

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ДОВГОПОЛОВ АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ



УДК 539.3:621.9

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ РОЗ'ЄМНОГО ГВИНТОВОГО
З'ЄДНАННЯ, ФОРМОУТВОРЕНОГО В АРМОВАНОМУ
КОМПОЗИЦІЙНОМУ МАТЕРІАЛІ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник –

кандидат технічних наук, доцент
Некрасов Сергій Сергійович,
Сумський державний університет,
доцент кафедри технології
машинобудування, верстатів та інструментів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Львов Геннадій Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри динаміки та міцності машин;

кандидат технічних наук, доцент
Шийко Олександр Миколайович,
Сумський національний аграрний університет,
доцент кафедри технічного сервісу.

Захист відбудеться « » грудня 2019 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2)

Автореферат розіслано « » листопада 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Є. М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасного машинобудування є пріоритетним в Україні. Використання нових матеріалів у машинобудуванні дозволяє вивести виробництво на якісно новий рівень і підвищити його ефективність. У той самий час складання деталей машин потребує великої кількості роз'ємних з'єднань, оброблення поверхонь яких мало досліджене, тому на цьому етапі розвитку використовують в основному нероз'ємні з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів (АКМ). Дослідження формоутворення поверхонь роз'ємних з'єднань деталей машин дозволить розширити використання армованих композитів у машинобудуванні. Тому, актуальними є розроблення нових способів формоутворення роз'ємних поверхонь деталей із представлених матеріалів та використання нових геометричних форм цих поверхонь. Водночас необхідне дослідження якості, точності та міцності формоутворених роз'ємних поверхонь на деталях з армованих композиційних матеріалів.

На сьогодні гвинтові з'єднання з різьбою спеціального профілю мало використовуються для з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Причинами цього є, складність виготовлення даних профілів, особливо внутрішніх, за рахунок відсутності технологічних можливостей. У свою чергу, різьба круглого профілю за рахунок конструктивних особливостей, а саме відсутності гострих концентраторів напружень через відповідну форму, якнайкраще підходить для реалізації роз'ємного гвинтового з'єднання в деталях із представлених матеріалів. Таким чином, реалізація концепції створення міцного гвинтового з'єднання з круглою різьбою – завдання актуальне й потребує детального дослідження та подальшого вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету в рамках наукових досліджень для МОН України за темами: «Комплексна розробка методів підвищення ефективності оброблення важкооброблюваних матеріалів у різних температурно-кліматичних умовах за рахунок удосконалення різальних інструментів та умов їх застосування» (номер державної реєстрації №0115U000510) та «Підвищення ефективності технологічних процесів виготовлення деталей та складання машин шляхом вдосконалення методів механічної обробки конструкційних матеріалів, технологічного устаткування та оснащення, систем якості організації та методів викладання технічних дисциплін» (державний реєстраційний номер 0116U000933).

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – забезпечення міцності гвинтового роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів шляхом формоутворення різанням гвинтової поверхні.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

- виявити фактори, що знижують експлуатаційні характеристики роз'ємних з'єднань у деталях з армованих композиційних матеріалів;
- розробити методику одержання коефіцієнтів визначального рівняння зі стандартних механічних випробувань;
- розробити методики теоретичних досліджень міцності гвинтового з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів, що дозволяє оцінити

напруження і деформації в з'єднанні;

– теоретично та експериментально дослідити вплив параметрів геометрії гвинтового з'єднання на міцність у деталях з армованих композиційних матеріалів;

– розробити і перевірити практичні рекомендації запропонованого способу з'єднання деталей з армованого композиційного матеріалу.

Об'єктом дослідження є міцність роз'ємного гвинтового з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – роз'ємне гвинтове з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів.

Методи дослідження. Під час виконання дисертаційної роботи використовували сучасні методи модельних та натурних досліджень. Для дослідження контактних напружень і напружено-деформованого стану в з'єднанні використовували метод скінченно-елементного аналізу, реалізований у програмі LS-DYNA. Одержання даних про фізико-механічні характеристики армованого склопластикового матеріалу та знаходження коефіцієнтів визначального рівняння виконано за допомогою модернізованої машини УМЕ-10ТМ шляхом дослідження на розтягування (ASTM D 3039/D) та стискання (ASTM D 6641/D) стандартних і спеціальних зразків за нормальних температур. Експериментальні дослідження процесу формоутворення гвинтової поверхні роз'ємного з'єднання проводили на вертикально-фрезерному верстаті 6Р13Ф3 із системою ЧПК WL4M. Одержання основних показників міцності гвинтового з'єднання з круглою різьбою в деталях з армованих композиційних матеріалів здійснене з використанням універсальної розривної машини Р20 шляхом експериментального дослідження компонентів з'єднання на стискання. Планування модельних і натурних експериментів та оброблення їх результатів виконані на основі теорії багатофакторного експерименту. Реалізовано чисельні моделі з використанням ліцензійного програмного забезпечення в рамках міжнародного наукового стажування за програмою академічної мобільності в Західночеському університеті (м. Пльзень, Чехія).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому.

– уперше визначено вплив параметрів гвинтового з'єднання на його міцність в деталях з армованих композиційних матеріалів, що дозволило встановити залежність міцності з'єднання від геометрії профілю;

– уперше теоретично обґрунтовані технологічні параметри нарізання круглих гвинтових поверхонь методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах з ЧПК, в армованих композиційних матеріалах для забезпечення максимальної міцності гвинтового з'єднання;

– уперше запропоновано методологічні основи визначення максимальної несучої здатності в з'єднанні з армованого композиційного матеріалу в залежності від механічних характеристик та геометрії профілю круглої різьби.

Практичне значення одержаних результатів для технічно передових галузей виробництва полягає у створенні технології формоутворення поверхні роз'ємного з'єднання для деталей, виготовлених з АКМ, та розробленні алгоритму дослідження міцності цього роз'ємного з'єднання з круглою різьбою за різних напружено-деформованих станів. Ці розробки в сукупності з усіма ознаками

розширюють можливість використання роз'ємних з'єднань у машинобудуванні та виводять використання АКМ на новий рівень.

