полімером, який характеризується високою жорсткістю, міцністю та стабільністю під час температурного та механічного навантаження. Завдяки вмісту карбонових волокон, EPX 82 забезпечує чудову міцність на розтяг (до 80 МПа), а також має

низький коефіцієнт теплового розширення, що критично важливо для деталей, які повинні зберігати геометричну стабільність. Матеріал має відмінну адгезію між шарами під час друку, що знижує ризик розшарування виробів за підвищених навантажень. У контексті фітнес-гачка цей полімер доцільно використовувати для виготовлення несучих частин конструкції.

Полімер Thermoplastic Resin має дещо нижчі показники міцності (близько 114 МПа), проте демонструє відмінну еластичність, що дозволяє ефективно поглинати енергію ударів. Його висока гнучкість забезпечує пружну деформацію без руйнування, що є перевагою для амортизаційних або вставних елементів конструкції. Thermoplastic Resin має кращу оброблюваність, що дозволяє використовувати його у вузлах, які можуть бути змінені або замінені за необхідності без перегляду всієї конструкції. У межах запропонованої конструкції його застосування виправдане у ролі матеріалу для виготовлення валка або полімерних прокладок.

Nylon 12 (або Поліамід 12) має високу ударну в'язкість, стабільність до впливу вологи та добрі антифрикційні властивості. Його густина становить близько 1130 кг/м³, а міцність – 82,8 МПа. Основна перевага Nylon 12 полягає в його довговічності та стабільній роботі під змінними навантаженнями. Завдяки цим характеристикам матеріал часто застосовується у функціональних прототипах і елементах, які потребують високої втомної міцності. У конструкції фітнес-гачка його доцільно використовувати як матеріал для гнучких частин, або для елементів, які контактують з грифом.

Polyetherketoneketone (PEKK) належить до класу високоміцних термопластів, які забезпечують виняткову міцність, стійкість до хімічних речовин, термічну стабільність та зносостійкість. Модуль пружності PEKK досягає 5,8 ГПа, а міцність – близько 61 МПа, що робить його придатним для застосування в різних галузях враховуючи страхове обладнання. Можна використати для виготовлення центрального стрижня або внутрішніх елементів, які приймають концентроване навантаження.

Сополімер поліетилентерефталату (PCTG) – це відносно новий вид пластику з посиленою ударною в'язкістю. Завдяки високій міцності та ударній в'язкості вироби з PCTG застосовують як конструкційні матеріали в різних галузях промисловості, їх використовують під час виготовлення захисних шоломів для екстремальних дисциплін вело- і мотоспорту. Також для поліпшення механічних властивостей застосовують і наповнені скловолокном композиції.

Загальні характеристики PCTG свідчать про його високу якість як витратного ресурсу для FDM-друку. Діаметр нитки становить 1,75 мм з допустимим відхиленням $\pm 0,05$ мм, що відповідає стандартним вимогам до більшості 3D-принтерів. Низький показник овальності ($\pm 0,02$ мм) гарантує стабільну подачу матеріалу під час друку і запобігає закупоренню екструдера. Лінійна маса нитки за зазначеному діаметрі становить 330–350 м/кг, що дозволяє розраховувати точну кількість матеріалу для кожного виробу та оптимізувати витрати на сировину.

Механічні властивості цього матеріалу демонструють добру здатність витримувати навантаження в умовах експлуатації, характерних для фітнес-обладнання. Густина матеріалу становить $1,12 \text{ г/см}^3$, що забезпечує баланс між легкістю та міцністю виробу. Матеріал експлуатується у широкому температурному діапазоні – від -30 до $+120$ °C, що робить його придатним для використання в умовах тренажерних залів з нерегулярними режимами кондиціонування або під час зберігання на складах без опалення.

Щодо механічної міцності, полімер має границю міцності на розтяг 150 МПа , що є достатнім показником для більшості елементів конструкції, які не піддаються точковим перевантаженням. Високе відносне видовження за розриву (50%) свідчить про добру еластичність і здатність матеріалу до деформацій без руйнування. Модуль пружності за розтягу та згині становить 5800 МПа , що дозволяє зберігати форму та жорсткість навіть за значних зусиль.

Міцність за згину (160 МПа) підтверджує придатність матеріалу для використання в структурних елементах із криволінійною або складною геометрією, де можливе виникнення навантаження на вигин. Хоча показник ударної в'язкості не вказаний, решта параметрів дає змогу зробити висновок про загальну ударостійкість матеріалу як прийнятну для спортивного обладнання середнього класу навантаження.

Окремої уваги заслуговує параметр водопоглинання: матеріал вбирає до 3% вологи за 24 години, температури 23 °С. Це означає, що він потребує захисту від тривалого впливу вологи або обробки спеціальними просоченнями для зменшення гідроскопічності, що особливо важливо для експлуатації в приміщеннях з підвищеною вологістю або під час довготривалого зберігання.

Обрані матеріали для конструкції фітнес-гачка повністю відповідають сучасним вимогам до спортивного обладнання – вони забезпечують високу міцність, легкість, ергономіку, стійкість до зношування й корозії, а також дозволяють гнучко реагувати на зміну геометрії виробу.

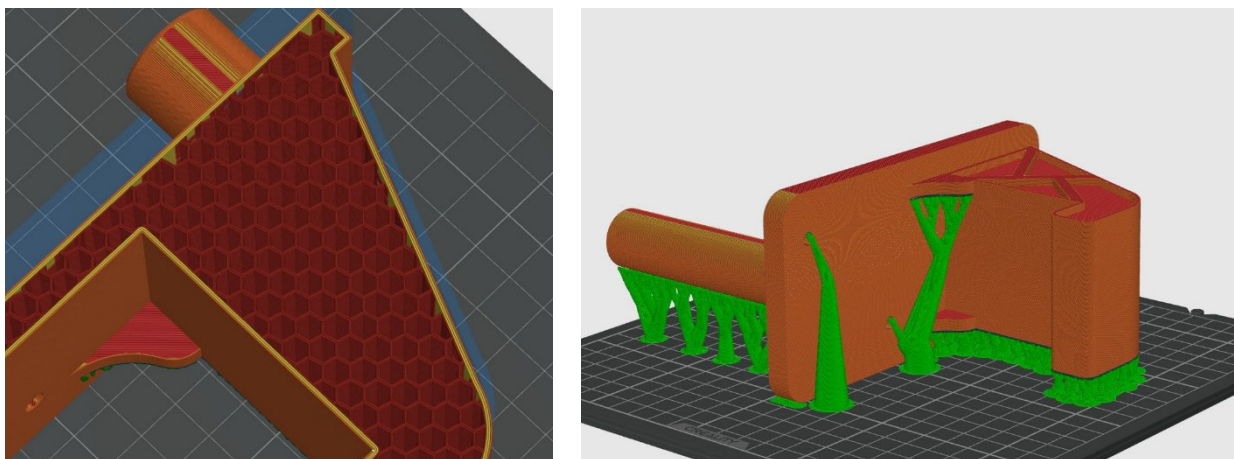
3.2 Технологія виготовлення модифікованої моделі фітнес-гачка

Виготовлення модифікованої моделі фітнес-гачка здійснюється із застосуванням технології FDM-друку (Fused Deposition Modeling), яка є однією з найбільш поширених та доступних форм адитивного виробництва. Обрана технологія дозволяє виготовляти міцні та функціональні деталі з високим рівнем точності, що відповідає сучасним вимогам до спортивного обладнання.