Основні результати роботи впроваджено у виробництво на підприємстві ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус» (м. Суми), державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» (м. Дніпро), а також під час підготовки науково-дослідних і кваліфікаційних робіт студентів.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи одержані здобувачем самостійно, серед яких обгрунтований вибір об'єкта та предмета дослідження, обгрунтування плану експерименту, його реалізація та безпосередня участь в обробленні результатів. Унаслідок проведеного аналізу науково-технічної літератури в роботах [1, 2] здобувачем систематизовані дані щодо з'єднань, використовуваних для деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, та розглянута можливість виготовлення якісно нового роз'ємного з'єднання деталей, виготовлених із представлених матеріалів. Разом із науковим керівником було поставлено мету, завдання дослідження та відпрацьовано структуру дисертації. Написання статей і патентів відбувалося в співавторстві з науковим керівником та студентами кафедри. Експериментальні дослідження проводив здобувач самостійно або із залученням співробітників кафедри.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та одержали позитивну оцінку на V та VII Міжнародних науково-технічних конференціях «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів, 2016 р., 2018 р.), а також на Сьомій міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017 р.). Основні положення й результати дисертації доповідалися та обговорювалися на Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми 2016, 2017 рр., на Міжнародній науково-практичній конференції «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво» (м. Суми, 2017 р.), XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Машинобудування очима молодих» (м. Краматорськ, 2018 р.) та на XIX Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 120 річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та Механіко-машинобудівного інституту, «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2018 р.).

Публікації. Основні результати дослідження опубліковано в 17 наукових публікаціях, з яких 5 у виданнях, що входять до переліку фахових видань України та індексуються в міжнародних науко-метричних базах, 1 статтю опубліковано в іноземному виданні, 10 тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях та 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 150 сторінок, зокрема 62 рисунка і 22 таблиці в тексті дисертації, переліку використаних джерел із 102 найменувань на 10 сторінках, 4 додатка на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й завдання, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність роботи. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянута детальна класифікація з'єднань деталей виготовлених з армованих композиційних матеріалів (АКМ), з якої на підставі комплексного аналізу визначено, що з'єднання деталей виготовлених із представлених матеріалів, поділяють на суцільні, механічні та комбіновані.

Систематизація науково-технічних джерел інформації в галузі машинобудування засвідчила, що найбільше використовують суцільні та механічні типи з'єднань для деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, з якими проводять дослідження, пов'язані з точністю, якістю та міцністю з'єднань чи конструкцій з їх використанням.

Проектуванням та дослідженням з'єднань деталей, виготовлених з АКМ займалися відомі вітчизняні та зарубіжні вчені: Я. С. Карпов, В. В. Воробйов, С. С. Сироткін, В. А. Матвієнко, І. М. Буланов, Г. В. Комаров, М. І. Семін, А. А. Baker, М. С. Niu, R. W. Messler, R. Zemann та ін.

Робота з науковими працями дозволила встановити, що на сучасному етапі розвитку машинобудівної галузі, найчастіше використовують нероз'ємні з'єднання деталей, виготовлених з армованих композитів – клейові, заклепкові, зварні та інші. Що ж стосується роз'ємних з'єднань деталей, виготовлених з АКМ, то найбільш застосовуваними є гвинтові з'єднання, які мають свою специфіку виготовлення та застосування, але сама конструкція цього типу з'єднання є роз'ємною. Цей тип з'єднання деталей, виготовлених з армованих композитів, реалізується або за допомогою виготовлення різьби на поверхнях з'єднаних деталей (її конструкція, а саме діаметр і профіль, відрізняється від конструкції стандартних типів різьб що у свою чергу, спричиняє додаткові труднощі під час її виготовлення), або за допомогою розміщення в деталях з АКМ металевих кріпильних вставок, в яких уже виконана різьба, через яку й відбувається подальше з'єднання.

Проведений літературний огляд дозволив установити що роботи багатьох зарубіжних вчених серед яких: L. Adam, G. Catalanotti, D. J. Elder, С. Menna, E. M. Carra, присвячені дослідженню міцності та моделюванню напружено деформованого стану гвинтового з'єднання із металевою вставкою, оскільки цей спосіб найчастіше використовується для деталей з АКМ. Що ж стосується, гвинтових з'єднань з різьбою, формоутвореною на поверхні деталей, виготовлених з АКМ, то вони мало використовуються, основна причина цьому – відсутність достовірної інформації про показники міцності цих з'єднань. У свою чергу, згідно з більшістю літературних джерел гвинтові поверхні зі спеціальним профілем (наприклад, круглим) повинні мати непогані показники міцності при формоутворенні їх на деталях з АКМ, але оскільки немає технології що забезпечила б якісне формоутворення різьб із цим профілем, експериментальне дослідження міцності даного гвинтового профілю, формоутвореного на деталях з АКМ, є неможливим.

Робота над опрацюванням науково-технічної літератури за цією тематикою підтвердила, що завдання, пов'язані з розробленням нових технологій фор-

моутворення гвинтових поверхонь зі спеціальним профілем на деталях, виготовлених з АКМ, та подальше дослідження міцності з'єднання з цим профілем актуальні і потребують вирішення.

Другий розділ присвячено отриманню механічних та пружних характеристик АКМ, та розробленню теорії формоутворення різанням внутрішньої гвинтової поверхні з круглим профілем у деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Для досягнення поставленої мети насамперед обрано матеріал, армований скляними волокнами, як матрицю, використовували епоксидну смолу. Дослідні зразки для визначення фізико-механічних вла-

Таблиця 2 – Основні фізико-механічні характеристики епоксидної смоли EPOXY-520.

Міцність при:	розтягуванні, МПа	220
	стисканні, МПа	55
	згинанні, МПа	110
Модуль пружності, МПа		1 793
Коефіцієнт Пуассона		0,33
Густина матриці, кг/м ³		1 150
Відносне залишкове видовження при розтягуванні, %		5

Сполchemie. Основні фізико-механічні характеристики наповнювача наведені в таблиці 2.

Далі було проведено комплекс експериментів з одержання фізико-механічних властивостей армованого склопластикового матеріалу. Для визначення механічних характеристик склопластику під час розтягування використовували плоскі зразки у вигляді вирізаних із багатошарових пластин смужок шириною 15–17 мм, армованих у двох взаємно перпендикулярних напрямках (схема укладання $[0^\circ/90^\circ]_{12}$) згідно ASTM D 3039/D. Пластини виготовляли методом ручного укладання з односпрямованих шарів склотканини. Розміри решітки склотканини становили (0,5x0,5 мм), товщина тканини 0,2 мм, для зв'язку армуючих елементів в єдине ціле застосовували епоксидна смола. Для видалення залишків епоксидної смоли було застосоване пресування під тиском із використанням модифікованої універсальної розривної машини УМЕ-10ТМ, сила дії становила 30кН (рис. 1).

Склопластикову пластину для нарізання в ній круглої різьби виготовляли за аналогічною технологією під тиском та з ідентичних компонентів. Єдина відмінність – кількість шарів склотканин, що становила 220 шарів, у результаті формування за запропонованою технологією під зовнішнім тиском її товщина становила 16 мм.

На рисунку 2 наведено фото дослідження склопластикового зразка на міцність під час розтягування. Зразок закріплений спеціально розробленими фіксаторами, та установлений на модифікованій універсальній розривній машині УМЕ-10ТМ.

Таблиця 1 – Технічні характеристики склотканини марки T20–270.

Міцність при розтягуванні, МПа	1 100
Модуль пружності, ГПа	45
Коефіцієнт Пуассона	0,24
Маса одиниці площі склотканини, кг/м ²	1 500

тивостей та пластину для формоутворення в ній внутрішньої гвинтової поверхні виготовляли з матриці та волокна з такими параметрами: склопластикова тканина марки T13–270 згідно з ISO1886-90 (табл. 1), як матрицю використовували епоксидну смолу EPOXY-520 згідно з ISO 6272-2:2011, виробник Чеська компанією

Для дослідження на розтягування були виготовлені п'ять зразків, розміри яких заведені до таблиці 3. Границі міцності матеріалу під час дослідження його на розтягування наведені в таблиці 4.

Дослідження склопластикових зразків на стискання також проводились на модифікованій універсальній розривній машині УМЕ-10ТМ. Для цього були додатково виготовлені запропонованою технологією п'ять зразків, розміри яких зведені до (табл.3.) дослідження проводилися згідно ASTM D 6641/D. На рисунку 3 наведено фото зразка при дослідженні на стискання, закріпленого в спеціальному пристрої на дослідній машині.

Для отримання пружних характеристик армованого склопластикового матеріалу, була використана методика згідно ASTM D 3039 / D, на основі якої експериментально визначаються модуль пружності та коефіцієнт Пуассона при розтягуванні. Для визначення зазначених характеристик використовувалися плоскі зразки аналогічні як і при дослідженні на міцність, кількість зразків 10 штук.

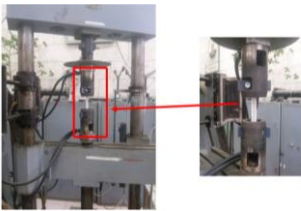


Рисунок 2 – Дослідна установка для дослідження склопластикового зразка на розтягування

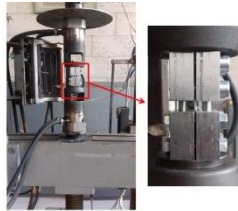


Рисунок 3 – Фото зразка закріпленого в спеціальному пристрої на дослідній машині

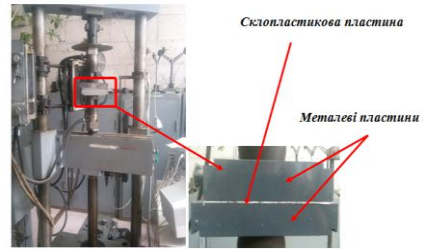


Рисунок 1 – Загальний вигляд установки для виготовлення дослідних зразків

Для визначення деформацій представлених зразків проводилося з використанням методу тензометрування, за допомогою розривної машини моделі 2007 Р – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету.

Для вимірювання деформацій використовувалися тензорезистори КФ4П1–3–200 з базою 10мм. Середнє значення коефіцієнта тензочутливості $K = 2,0 \cdot 10^{-6}$. Наклеювання тензорезисторів відбувалося у відповідності інструкції з наклеювання АЖВ 2.782.001 ТО.

Таблиця 3 – Розміри дослідних зразків для дослідження їх на розтягання та стискання

Зразок	Відстань між опорами l, мм	Ширина b, мм	Товщина h, мм
1 роз.	150	14,6	1,2
2 роз.	150	15,4	1,2
3 роз.	150	14,9	1,2
4 роз.	150	15,4	1,2
5 роз.	150	14,9	1,2
1 ст.	11,2	17,0	1,9
2 ст.	11,2	17,2	1,9
3 ст.	11,2	17,3	1,8
4 ст.	11,2	17,1	1,9
5 ст.	11,2	16,0	1,8

Таблиця 4 – Параметри міцності представлених зразків

Зразок	Граничне навантаження, F_B кН	Гранична міцність σ_B , МПа	Вид руйнування згідно ASTM D 3039/D	Вид руйнування згідно ASTM D 6641/D
1 _{роз.}	3,45	198,1	AGM	-
2 _{роз.}	3,07	168,6	LAT	-
3 _{роз.}	3,45	198,1	LAT	-
4 _{роз.}	3,45	192,5	LAT	-
5 _{роз.}	3,81	205,7	LAT	-
1 _{ст.}	2,34	70,3	-	HAT
2 _{ст.}	2,92	80,9	-	HAT
3 _{ст.}	2,46	75,2	-	HAT
4 _{ст.}	2,87	79,5	-	HAT
5 _{ст.}	2,94	98,3	-	HAT

HAT – поперечний в робочій зоні зверху, AGM – під кутом в робочій зоні посередині, LAT – прямий збоку біля прихвату.

Для вимірювання вихідних сигналів тензорезисторів та представлення звітів у цифровому вигляді використовувалася вимірювальна система тензометрична СПТ – 3. Дослідна установка на базі розривної машини моделі 2007 Р – 0,5 із використанням системи тензометричної СПТ – 3 для визначення пружних характеристик склопластику при розтягуванні представлена на рисунку 4. Отримані в результаті експерименту модулі пружності та коефіцієнти Пуассона для кожного із зразків зведені до таблиці 5.