FDM-друк (Fused Deposition Modeling) – адитивна технологія, яка використовує розплавлену пластикову нитку для створення об'єктів (рис. 3.1).

Підготовка до друку починається з моделювання деталі у CAD-системі та експортування моделі у формат STL. Отриманий файл імпортується у слайсер – спеціальне програмне забезпечення, яке перетворює 3D-модель на послідовність інструкцій G-коду для друкарської платформи. У слайсері проводиться оптимізація розміщення моделі на друкарському столі (рис. 3.1),

з урахуванням мінімізації потреби в підтримках, рівномірного розподілу маси та забезпечення стійкості під час друку.



а
б
Рисунок 3.1 – Оптимізація розміщення моделі:
а – заповнення; б – підтримки

Процес починається з нагрівання пластику до рідкого стану. Потім принтер «видавлює» цей матеріал через сопло і формує об'єкт шар за шаром. Технологія FDM (рис. 3.2) підходить для виготовлення прототипів, функціональних деталей, елементів декору та освітніх проєктів.

Для забезпечення максимальної точності та механічної міцності виготовлюваної деталі встановлюються такі параметри друку:

1. Температура екструдера – 240...260 °С. Цей діапазон температур забезпечує оптимальне розплавлення нитки полімеру з урахуванням його складу, а також гарантує надійну адгезію між шарами.

2. Температура платформи – 60...70 °С. Нагріта робоча платформа сприяє зменшенню ризику деформацій та відриву першого шару, що є критично важливим для великих і масивних виробів, таких як фітнес-гачок.

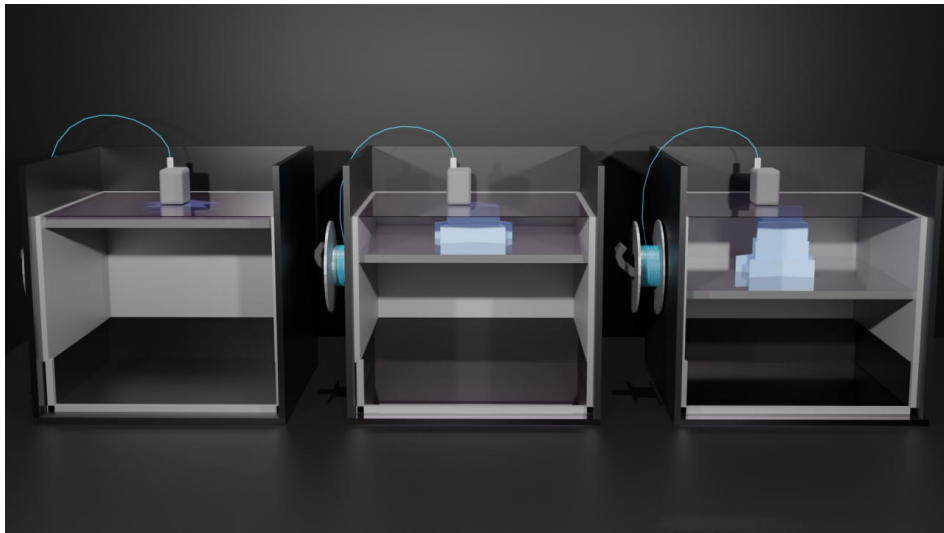


Рисунок 3.2 – Схема технологічного процесу FDM-друку

3. Швидкість друку від 30 до 80 мм/сек залежно від обраної ділянки деталі. Для зовнішніх контурів та функціонально важливих зон, таких як стрижень та стінка, використовується нижча швидкість (30...40 мм/сек) для підвищення точності. Для внутрішніх заповнень допускається збільшення до 60...80 мм/сек, що дозволяє пришвидшити загальний процес друку без втрати якості.

Важливою складовою успішного друку є правильне визначення висоти шару (зазвичай у межах 0,2...0,3 мм), а також типу та щільності внутрішнього заповнення. У даному проєкті рекомендовано застосування сотоподібної або трикутної структури заповнення з щільністю 70%, що забезпечує достатню жорсткість за економічного використання матеріалу.

Для забезпечення адгезії першого шару рекомендується використання клейкої основи або полімерної плівки (BuildTak, PEI), що значно покращує зчеплення моделі з платформою. Також актуальним є налаштування охолодження. використання закритого 3д принтера сприяє повільному охолодженню моделі, що запобігає деформаційній усадці матеріалу під час друку [12].

У разі потреби додаткової міцності, після завершення друку виріб може бути підданий термообробці в сушильній камері за температури,

рекомендованій виробником матеріалу (зазвичай 80...100 °C), що дозволяє зняти внутрішнє напруження та підвищити експлуатаційні характеристики.

Завершальним етапом є механічна обробка: видалення підтримок, зачистка контактних поверхонь, за необхідності – шліфування різьби для з'єднувальних елементів. У разі потреби додаткового захисту поверхні або поліпшення естетики допускається нанесення захисного лаку або фарбування. Слід зазначити, що фарбувати можна додаткові елементи, у якості унікального дизайну, основний колір елементів конструкції обирається під час закупівлі матеріалу.

Встановлено, що дана модифікована конструкція фітнес-гачка найкраще підходить для одиничного або дрібносерійного виробництва, де важливу роль відіграє можливість адаптації виробу під конкретні потреби замовника наприклад, створювати унікальний дизайн для замовника обравши або колір, що відповідає дизайну тренажерної зали, чи професійного закладу, або її унікальний логотип – символ цієї компанії. У таких умовах доцільно використовувати технологію FDM-друку, яка забезпечує гнучкість у виготовленні, невисоку вартість на етапі прототипування та дозволяє реалізовувати унікальні елементи дизайну, зокрема змінювати колір, наносити логотип компанії або додавати індивідуальні конструктивні особливості (рис. 3.3).

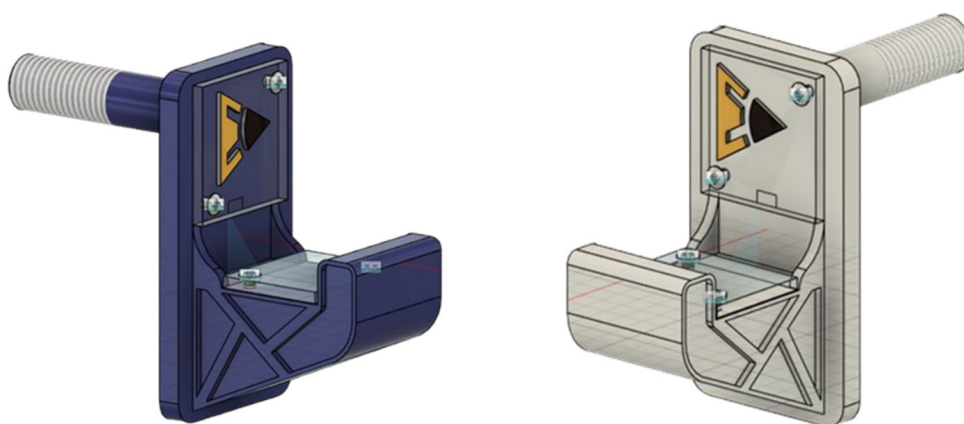


Рисунок 3.3 – Приклад оригінального дизайну фітнес-гачка

Водночас для середньо- та великосерійного виробництва доцільніше застосовувати технологію лиття під тиском, яка забезпечує високу точність, сталість геометричних характеристик та значно нижчу собівартість одиниці продукції під час виготовлення великої кількості однотипних деталей. Таким чином, вибір способу виробництва повинен залежати від цільового обсягу випуску та вимог до кастомізації, що забезпечує гнучкість підходу до реалізації продукту залежно від ринкових потреб.