Одержавши всі фізико-механічні характеристики армованого склопластикового матеріалу та провівши виготовлення склопластикової пластини для нарізання в ній внутрішньої гвинтової поверхні, було розроблено технологію формоутворення різанням представленої поверхні.

Таблиця 5 – Отримані в результаті експерименту модулі пружності та коефіцієнти Пуассона для кожного із дослідних зразків

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ср.зн
E_t , Па	11,87	12,39	13,29	13,97	12,39	12,47	12,71	12,67	12,41	12,47	12,67
ν_p	0,13	0,12	0,14	0,10	0,13	0,14	0,18	0,19	0,12	0,13	0,13

На підставі конструктивного аналізу наукових досягнень останніх років було вирішено нарізати в склопластиковому армованому матеріалі різьбу круглого профілю, оскільки вона краще з усіх типів різьб працює на зріз, характеризується досить великою стійкістю та підвищеним опором динамічним навантаженням за рахунок відсутності гострих концентраторів напружень. Така конфігурація гвинтового з'єднання в АКМ була обрана внаслідок того, що ці матеріа-



Рисунок 4– Дослідна установка для визначення пружних характеристик склопластику при розтягуванні

ли погано витримують навантаження на розтягування та стискання порівняно з деякими металами, а також на зсув, подібна геометрія гвинтового профілю дозволить уникнути поганих показників міцності і не допустити виникнення гострих концентраторів напружень у профілі з'єднання.

Профіль цієї різьби поданий на рисунку 5, основні параметри різьби – це крок різьби p , глибина профілю різьби t , зовнішній D та внутрішній D_1 діаметри різьби та r_1 і r_2 – радіуси вершин і западин профілю відповідно. За основу технології виготовлення гвинтових поверхонь був узятий раніше розроблений спосіб обробки круглих різьб методом огинання, оскільки лише в цьому методі геометрія інструмента не впливає на формування профілю різьби. Армовані композити краще обробляти гостро заточеним різцем. Ще однією перевагою цього методу є те, що обробка гвинтової поверхні відбувається за один прохід, це зменшує час обробки, а отже, й час контакту ріжучої кромки з АКМ також зменшується, що позитивно впливає на сам процес різання і не допускає миттєвого зростання температур та зношення кромки.

Для нарізання круглої різьби в армованому склопластиковому матеріалі цією технологією був виготовлений однозубий інструмент, що має гострий кут заточування, з особливо малозернистого твердого сплаву K55SF, виробник – фірма Guhring (Німеччина). Інструмент виготовляли методом ручного заточування із твёрдосплавного циліндра діаметром 6 мм, довжиною 35 мм. На рисунку 6 а) наведене фото однозубого інструмента що кріпиться в спеціальній втулці, а на рисунку 6 б) – 3D-модель інструмента виконана в середовищі SOLIDWORKS.

Для виконання формоутворення гвинтової поверхні методом огинання його було адаптовано конкретно для нашого випадку. Для цього додатково у систему обробки було введено розточувальний пристрій, що допоможе реалізувати процес нарізання різьби в армованому склопластиковому матеріалі за запропонованою технологією, на ньому встановлюється діаметр формотворної $d_{ф-м}$ (рис. 7 а)) точки, розрахований за формулою 1. Цей розточувальний пристрій наведений на рисунку 7.

Після отримання всіх елементів системи різання для проведення процесу формоутворення різанням круглої різьби, та визначення всіх конструктивних параметрів для обробки, було успішно виготовлено круглу різьбу в армованій склопластиковій пластині запропонованою технологією. Схема обробки круглої різьби однозубим інструментом у склопластиковому армованому матеріалі наведена на рисунку 7 а). Згідно з цією схемою армований матеріал обробляється однозубим інструментом, закріпленим у розточувальному пристрої, що закріплю-

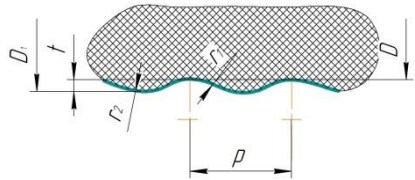


Рисунок 5 – Основні параметри круглої внутрішньої різьби



Рисунок 6 – Однозубий інструмент для обробки круглої різьби: а) інструмент, закріплений у спеціальній втулці; б) 3D-модель інструмента

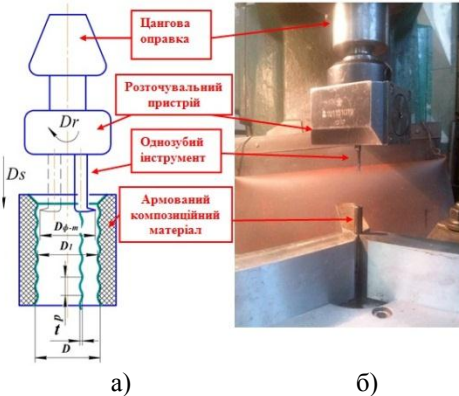


Рисунок 7 – Обробка круглої різьби в АКМ: а – спрощена схема обробки; б – фото процесу обробки.

тального матеріалу для обробки армованих композиційних матеріалів.

Величину діаметра траєкторії формотворної точки $d_{\phi-m}$, (рис. 7 а)) для обробки круглої різьби визначають за формулою 1:

Обробка круглої різьби виконували з однієї установки заготовки внутрішній діаметр не виконували, фаску для заходу різьби також не виконували як окрему операцію.

Третій розділ присвячено розробленню імітаційної моделі для дослідження напружено-деформованого стану роз'ємного з'єднання з круглою різьбою в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Моделювання напружено-деформованого стану представленого гвинтового з'єднання проводили методом скінченно-елементного аналізу. Для цього був розроблений спеціальний алгоритм (рис. 8).

У нашому випадку для перевірки адекватності запропонованої моделі методом СЕА було вирішено моделювати роз'ємне гвинтове з'єднання з круглою різьбою, для якої основними параметрами, що впливають на працездатність з'єднання, вважаються p – крок різьби і t – глибина профілю різьби, (профіль зображено на рис. 5).

Для моделювання використовували круглу різьбу з параметрами, що змінювалися у відповідних

Рисунок 8 – Алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану з'єднання методом скінченно-елементного аналізу

межах – глибина профілю різьби t – від 0,5 до 1,0 мм, а крок різьби p – від 1,0 до

4,0 мм. У таблиці 6 наведені значення основних параметрів круглої різьби для кожного з випадків, для яких було виконане моделювання напружено-деформованого стану з'єднання.

Реалізація алгоритму показаного на рисунку 8, буде наведена для варіанта круглої різьби з параметрами $p = 4 \text{ мм}$, $t = 1 \text{ мм}$. Гайка з АКМ з круглою внутрішньою різьбою та металева вставка (абсолютно жорстке тіло) із зовнішньою різьбою були виконані у вигляді 3D-CAD-моделей в графічному редакторі SOLIDWORKS, для скорочення часу розрахунків із з'єднання був вирізаний окремих сегмент, над яким і були проведені всі подальші операції, (рис. 9.) Згідно з рекомендаціями зазначеними в роботі Д. В. Криворучко, для одержання достовірних даних моделювання методом скінченно-елементного аналізу між зовнішньою та внутрішньою гвинтовими поверхнями з'єднання був заданий гарантований зазор 0,05 мм (рис. 9).

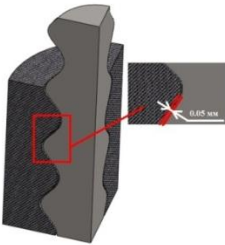


Рисунок 9 – 3D-CAD-модель з'єднання в графічному редакторі SolidWORKS

Створення скінченно-елементної сітки виконане засобами SOLIDWORKS, до складу якого входить модуль скінченно-елементного аналізу COSMOSWORKS, що має вбудований генератор представленої сітки. У нашому випадку використовували тетраедричні скінченні елементи (СЕ) з 10 вузлами. Розмір скінченних елементів гайки з АКМ вибирали виходячи з того, щоб розрахунок займав прийнятний час. Розмір грані СЕ становив від 0,05 до 0,15 мм. У місцях контакту двох гвинтових поверхень розміри СЕ були зроблені меншими для одержання більш достовірних результатів. Скінченно-елементна сітка металевої вставки була зроблена зі значно більших елементів, оскільки це впливає на час розрахунків, а напруження та деформації в ній будуть значно меншими, ніж у деталі з АКМ. На рисунку 10 подана СЕ-сітка елементів запропонованого з'єднання.

Механічні граничні умови задавали жорстким закріпленням декількох границь гайки з АКМ. У цьому разі гайку жорстко закріплювали по зовнішній діаметральній поверхні (рис. 11). Для вставки задавали обмеження переміщення вздовж осей 1 та 2. Початкові умови для вставки задавали поступальним переміщенням її вздовж осі 3, з відповідною швидкістю.

Під час моделювання всі пружні характеристики армованого композиційного матеріалу (тобто створення моделі матеріалу) задавали як для лінійного пружного ортотропного тіла, отримання всіх фізико-механічних характеристик

Таблиця 6 – Основні параметри різьби для кожного випадку моделювання

№	t	p
1	1	4
2	1	1
3	0,5	4
4	0,5	1
5	0,75	2,5

Згідно з рекомендаціями зазначеними в роботі Д. В. Криворучко, для одержання достовірних даних моделювання методом скінченно-елементного аналізу між зовнішньою та внутрішньою гвинтовими поверхнями з'єднання був заданий гарантований зазор 0,05 мм (рис. 9).

Створення скінченно-елементної сітки виконане засобами SOLIDWORKS, до складу якого входить модуль скінченно-елементного аналізу COSMOSWORKS, що має вбудований генератор представленої сітки. У нашому випадку використовували тетраедричні скінченні елементи (СЕ) з 10 вузлами. Розмір скінченних елементів гайки з АКМ вибирали виходячи з того, щоб розрахунок займав прийнятний час. Розмір

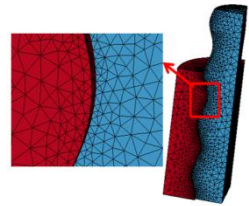


Рисунок 10 – Скінченно-елементна сітка елементів системи моделювання

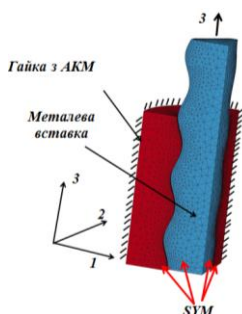


Рисунок 11 – Розрахункова схема та граничні умови моделі НДС з'єднання з армованих композиційних матеріалів

вості армованого склопластикового матеріалу для моделювання. У таблиці 8 наведений опис моделі матеріалу в командному файлі LS-DYNA.

Функцію *HOURGLASS в даному разі використовували для процедури пригнічення безенергетичних форм деформацій елементів, для перевизначення значень – за замовчуванням. Щодо моделі матеріалу вставки (абсолютно жорсткого тіла) із зовнішньою круглою різьбою, то для неї було використане ключове слово *MAT_RIGID, модель матеріалу – тип 20. Деталі, описані цим матеріалом, вважаються абсолютно твердими тілами.

Таблиця 8 – Опис моделей матеріалу в командному файлі LS-DYNA

*MAT_COMPOSITE_DAMAGE								
MID	RO	E_A , МПа	E_B , МПа	E_C , МПа	PRBA	PRCA	PRCB	G_{AB} , МПа
22	$2,0 \cdot 10^{-6}$	12688,09	12688,09	6538,42	0,13	0,22	0,22	2145,26
G_{BC} , МПа	G_{CA} , МПа	K_{fail}	AOPT	MACF	–	–	–	–
1827,09	1827,09	0	2,0	1,0	–	–	–	–
X_P	Y_P	Z_P	A_1	A_2	A_3	–	–	–
0	0	0	1,000	0	0	–	–	–
V_1	V_2	V_3	D_1	D_2	D_3	BETA	–	–
0	0	0	0	1,0	0	0	–	–
S_C , МПа	X_T , МПа	Y_T , МПа	Y_C	ALPH	S_N	S_{YZ}	S_{ZX}	–
50,0	195,0	195,0	80,0	0	0,0	0,0	0,0	–

Форму контакту під час виконання моделювання задавали такою: початковий зсув (тобто зазор та початкове зміщення не враховуються), контакт без поділу (ковзання допускається). Контакт задавали між двома формоутвореними гвинтовими поверхнями, за допомогою ключового слова *CONTROL CONTACT, тип контакту визначали модулем *CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE ID. За допомогою цього алгоритму можна одержати стійкий розв'язок контактної задачі.