3.3 Аналіз екологічних аспектів виробництва

Виробництво модифікованої моделі фітнес-гачка із застосуванням технології FDM-друку та сучасних матеріалів, зокрема сополімеру поліетилентерефталату (PCTG), EPX 82 (Carbon) та Nylon 12, супроводжується низкою екологічних викликів. Одним із ключових аспектів є енергоспоживання під час тривимірного друку, особливо з урахуванням потреби у підтриманні температур для екструзії окремих видів полімерів. Крім того, утворення відходів після видалення підтримуючих структур, бракованих виробів або залишків пластику вимагає розробки відповідної стратегії їх збору та подальшої переробки або утилізації, що відповідають сучасним екологічним вимогам.

FDM-друк демонструє помітні екологічні переваги порівняно з традиційними методами виробництва, такими як лиття під тиском. Однією з ключових переваг є значне зниження рівня відходів: під час друку використовується лише необхідна кількість матеріалу для формування виробу, тоді як обсяг надлишкових, як правило, не перевищує 5% і стосується переважно підтримуючих структур. Для порівняння, під час механічної обробки металу фрезеруванням на верстатах з ЧПК утворюється від 20 до 30% відходів, що потребують додаткової утилізації або переробки.

Залежно від типу та моделі 3D-принтера, енергоспоживання під час виготовлення одного виробу, зокрема фітнес-гачка масою приблизно 0,5 кг, становить від 0,2 до 0,5 кВт/год. Це суттєво нижче у порівнянні з

фрезеруванням чи литтям у форми, які можуть споживати від 1 до 3 кВт/год або навіть і більше в залежності від матеріалу на аналогічний виріб. Зниження енергоспоживання не лише впливає на економічну ефективність, але й зменшує вуглецевий слід технології.

Крім того, FDM-друк не передбачає застосування токсичних розчинників або хімічних реагентів, що характерно для деяких інших виробничих методів, наприклад, стереолітографії (SLA) чи селективного лазерного спікання (SLS), де використовуються фотополімерні смоли або тонкодисперсні порошки, які можуть вимагати спеціальних умов зберігання, обробки та утилізації через потенційну токсичність або леткість хімічних компонентів. Особливо це актуально під час використання матеріалів типу PCTG, які не виділяють летких органічних сполук (ЛОС) у процесі екструзії. Це не лише знижує ризики для здоров'я операторів, але й покращує загальну атмосферу на робочому місці, сприяючи комфортнішим умовам праці під час виробництва.

Однак FDM-друк має й екологічні недоліки, які слід враховувати під час оцінки загального впливу технології на зовнішнє середовище та довкілля. Одним із ключових факторів є потреба в нагріванні робочих елементів обладнання до підвищених температур: температура екструдера зазвичай становить від 240 до 260°C, а робочої платформи – від 60 до 70°C. Такий тепловий режим вимагає додаткового споживання електроенергії, що, у свою чергу, може збільшувати вуглецевий слід, особливо в регіонах, де переважають джерела енергії з високим рівнем викидів із використанням вугільної енергетики.

Крім того, хоча FDM-друк і характеризується загальним зменшенням відходів, створення підтримуючих структур складних геометрій призводить до утворення певної кількості дрібних пластикових залишків. Видалення таких підтримок із матеріалу PCTG потребує подальшого сортування та організованої переробки, інакше вони можуть потрапити до побутових відходів, ускладнюючи екологічну ситуацію.

Для зниження негативного впливу рекомендується впроваджувати використання енергоефективних моделей 3D-принтерів, вдосконалювати конструкцію виробів задля мінімізації об'єму підтримок, а також застосовувати електроенергію, отриману з відновлюваних джерел. Такий підхід дозволяє зменшити енергетичні витрати та зробити процес друку більш відповідним до екологічних вимог.

Сополімер поліетилентерефталату (PCTG) було обрано як основний матеріал для виготовлення елементів фітнес-гачка завдяки його високій міцності (60 МПа), еластичності (до 50% відносного видовження) та відносно низькій щільності (1120 кг/м³). Проте під час вибору матеріалу важливо враховувати не лише його фізико-механічні, але й екологічні характеристики.

З екологічної точки зору, PCTG не виділяє токсичних речовин у повітря під час експлуатації чи нагріванні до робочих температур (до 260°C), що гарантує безпечні умови як для користувача цим виробом, так і для навколишнього середовища. Це особливо важливо у закритих просторах, де концентрація шкідливих речовин у повітрі може впливати на здоров'я людини.

Щодо впливу вологи, PCTG має показник водопоглинання до 3% за 24 години при температурі 23°C. Така властивість вимагає захисту матеріалу від тривалого впливу вологого середовища з метою збереження їх розмірної стабільності та якості друку. Водночас, цей фактор не знижує екологічної безпеки матеріалу, адже PCTG не піддається розкладанню чи вивільненню небезпечних сполук у вологих умовах.

3.4 Можливості утилізації та переробки

По завершенні експлуатаційного циклу виробу, орієнтовна тривалість якого може становити від п'яти до десяти років залежно від інтенсивності використання та експлуатаційних вимог, фітнес-гачок із матеріалу PCTG підлягає утилізації або вторинній переробці. Основним і найбільш екологічно доцільним способом є переробка, яка передбачає подрібнення виробу до стану гранул діаметром 2–3 мм з наступним плавленням для виготовлення нових

ниток або деталей методом лиття під тиском. Перед початком цього процесу необхідно здійснити збір використаних виробів, очищення їх від забруднень, а також сортування за складом полімеру.

Якість вторинного матеріалу суттєво залежить від рівня чистоти первинної сировини. Перероблений РСТГ зберігає до 80–90% початкових механічних властивостей, що робить його придатним для повторного використання у виробництві, наприклад, спортивного обладнання, побутових товарів або пакувальних матеріалів. Таким чином, використання РСТГ сприяє зниженню кількості полімерних матеріалів. У разі змішування РСТГ з іншими видами полімерів можливе погіршення механічних властивостей гранул, що, у свою чергу, впливає на їхню придатність до повторного застосування. Тому ключовим фактором ефективності механічної переробки є налагодження сортування та первинної підготовки матеріалу.

У випадках, коли переробка є неможливою, наприклад через надмірну деградацію матеріалу, може бути застосований альтернативний метод утилізації – спалювання з рекуперацією енергії. Під час цього, в процесі виділяється до 20 МДж/кг теплової енергії з кожного кілограма матеріалу, що може бути використано для потреб опалення або виробництва електроенергії. Однак, незважаючи на енергетичну доцільність, цей метод вважається менш бажаним з екологічної точки зору через викиди вуглекислого газу, які можуть сягати приблизно 2,5 кг CO₂ на кожен кілограм спаленого РСТГ.