описано в 2 розділі, а їх математичне формулювання описано в роботах С. М. Верещакі. Ці характеристики були одержані шляхом дослідження зразків з армованого склопластикового матеріалу на розтягування та стискання. Підставивши дані значення в розрахункові залежності С. М. Верещакі, отримуємо технічні сталі пружності розглянутих багатошарових композитів, наведені в таблиці 7.

Для внесення механічних характеристик запропонованої моделі матеріалу до командного файлу LS-DYNA було використане ключове слово для опису моделі матеріалу *MAT_COMPOSITE_DAMAGE, яке дозволило в повному обсязі задати всі механічні власти-

Таблиця 7 – Пружні характеристики армованого матеріалу

$E_1 = E_x$, ГПа	$E_2 = E_y$, ГПа	$E_3 = E_z$, ГПа
12,68	12,68	6,53
$\nu_{21} = \nu_{yx}$	$\nu_{31} = \nu_{zx}$	$\nu_{32} = \nu_{zy}$
0,13	0,22	0,22
$G_{12} = G_{xy}$, ГПа	$G_{23} = G_{yz}$, ГПа	$G_{31} = G_{zx}$, ГПа
2,14	1,82	1,82

Модель тертя вважали такою: було зазначено, що тертя, яке відбувається між елементами з'єднання, - це кулонівське тертя, основним параметром потрібним для моделювання, був коефіцієнт тертя, його визначали експериментально за рахунок визначення кута тертя. У нашому випадку не враховували різницю між тертям ковзанням і тертям спокою, також не було залежності від швидкості ковзання.

В дослідженні вважалось, що руйнування відбувається пошарово і в моделі з'єднання, виконаного в товстій композитній пластині, використовували критерій міцності руйнування композиційного матеріалу за F. K. Chang та K. Y. Chang. Взагалі в літературі описано 4 механізми руйнування роз'ємних гвинтових з'єднань в плані: розтріскування матриці, руйнування матриці від стискання та від зсуву та розрив волокон. В застосованому в роботі критерії міцності ці механізми враховано. Критерій міцності при розтяганні розраховувався за формулою 2. У цій формулі σ_t та ε_{t2} нормальні напруження вздовж волокон та дотичне напруження в площині армування відповідно. Y_t границя міцності при розтяганні вздовж волокон $\sigma_t \geq 1$, τ_{t2} - кут зсуву в площині армування та ε_{t2}'' - граничний кут зсуву – кутова деформація, що відповідає границі міцності при зсуві. Якщо, $e_M \geq 1$ – результат незадовільний, і навпаки якщо $e_M < 1$ результат достовірний.

Для врахування при моделюванні використовували нелінійні залежності Н. Т. Hahn, та S. W. Tsai, які представлені формулою 3. У цій формулі G_{xy} модуль зсуву в площині армування, α – експериментальна константа. Що визначалася при випробуваннях на зсув.

У свою чергу критерій міцності було перераховано з урахуванням зсуву у вигляді представленою формулою 4. Якщо в результаті розрахунку $e_M \geq 1$ – результат є недостовірним а коли $e_M < 1$ – достовірним. У цій формулі S_c – границя міцності при зсуві в площині армування.

Критерій міцності при наявності стискальних напружень взято при моделюванні Z. Hashina, що розраховувався за формулою 5. Наша імітаційна модель також доповнена врахуванням зсуву в площині армування та руйнування волокон за K. Chang та K.Y. Chang, що враховувалося формулою 6.

$$\left(\frac{\sigma_1}{Y_t}\right)^2 + \frac{\int_0^{\varepsilon_{t2}} \tau_{t2} d\varepsilon_{t2}}{\int_0^{\varepsilon_{t2}''} \tau_{t2} d\varepsilon_{t2}} = e_M^2 \quad (2) \quad \varepsilon_{t2} = \left(\frac{1}{G_{t2}}\right) \tau_{t2} + \beta \tau_{t2}, \quad (3) \quad \left(\frac{\sigma_1}{Y_t}\right) + \frac{\frac{\tau_{t2}^2}{2G_{t2}} + \frac{3}{4} \beta \tau_{t2}^4}{\frac{S_c^2}{2G_{t2}} + \frac{3}{4} \beta S_c^4} = e_M^2, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\sigma_2}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{Y_c} + \frac{\frac{\tau_{t2}^2}{2G_{t2}} + \frac{3}{4} \alpha \tau_{t2}^4}{\frac{S_c^2}{2G_{t2}} + \frac{3}{4} \beta S_c^4} = e_d^2, \quad (5) \quad \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right) + \frac{\frac{\tau_{t2}^2}{2G_{t2}} + \frac{3}{4} \beta \tau_{t2}^4}{\frac{S_c^2}{2G_{t2}} + \frac{3}{4} \beta S_c^4} = e_f^2. \quad (6)$$

У результаті розрахунку ми отримали тензори напружень у гауссових точках скінченних елементів. На рисунку 12 показаний графік залежності результуючої сили від переміщення, виконаний у табличному процесорі MS-Excel для роботи з електронними таблицями, для варіанта з основними параметрами різби $p = 4 \text{ мм}$, $t = 1 \text{ мм}$

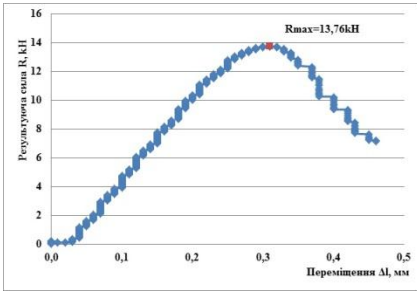


Рисунок 12 – Графік залежності результуючої сили від переміщення

Відповідно до цього графіка ми бачимо, що максимальне значення сили для даного випадку становить $R_{max} = 13,76 \text{ кН}$, це підтверджує запропоновану на початку гіпотезу, згідно з якою гвинтове з'єднання з різьбою круглого профілю повинно мати високі показники міцності, що визначаються за несучою здатністю, при формоутворенні її на деталях з армованих композиційних матеріалів