У порівнянні з іншими матеріалами, які також застосовуються у виробництві елементів фітнес-обладнання, РСТГ може бути більш переважним з точки зору екологічної збалансованості. Наприклад, термопластичні смоли (Thermoplastic Resin) мають складну структуру із вмістом стабілізаторів і пластифікаторів, що ускладнює їхню переробку та знижує загальну екологічну привабливість.

ЕРХ 82 як терморективний композит, після первинного формування втрачає здатність до повторного плавлення. Єдиним можливим варіантом є його подрібнення з подальшим використанням як наповнювача в

композиційних матеріалах, що обмежує сферу повторного застосування та не дозволяє зберегти основні фізико-механічні властивості. А його утилізація можлива лише через енергоємні хімічні процеси.

Nylon 12, попри те, що є перероблюваним термопластом, характеризується високою гігроскопічністю, що зумовлює необхідність попереднього ретельного висушування перед термічною обробкою. Цей додатковий етап підготовки істотно підвищує енерговитрати та негативно впливає на загальну ефективність утилізації матеріалу. Окрім того, процес його синтезу потребує значно більших енергетичних затрат порівняно з іншими поліамідами, що призводить до формування підвищеного вуглецевого сліду протягом усього життєвого циклу.

Сталь марки AISI 440C відзначається високою придатністю до вторинного використання – під час переплавлення можливо відновити до 95 % матеріалу без істотної втрати його механічних властивостей. Однак, попри цей екологічний потенціал, процес виробництва та повторної переробки такої сталі є вкрай енергоємним і супроводжується значними викидами вуглекислого газу. Це, у свою чергу, формує істотне екологічне навантаження та знижує загальну ефективність її застосування з точки зору вуглецевого сліду.

З екологічної точки зору титан і його сплави є матеріалом із суперечливими характеристиками. З одного боку, він має тривалий термін служби, високу корозійну стійкість та інертність до більшості агресивних середовищ, що зменшує потребу у заміні виробів і, відповідно, знижує загальний обсяг відходів. Однак процес добування та первинного виробництва титану є вкрай енергоємним і супроводжується високими викидами парникових газів, що значно збільшує його вуглецевий слід у порівнянні з багатьма іншими конструкційними матеріалами.

Що стосується можливості переробки, титан має високу придатність до вторинного використання. Сучасні технології дозволяють повторно використовувати титан без істотної втрати його механічних властивостей, особливо у вигляді стружки або залишків після механічної обробки. Переробка

титану є менш енерговитратною, ніж його первинне виробництво, однак вона вимагає ретельного сортування та очищення матеріалу від домішок, що ускладнює технологічний процес. Утилізація титану як відходу зазвичай не становить екологічної загрози, оскільки він не є токсичним і не вступає в небезпечні хімічні реакції з довкіллям, навіть за тривалого впливу.

Таким чином, титан і його сплави є матеріалом із високим потенціалом повторного використання, проте екологічна ефективність його застосування значною мірою залежить від оптимізації виробничого циклу, впровадження технологій замкнутого матеріального обігу та зменшення частки первинного металу в готовій продукції.

З огляду на наведене порівняння, PCTG демонструє найкраще співвідношення між простотою переробки, енерговитратами та збереженням функціональних властивостей у разі вторинного використання. Це підтверджує його перевагу як матеріалу, що відповідає принципам сталого розвитку та дозволяє реалізувати повноцінний замкнений цикл використання у виробництві фітнес-обладнання.

3.5 Висновки до розділу 3

В ході інженерно-технологічного розділу було проведено дослідження матеріалів, технологій виробництва та екологічних аспектів. На початковому етапі проведено обґрунтування вибору матеріалу для 3D-друку, де розглядалися як загальні властивості полімерів, так і їх відповідність технічним і екологічним вимогам. Було обрано основний матеріал PCTG – сополімері поліетилентерефталату, що поєднує необхідні механічні характеристики і придатність до вторинної переробки. Його фізико-механічні властивості виявилися найбільш відповідними для умов експлуатації фітнес-гачка, зокрема з огляду на здатність ефективно витримувати навантаження до 2000 Н, що припадає на кожен окремий елемент.

Охарактеризовано особливості адитивного виробництва з використанням технології FDM-друку. Було визначено, що така технологія є

доцільною у випадку дрібносерійного або одиничного виготовлення, оскільки вона забезпечує гнучкість виробництва, можливість виготовлення складних геометричних форм і адаптацію конструкції під потреби користувача. Також підкреслено переваги FDM-друку порівняно з іншими методами, зокрема в аспектах енерговитрат, вартості й простоти реалізації.

Встановлено, що FDM-друк у порівнянні з традиційними методами виробництва забезпечує зниження кількості відходів, зменшене енергоспоживання та відсутність токсичних викидів у повітря, що є ключовими перевагами в контексті впровадження принципів сталого розвитку. Крім того, аналіз виявив і окремі недоліки технології, зокрема додаткове енергоспоживання під час нагрівання екструдера та формуванням підтримуючих структур, що потребують ретельного планування дизайну конструкції для мінімізації втрат.

Матеріал PCTG продемонстрував хорошу придатність до повторного використання шляхом переробки. У порівнянні з такими матеріалами, як Thermoplastic Resin, EPX 82, Nylon 12 або нержавіючої сталі AISI 440C, титан та його сплави, саме PCTG вирізняється найкращим співвідношенням між екологічністю та функціональністю.

У результаті проведеного аналізу доведено, що запропонована технологічна схема виготовлення фітнес-гачків із використанням PCTG і FDM-технології є не лише технологічно ефективною, але й екологічно виправданою. Вона відповідає сучасним тенденціям у сфері ресурсозбереження, безвідходного виробництва та сталого розвитку.

4 РОЗДІЛ. ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Аналіз дефектів, які виникають під час виробництва

Під час виготовлення деталей за FDM-технологією існує певна ймовірність виникнення дефектів на етапі формоутворення виробу, що зумовлено не лише параметрами самого процесу, такими як температура екструзії чи швидкість укладання шару, а й багатьма іншими чинниками (рис. 4.1). У зв'язку з цим існують технологічні ризики, які безпосередньо впливають на якість готової продукції.