Рисунок 13 – Середні показники сили, одержані в результаті моделювання

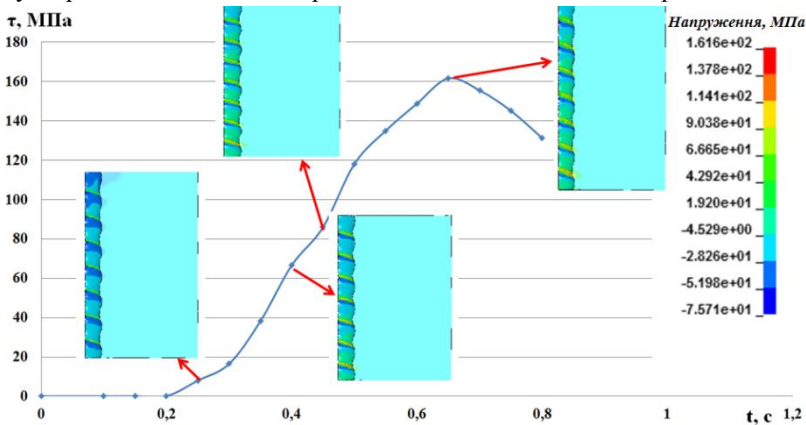


Рисунок 14 – Показники дотичних напружень у середовищі LS-DYNA ($t=0,5 \text{ мм}$, $p=4 \text{ мм}$)

Після одержання показників міцності за несучою здатністю для першого випадку з'єднання з основними параметрами зазначеними в таблиці 5, проведемо моделювання для всіх інших випадків. Усі одержані значення сили показано на рисунку 13, що наглядно ілюструє одержані в результаті моделювання методом скінченно-елементного аналізу, середні значення сили для кожного конкретного випадку. На рисунку 14 показані показники дотичних напружень для варіанту $p = 4 \text{ мм}$, $t = 0,5 \text{ мм}$ в залежності часу дії навантаження.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження міцності роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою формоутвореного в АКМ. Практична перевірка міцності, була проведена виконанням експериментального дослідження з одержанням показника міцності (несучої здатності) для кожного з

випадку з'єднання з відповідними змінними параметрами. У процесі експерименту змінювалися аналогічні параметри, як і під час моделювання, а саме основні параметри круглої різьби: p – крок різьби та t – глибина профілю різьби (табл. 7).

Для реалізації перевірки необхідно було виготовити елемент з'єднання із зовнішньою різьбою, ця різьба була нарізана на металевих вставках, в яких основні параметри змінювалися також відповідно до даних моделювання.

Профіль круглої зовнішньої різьби з основними параметрами показаний на рисунку 15, згідно якого, p – крок різьби, глибина профілю різьби t , зовнішній d_1 та внутрішній d діаметри різьби та r_1 і r_2 – радіуси вершин і западин профілю відповідно.

Зазначені металеві вставки виготовляли раніше відомим способом із конструкційної сталі, марка сталі «Сталь 45», ескіз цієї вставки наведений на рисунку 16 а), фото «вставки круглої різьби» з кроком різьби 4 мм та глибиною профілю різьби 1 мм – на рисунку 16 б). Схема формоутворення різьби представлена на рисунку 17 а), фото даного процесу на рисунку 17 б).

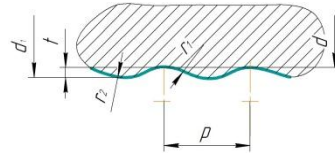


Рисунок 15 – Профіль круглої різьби із зазначенням всіх основних параметрів

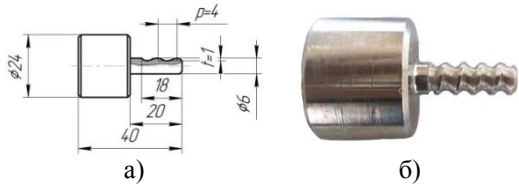


Рисунок 16– Металева вставки круглої зовнішньої різьби: а– ескіз металевої вставки; б– фото вставки

Зазначені металеві вставки виготовляли раніше відомим способом із конструкційної сталі, марка сталі «Сталь 45», ескіз цієї вставки наведений на рисунку 16 а), фото «вставки круглої різьби» з кроком різьби 4 мм та глибиною профілю різьби 1 мм – на рисунку 16 б). Схема формоутворення різьби представлена на рисунку 17 а), фото даного процесу на рисунку 17 б). Спосіб реалізують на трьохкоординатному верстаті з ЧПК 6Р13Ф3, в шпинделі якого встановлюють цангову оправку із закріпленим в ній розточувальним пристроєм (цей пристрій формує діаметр $d_{инстр.}$, що дорівнює сумі внутрішнього діаметра різьби d_1 та глибини профілю різьби t , формула 7) та однозубим інструментом (рис. 17 б)).

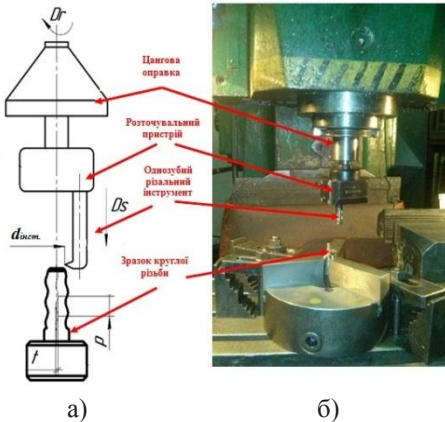


Рисунок 17 – Процес формоутворення круглої зовнішньої різьби: а) спрощена схема процесу; б) фото процесу

виготовлення подана на рисунку 18 а), фото пластини – на рисунку 18 б). Матеріали з яких було виготовлено зазначену пластину, аналогічні до тих з яких виготовлялися дослідні зразки.

$$d_{инстр.} = d_1 + t \quad (7)$$

де, d_1 – внутрішній діаметр різьби, мм;

t – глибина профілю різьби, мм.

Внутрішня кругла різьба з аналогічними параметрами (табл. 7) була виготовлена в склопластиковій пластині, армованій у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Схема армування подана на рисунку 18 а), фото пластини – на рисунку 18 б).