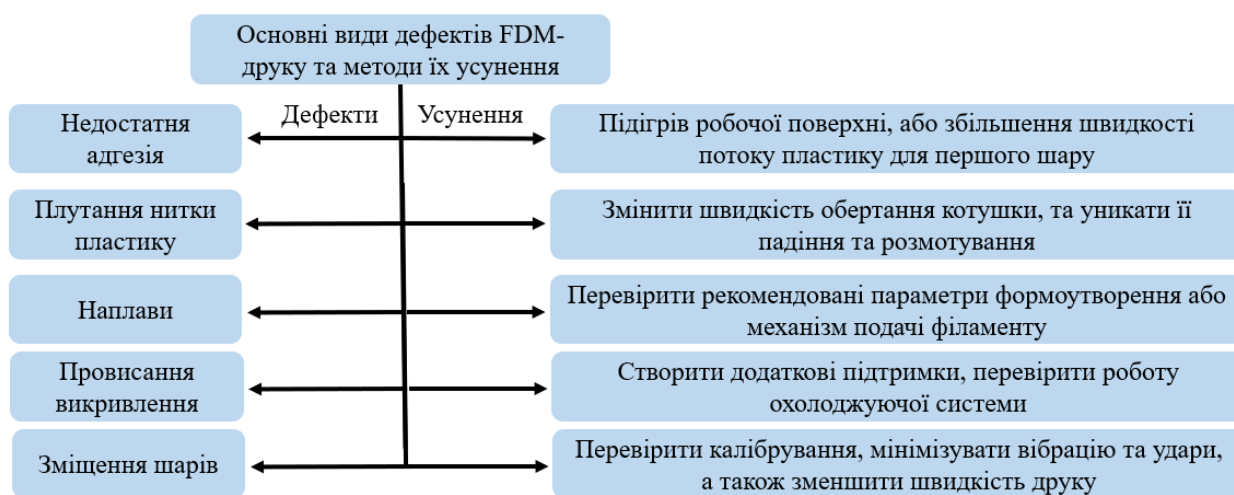


Рисунок 4.1 – Основні види дефектів під час FDM-друку та методи їх усунення

Також важливу роль у забезпеченні якості виробу відіграють фізико-хімічні властивості полімерних матеріалів, технічний стан обладнання та точність налаштування параметрів процесу. Зокрема, суттєве значення має якість попередньої підготовки матеріалу, насамперед його сушіння з метою усунення залишкової вологи, що безпосередньо впливає на стабільність екструзії та однорідність структури виробу. Крім того, справність і точність калібрування обладнання, правильне налаштування платформи побудови, а також ефективна адгезія виробу до друкованого столу мають вирішальне значення для забезпечення геометричної точності, надійного міжшарового зчеплення та загальної механічної цілісності моделі. Нехтування хоча б одним

із зазначених факторів може призвести до формування серйозних дефектів, що потребуватимуть повторного виготовлення виробу або навіть перегляду конструктивних рішень (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Дефекти, які виникають під час 3D-друку

Одним із найпоширеніших дефектів під час FDM-друку є недостатня адгезія першого шару до платформи, що призводить до часткового або повного відшарування моделі в процесі друку, деформації геометрії виробу, порушення точності формоутворення та, в окремих випадках, до повної втрати придатності надрукованого елемента. Така проблема може бути спричинена недостатнім нагріванням платформи, некоректним калібруванням висоти сопла, неякісною підготовкою поверхні або невідповідністю параметрів друку.

Вирішення проблеми поганої адгезії передбачає комплексний підхід, що включає ретельну підготовку обладнання перед початком друку, правильне налаштування температурних режимів, точне калібрування висоти сопла, підбір параметрів друку для першого шару та використання допоміжних засобів для покращення адгезії. Врахування цих аспектів є особливо важливим під час виготовлення виробів критичного призначення, таких як фітнес-гачки, де дефекти основи виробу можуть суттєво знизити експлуатаційні властивості кінцевого продукту.

Ще одним поширеним дефектом FDM-друку є надмірна або недостатня подача матеріалу. Ці два явища мають протилежні прояви, проте часто зумовлені однаковими причинами. Порушення точності подачі пластику призводить до погіршення якості поверхні, відхилень від проектної геометрії, зниження міцності виробу та виникнення внутрішніх напружень. Недостатня екструзія проявляється у вигляді щілин між лініями друку, неповного заповнення шарів або надмірної крихкості готового виробу. Такий дефект зазвичай пов'язаний із некоректно заданим коефіцієнтом подачі матеріалу, помилково вказаним діаметром філаменту в налаштуваннях принтера або механічними несправностями в системі подачі. У результаті погіршується міжшарове зчеплення, що критично впливає на здатність виробу витримувати навантаження.

У випадку надмірної екструзії спостерігається накопичення надлишкового матеріалу, утворення здуттів, деформацій поверхні, нашарувань та зміщення геометрії. Причинами цього дефекту є ті самі фактори: некоректне програмне налаштування, помилки в параметрах філаменту або збої в роботі подаючого механізму.

Розв'язання проблем, пов'язаних із подачею матеріалу, вимагає ретельної перевірки програмного забезпечення, точного введення параметрів матеріалу (зокрема фактичного діаметра філаменту), а також діагностики механіки принтера. Особливу увагу слід приділяти стану притискного вузла, шестерень та загальної справності екструдера, адже навіть незначні відхилення можуть спричинити нестабільну подачу матеріалу.

Також до дефектів під час виготовлення виробів методом FDM-друку може призвести надлишковий нагрів матеріалу. У випадку, коли полімер наноситься у перегрітому стані або платформа недостатньо охолоджується, шари не встигають затверднути вчасно. Це призводить до втрати проектної геометрії, деформацій, зсуву шарів та загального порушення точності формоутворення. Основною причиною надмірного нагрівання є невідповідність температурних параметрів екструзії та охолодження, а також неправильно підібрана швидкість друку. Якщо температура друку перевищує

допустимі значення, а охолодження є недостатнім, матеріал твердіє нерівномірно, що призводить до накопичення структурних дефектів.

Особливу загрозу для міцності та довговічності виробу становить розшарування шарів і поява тріщин. Такі дефекти є критичними, особливо у виробках, які повинні сприймати механічні навантаження. Основними причинами є використання вологого або неякісного філаменту, недостатня температура екструзії та надмірна висота шару. При зниженій температурі розплавлений полімер недостатньо з'єднується з попереднім шаром, а велика висота шару ускладнює дифузію між рівнями, що знижує структурну цілісність виробу.

Для усунення таких дефектів необхідне ретельне налаштування параметрів друку: підвищення температури екструзії в межах рекомендованих значень для обраного матеріалу, зменшення висоти шару та контроль якості й вологості філаменту перед друком. Сушіння матеріалу перед використанням є обов'язковою процедурою, особливо при друці гігроскопічних полімерів.

Серйозною проблемою є також зміщення шарів, що зазвичай вказує на наявність несправностей у механічних або електронних компонентах принтера. Такий дефект суттєво порушує геометричну точність і унеможливорює використання виробу, особливо якщо йдеться про елементи, що працюють під навантаженням. Зміщення шарів може бути зумовлене зносом або послабленням приводних ременів, нестабільною роботою крокових двигунів, збоєм у системі управління або надмірною швидкістю переміщення друкуючої головки. Усунення цього дефекту потребує перевірки механічної цілісності конструкції принтера, правильного натягування ременів, діагностики електроніки, а також корекції параметрів друку, зокрема зниження швидкості переміщення друкуючої головки з урахуванням інерційного навантаження.

4.2 Методи контролю якості фітнес-гачків

Забезпечення належної якості фітнес-гачків, виготовлених методом FDM-друку, є важливим етапом у виробничому процесі, особливо з огляду на

функціональне навантаження, яке вони повинні витримувати під час експлуатації. Контроль якості таких виробів повинен охоплювати перевірку як геометричних і механічних характеристик, так і цілісності структури та відповідності експлуатаційним вимогам.

Усі дефекти, зазначені в попередньому розділі призводять до зниження міцності фітнес-гачків, що є критичним у випадку їх використання для страхування під час роботи зі значною вагою штанги, що може призвести до травм, тому для забезпечення якісного та безпечного виконання вправ ці заходи є найважливішими в технологічному процесі фітнес-гачків. Розроблення ефективних методів контролю та усунення дефектів є необхідною складовою забезпечення якості продукції.

Для забезпечення якості виготовлення та безпеки експлуатації модифікованої моделі фітнес-гачка застосовуються як візуальні, так і неруйнівні методи контролю.

Передусім, здійснюється візуальний контроль, який дозволяє виявити основні зовнішні дефекти, зокрема розшарування, щілини, пропуски екструзії, здуття, деформації чи нерівномірність поверхні. Такий контроль проводиться після завершення друку за допомогою візуального огляду виробу при природному або підсиленому освітленні. Особливу увагу приділяють цілісності основи та зони кріплення. Цей метод є простим, доступним і ефективним для первинної перевірки якості виробу одразу після виготовлення.

Для оцінки геометричної точності виробу доцільно використовувати штангенциркуль. Вимірювання критичних розмірів (товщина стінок, діаметр валів для кріплення) дозволяє перевірити відповідність моделі цифровому кресленню. Наявність відхилень більше ніж на 0,2 мм у відповідальних елементах (наприклад, у зоні опори штанги) може свідчити про необхідність корекції параметрів друку.

Варто зазначити, що візуального контролю недостатньо для виявлення внутрішніх дефектів, які можуть суттєво впливати на міцність конструкції під час навантаження.

Одним із ключових аспектів контролю якості є перевірка міцності міжшарового зчеплення, що прямо впливає на загальну надійність фітнес-гачка. Для дослідження міжшарового зчеплення та аналізу розподілу механічних напружень у структурі виробу, виготовленого за FDM-технологією, доцільним є проведення експериментальних механічних випробувань. Зокрема, ефективним методом є тестування на згин, що дозволяє оцінити здатність матеріалу протистояти навантаженням, які викликають кривизну зразка. Такий підхід відповідає вимогам міжнародного стандарту ASTM D790, який регламентує проведення триточкового випробування на згин термопластичних матеріалів і композитів. Під час цього випробування зразок зазнає навантаження, де важливу роль відіграє не лише міцність, а й якість міжшарового з'єднання.

Окрім того, для оцінки опору виробу розтягувальним навантаженням рекомендовано використовувати випробування відповідно до стандарту ISO 527. Цей метод дозволяє визначити характеристики матеріалу, зокрема модуль пружності при розтягуванні, межу плинності, граничну міцність і відносне подовження до розриву. Під час такого аналізу стає можливим встановити, наскільки рівномірно розподіляється навантаження по тілу зразка та чи не виникають локальні зони концентрації напружень, які можуть свідчити про технологічні дефекти друку або недостатню адгезію між шарами.

Для проведення експериментального дослідження механічних властивостей зразків, виготовлених за допомогою FDM-друку з матеріалу PCTG, використовуються стандартизовані геометричні параметри випробувальних зразків відповідно до вимог міжнародних нормативних документів. Зокрема, для випробування на вигин застосовується стандарт ASTM D790, який регламентує використання зразків типу I з розмірами 127 мм завдовжки, 12,7 мм завширшки та 3,2 мм завтовшки (рис. 4.3, а). Така конфігурація дозволяє адекватно оцінити опір матеріалу до згинального навантаження та виявити можливі недоліки міжшарового зчеплення.

Для оцінки розтягувальних характеристик зразки виготовляються відповідно до стандарту ISO 527-2, який передбачає використання зразків типу 1А або 1В. Зразок типу 1А має загальну довжину 170 мм, ширину 10 мм і товщину 4 мм, робоча зона розтягування становить 80 мм. У випадках, коли обсяг вихідного матеріалу є обмеженим, допускається використання зразків типу 1В з аналогічною шириною та товщиною, проте загальною довжиною 150 мм (рис. 4.3, б). Дані геометричні параметри забезпечують відповідність умов випробування вимогам стандартизованих методик та дозволяють отримати коректні результати для подальшого аналізу напружено-деформованого стану.

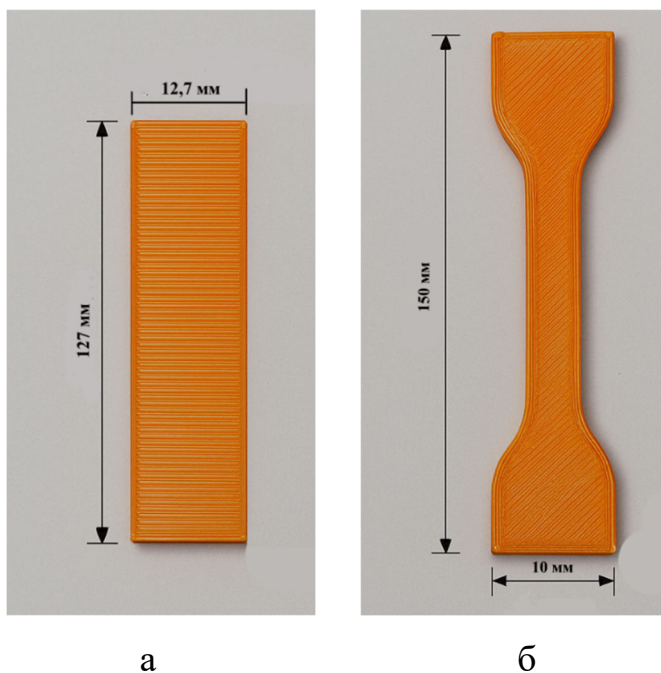


Рисунок 4.3 – Зразки для механічних випробувань:

а – вигин; б – розтягування

Орієнтація зразків у просторі під час друку також має важливе значення, оскільки саме напрямок укладання шарів суттєво впливає на результати досліджень, особливо у контексті оцінки міжшарової адгезії. Тому зразки повинні виготовлятися у режимах, що максимально наближені до режимів виготовлення готового виробу. Такий підхід забезпечує репрезентативність

результатів та підвищує достовірність висновків, отриманих у ході експериментальних випробувань.

У випробуванні на згин за ASTM D790 використовується триточкова схема навантаження, за якої зразок розміщується на двох опорах із заданим прольотом, а навантаження прикладається посередині з фіксованою швидкістю переміщення індентора. Визначення гнучкості, модуля пружності при згині, а також межі згину проводиться шляхом реєстрації навантаження та відповідної деформації до моменту руйнування/

У випробуванні на розтягування за ISO 527-2 зразок закріплюється в захватах розривної машини, і до нього прикладається осьове навантаження зі сталою швидкістю переміщення 3 мм/хв. Реєстрація подовження та навантаження дозволяє визначити ключові характеристики: модуль пружності при розтягненні, межу міцності, відносне подовження до розриву та характер руйнування (табл 4.1).

Таблиця 4.1 - Показники механічних властивостей PCTG

Випробування	Показник	Середнє значення
Розтягнення (ISO 527)	Модуль пружності за розтягнення	2100 МПа
	Межа міцності за розтягнення	152 МПа
	Відносне подовження до розриву	30%
Згин (ASTM D790)	Модуль пружності за згину	2200 МПа
	Межа міцності за згину	165 МПа
	Деформація до моменту руйнування	6%

Згідно з результатами механічних випробувань, максимальна межа міцності при згині для PCTG досягає 65 МПа, а межа міцності при розтягуванні становить до 52 МПа. Враховуючи, що гачок у реальних умовах піддається переважно вигинальному навантаженню, саме характеристика міцності на згин є ключовою для оцінки його працездатності.

Для подальшого обґрунтування допустимості навантаження проведено аналітичну оцінку напружень. За умови, що навантаження 2000 Н припадає на критичну ділянку гачка з умовною площею поперечного перерізу 100 мм², відповідне робоче напруження становитиме приблизно 20 МПа. Це значення є суттєво нижчим за граничну міцність матеріалу, що свідчить про наявність запасу міцності. Розрахунковий коефіцієнт безпеки у цьому випадку становить приблизно 3, що відповідає технічним вимогам для деталей, які працюють під статичним або квазідинамічним навантаженням.

Слід зазначити, що досягнення вказаного рівня міцності можливе лише за умови оптимізації параметрів друку. Зокрема, забезпечення високого ступеня заповнення (не менше 80–100 %), правильного вибору орієнтації шарів (перпендикулярно до прикладеного навантаження), стабільної температурної підтримки та відсутності міжшарових дефектів є критично важливими для формування достатньої механічної цілісності виробу.

Таким чином, при дотриманні зазначених умов виготовлення, фітнес-гачок з PCTG, надрукований методом FDM, здатен надійно витримати навантаження до 2000 Н з достатнім запасом міцності, що дозволяє розглядати його як перспективний варіант для використання в умовах спортивних залів і тренувальних платформ.

Також додатково можна провести динамічне випробування, яке передбачає багаторазове циклічне навантаження фітнес-гачка із застосуванням періодичних змін напрямку сили. Для цього використовується випробувальний стенд, який імітує реальні умови експлуатації під час виконання вправ. Деталь піддається впливу сили, що змінюється у межах від 500 Н до 1500 Н із частотою 1...2 Гц. Кількість циклів встановлюється залежно від необхідного експлуатаційного ресурсу та становить, як правило, не менше 100 000 циклів. У ході випробувань контролюються параметри пружної деформації, появи тріщин і залишкової деформації.

Після завершення випробувань проводиться порівняння початкових та кінцевих геометричних розмірів виробу. Під час виявлення залишкових

деформацій, що перевищують допустимі значення, або появи тріщин фітнес-гачок або передається на ліквідацію дефектів, або бракується.

4.3 Економічна ефективність виготовлення фітнес-гачка з полімерних матеріалів

Оцінка економічної ефективності модифікованої конструкції фітнес-гачка свідчить про доцільність використання адитивних технологій, зокрема FDM-друку, у дрібносерійному та одиничному виробництві. Основна перевага цього підходу полягає у можливості уникнення витрат, пов'язаних із виготовленням прес-форм, спеціальної оснастки та дорогого металообробного інструменту, які є обов'язковими для традиційних методів, таких як фрезерування або лиття під тиском. Це особливо важливо на етапі прототипування або у разі виготовлення обмежених партій продукції, де високі початкові капіталовкладення можуть бути економічно необґрунтованими.

Подальшим чинником, що підвищує економічну доцільність, є впровадження топологічної оптимізації, яка дозволила зменшити масу виробу без втрати його функціональних характеристик. Оптимізована геометрія сприяє скороченню витрат матеріалу, зменшенню часу друку та зниженню навантаження на обладнання, що позитивно впливає на собівартість виробу.

FDM-друк також характеризується високим рівнем енергоефективності. Виготовлення одного виробу в середньому споживає від 0,2 до 0,5 кВт/год залежно від геометричних параметрів моделі, температури друку та ступеня заповнення. Цей показник суттєво нижчий у порівнянні з фрезеруванням, яке потребує 1...2 кВт/год, або литтям під тиском, де споживання енергії може досягати 3 кВт/год на виріб. Зменшення енергоспоживання сприяє не лише зниженню експлуатаційних витрат, а й покращенню екологічних показників виробництва шляхом скорочення вуглецевого сліду.

Гнучкість технології FDM-друку полягає у можливості оперативного внесення змін у конструкцію виробу без потреби у модифікації обладнання чи розробці нової технічної документації. Це значно скорочує терміни підготовки

виробництва та дає змогу швидко адаптувати продукт до змін ринкових потреб або індивідуальних запитів замовника. Особливо це важливо у випадках створення прототипів, коли оновлення конструкції може здійснюватися за лічені дні, тоді як аналогічний процес у литті під тиском займає від кількох тижнів до місяців через потребу виготовлення прес-форм вартістю від 5000 до 10000 доларів США.

Ще однією важливою перевагою адитивного виробництва є мінімальні втрати матеріалу під час формування виробу. Завдяки поетапному нашаруванню об'єм відходів не перевищує 5% від загальної маси, здебільшого у вигляді допоміжних структур. Для порівняння, механічна обробка металу призводить до втрат у межах 20...30% від маси заготовки, що значно підвищує витрати на сировину та її утилізацію.

Вартісна оцінка матеріалів підтверджує ефективність FDM-друку. Сучасні термопластики, такі як PCTG, Thermoplastic Resin, EPX 82 або Nylon 12, забезпечують необхідні механічні характеристики та довговічність. Їхня середня ринкова ціна становить 30...150 доларів США за кілограм залежно від складу, властивостей і призначення. Для фітнес-гачка масою 0,5 кг витрати на матеріали складають 15...50 доларів США, що є прийнятним для дрібносерійного або індивідуального виробництва.

Для порівняння, нержавіюча сталь AISI 440C коштує 5...10 доларів за кілограм, але витрати на її обробку традиційними технологіями збільшують собівартість на 20...30%, роблячи метали економічно вигідними лише для великосерійного виробництва.

Лиття під тиском ефективно для масового виробництва (понад 1000 одиниць), де собівартість одного виробу знижується до 2...5 доларів США. Однак висока вартість прес-форм і тривалий цикл підготовки обмежують його доцільність при частих змінах геометрії або потребі швидкого запуску.

Перейдемо до висновку, що застосування FDM-друку у поєднанні з полімером PCTG демонструє високу економічну та технологічну ефективність у межах дрібносерійного та одиничного виробництва. Поєднання низьких

витрат на обладнання, економного споживання енергії, можливості швидкої адаптації конструкції та зниженого рівня відходів робить даний підхід раціональним вибором у контексті сучасного промислового дизайну та функціонального прототипування. У перспективі така технологія здатна забезпечити стійке, адаптивне та ресурсоефективне виробництво елементів фітнес-обладнання.

4.4 Висновки до розділу 4

Аналіз дефектів, які виникають під час виробництва фітнес-гачків методом FDM-друку, свідчить про значний вплив технологічних параметрів і стану обладнання на якість готової продукції. Недостатня адгезія першого шару до платформи, спричинена некоректним калібруванням сопла чи недостатнім нагріванням, призводить до деформацій і втрати геометричної точності, що критично для виробів із функціональним навантаженням. Надмірна або недостатня подача матеріалу, зумовлена помилками в налаштуваннях або механічними несправностями, погіршує міжшарове зчеплення та міцність, вимагаючи точної діагностики екструдера та програмного забезпечення. Надлишковий нагрів матеріалу та недостатнє охолодження викликають деформації й порушення формоутворення, що потребує оптимізації температурних режимів і швидкості друку для забезпечення структурної цілісності.

Методи контролю якості фітнес-гачків забезпечують відповідність виробів експлуатаційним вимогам завдяки комплексному підходу. Візуальний контроль дозволяє виявляти зовнішні дефекти, такі як розшарування чи деформації, забезпечуючи первинну оцінку якості одразу після друку. Вимірювання геометричних параметрів штангенциркулем підтверджує відповідність критичних розмірів цифровому кресленню. Механічні випробування за стандартами ASTM D790 та ISO 527 демонструють, що PC TG має межу міцності за згину 65 МПа та за розтягування 52 МПа, що підтверджує здатність гачка витримувати навантаження до 2000 Н.

Економічна ефективність FDM-друку для виготовлення фітнес-гачків проявляється у зниженні витрат на дрібносерійне виробництво порівняно з традиційними методами. Витрати на матеріали для гачка масою 0,5 кг становлять 15...50 доларів США, що є прийнятним для індивідуального виробництва, тоді як прес-форми для лиття під тиском коштують 5000...10000 доларів США, обмежуючи їх доцільність переважно для великосерійного і масового виробництва. Топологічна оптимізація зменшує масу виробу, скорочуючи час друку та витрати матеріалу, а енергоефективність FDM (0,2...0,5 кВт/год) значно перевищує фрезерування (1...2 кВт/год) і лиття (3 кВт/год). Мінімальні втрати матеріалу (до 5%) порівняно з механічною обробкою (20...30%) додатково підвищують економічну привабливість технології.

Комбінація полімерів із антифрикційними властивостями та пружною деформацією покращує ергономіку та знижує ризик пошкоджень інвентарю.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було розроблено удосконалену модель фітнес-гачка з урахуванням сучасних вимог до міцності, безпеки, технологічності та економічної доцільності. Робота охоплює повний цикл інженерного проєктування, від аналізу існуючих конструкцій до експлуатаційної та екологічної оцінки, що забезпечило комплексний підхід до вдосконалення виробу.

Аналіз існуючих огляд сучасних конструкцій фітнес-гачків виявив їх високу матеріаломісткість і обмежену адаптивність до адитивних технологій, що стало основою для модернізації. Також розглянуті вимоги до експлуатації страхувального обладнання та типові матеріали, які застосовуються для його виготовлення.

Функціонально-вартісний аналіз показав можливість зменшення кількості компонентів, зокрема виключення валка, що знизило собівартість на 16% без втрати функціональності. Тривимірне моделювання та аналіз методом скінченних елементів у середовищах Fusion 360 і Ansys підтвердили, що модифікована конструкція з полімеру PCTG витримує навантаження до 2000 Н, а максимальні напруження в критичних зонах не перевищують 20 МПа при межі міцності матеріалу 65 МПа за згину. Топологічна оптимізація зменшила масу виробу на 15%, скоротивши витрати матеріалу та час друку.

Вибір PCTG обґрунтовано його механічними характеристиками (міцність 52...65 МПа, модуль пружності 2100...2200 МПа) та екологічною перевагою: матеріал придатний до переробки з відновленням 80...90% властивостей, а його утилізація супроводжується низькими викидами (до 2,5 кг CO₂/кг).

FDM-друк продемонстрував економічну ефективність для дрібносерійного виробництва з витратами 15...50 доларів США на виріб масою 0,5 кг, енергоефективністю 0,2...0,5 кВт/год і мінімальними відходами

(до 5%), порівняно з фрезеруванням (1...2 кВт/год, 20–30% відходів) чи литтям під тиском (3 кВт/год, прес-форми 5000...10000 доларів США).

Контроль якості, що включає візуальний огляд, вимірювання геометричних розмірів і механічні випробування за стандартами ASTM D790 та ISO 527, забезпечує виявлення дефектів, таких як розшарування чи недостатня адгезія, гарантуючи надійність. Використання полімерів EPX 82 для накладок із антифрикційними та амортизаційними властивостями знижує шум і ризик пошкодження грифа штанги, а різьбове з'єднання підвищує жорсткість кріплення.

Отримані результати засвідчили, що запропонована модель фітнес-гачка є ефективною, безпечною, економічно доцільною й екологічно виправданою. Конструкція має потенціал до впровадження в практику виробництва спортивного обладнання, а також створює передумови для розробки нових стандартів у галузі страхувального обладнання. Результати роботи можуть бути використані для подальших досліджень у напрямку проектування елементів спортивного інвентарю з полімерних матеріалів, а також для створення інноваційних продуктів, що відповідають вимогам сталого розвитку.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies.
2. BFJ Combo Roller J-Hooks. *Bridge*. URL: <https://bridgebuilt.com/products/bfj-combo-roller-j-hooks> (date of access: 10.11.2024).
3. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction
4. Metals Handbook Desk Edition. Materials Park / ed. by J. R. Davis. 2nd ed. ASM International, 2002. 1521 p.
5. Budinski K., Budinski M. Engineering Materials: Properties and Selection. 9th ed. Pearson, 2010. 792 p.
6. High-Load Oil-Embedded Sleeve Bearings. *Lily Bearing*. URL: <https://www.lily-bearing.com/products/gjfnbei/> (date of access: 10.11.2024).
7. Autodesk Inc. (2023). Fusion 360: Stress Simulation Guide. URL: <https://autodesk.com/fusion360> (date of access: 10.11.2024).
8. Метал-холдінг – анодований алюміній: що це і де застосовується. (04.10.2024). Металопрокат URL: https://metal-holding.ua/ua/blog/anodirovannyj-aluminij/?srsltid=AfmBOoqHvYpeYnQPqFayMPKhyxC4NgAV9JLk_r6DGgWbecq-UnoX_4ll.
9. Веста – Каталог нержавіючої сталі AISI технічні характеристики та хімічний склад URL: [https://westa.kiev.ua/ua/standarty/marki-stali/stal-aisi-304#:~:text=%D0%A3%20%D1%85%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%83%20%D1%81%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D1%96%20%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%83%20AISI,%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D1%8C%20\(9%2D11%25\)](https://westa.kiev.ua/ua/standarty/marki-stali/stal-aisi-304#:~:text=%D0%A3%20%D1%85%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%83%20%D1%81%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D1%96%20%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%83%20AISI,%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D1%8C%20(9%2D11%25)).

10. Ukirs Довідник / Нержавіюча Сталь Марка 440С URL:
<https://ukirs.com.ua/%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA/%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%B0%D0%B2%D1%96%D1%8E%D1%87%D0%B0-%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C-%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%B0-aisi-440c-en-1-4125-din-x105crmo17>

11. Метод осадження плавленням ВИКОРИСТАНІ МАТЕРІАЛИ
Полімолочна кислота [PLA] https://www.researchgate.net/figure/Fused-deposition-method-MATERIALS-USED-Poly-Lactic-Acid-PLA_fig1_333683386

12. MonoFilament технічні та механіко-фізичні характеристики для полімеру PCTG URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/pctg/pctg-belyj-o1-75mm-ves0-75kg>