Кругла внутрішня різьба формувалася в 5 отворах для кожного випадку з ідентичними основними параметрами. Після виконання внутрішньої гвинтової поверхні металеву вставку для кожного конкретного випадку закручували в отвір із відповідною різьбою в пластині.

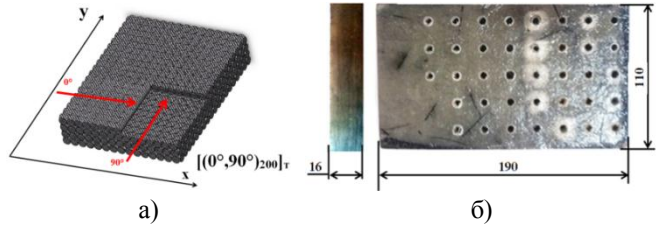


Рисунок 18 – Склопластикова пластина: а – схема армування пластины; б – фото пластины

Експериментальне випробування цього роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою на міцність, проводили з використанням універсальної розривної машини Р20 сертифікованої лабораторії Сумського державного університету. У результаті проведених досліджень були одержані значення сили для кожного випадку, ці значення та середнє значення сили занесені до таблиці 9.

Таблиця 9 – Значення сили одержані для кожного випадку в процесі експерименту

№	R ₁ , кН	R ₂ , кН	R ₃ , кН	R ₄ , кН	R ₅ , кН	R _{ср} , кН
1	14,4	14,0	13,5	13,5	13,7	13,8
2	13,0	12,0	11,7	12,0	13,0	12,3
3	9,2	9,0	11,0	10,4	10,2	9,9
4	12,2	12,5	12,6	12,2	8,0	11,5
5	15,0	14,6	13,0	12,4	13,7	13,7

На рисунку 19 наведена діаграма, що наглядно ілюструє середнє значення сили для кожного конкретного випадку, номери стовпців діаграми відповідають номеру випадку з таблиці 6. Перевірка адекватності результатів експериментального дослідження за рахунок визначення критерію Фішера дозволила одержати формулу (8) залежності максимальної сили, що витримає гвинтове з'єднання з круглою різьбою, від глибини профілю різьби t та кроку різьби p , а також показала, що модель є адекватною. На рисунку 20 поданий графік функції 8, який залежить від p кроку різьби та t глибини профілю різьби, а також на цьому графіку показані граничні точки, в межах яких змінюється наведена функція. Графік виконаний в середовищі програмного продукту MatLab для демонстрації поверхні всіх допустимих значень одержаної функції:

$$R = 2,0 \cdot t \cdot p - 29,34 \cdot t^2 + 43,68 \cdot t - 1,52 \cdot p - 2,49 \quad (8)$$

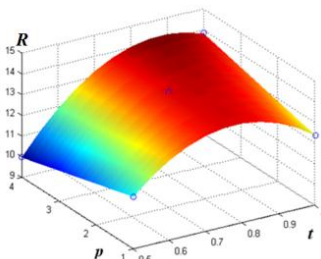


Рисунок 19 – Графік наведеної функції в середовищі програмного продукту MatLab

Для одержання значення основних параметрів, за яких показники міцності будуть найвищими, необхідно знайти екстремуми функції 3. Відповідно до роз-

Рисунок 20 – Середні значення сили для кожного випадку



Рисунок 20 – Середні значення сили для кожного випадку

рахунків максимальні показники міцності будуть для гвинтового з'єднання з такими основними параметрами: значення кроку різьби $p = 4 \text{ мм}$, значення глибини профілю різьби $t = 0,9 \text{ мм}$.

П'ятий розділ присвячено дослідженню впливу пружних характеристик АКМ на міцність роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою, та розробленню практичних рекомендацій щодо його застосування в деталях з армованих композитів.

Згідно розрахункових залежностей С. М. Верещаки для односпрямованого ортотропного матеріалу, найбільший вплив на пружні характеристики армованого композиту має параметр ψ_1 – відносний об'ємний вміст арматури шару в поздовжньому напрямку, методика визначення якого за ASTM D3171 – 15.

Таблиця 10 – Пружні характеристики армованого матеріалу при зміні параметра ψ_1

$\psi_1=0,1$			$\psi_1=0,4$			$\psi_1=0,7$		
$E_1 = E_x$, ГПа	$E_2 = E_y$, ГПа	$E_3 = E_z$, ГПа	$E_1 = E_x$, ГПа	$E_2 = E_y$, ГПа	$E_3 = E_z$, ГПа	$E_1 = E_x$, ГПа	$E_2 = E_y$, ГПа	$E_3 = E_z$, ГПа
9,27	9,27	5,57	22,30	22,30	9,84	38,89	38,89	19,19
$\nu_{21} = \nu_{yx}$	$\nu_{31} = \nu_{zx}$	$\nu_{32} = \nu_{zy}$	$\nu_{21} = \nu_{yx}$	$\nu_{31} = \nu_{zx}$	$\nu_{32} = \nu_{zy}$	$\nu_{21} = \nu_{yx}$	$\nu_{31} = \nu_{zx}$	$\nu_{32} = \nu_{zy}$
0,20	0,26	0,26	0,11	0,19	0,19	0,10	0,21	0,21
$G_{12} = G_{xy}$, ГПа	$G_{23} = G_{yz}$, ГПа	$G_{31} = G_{zx}$, ГПа	$G_{12} = G_{xy}$, ГПа	$G_{23} = G_{yz}$, ГПа	$G_{31} = G_{zx}$, ГПа	$G_{12} = G_{xy}$, ГПа	$G_{23} = G_{yz}$, ГПа	$G_{31} = G_{zx}$, ГПа
1,82	1,67	1,67	3,43	2,37	2,37	8,21	4,00	4,00

На основі адекватності запропонованої імітаційної моделі, було вирішено провести дослідження впливу відносного об'ємного вмісту арматури шару в поздовжньому напрямку ψ_1 , на несучу здатність гвинтового з'єднання з круглою різьбою. Для цього основні параметри запропонованого з'єднання для проведення дослідження, вибиралися за конкретною схемою, яка підходить для повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання. В нашому випадку побудова матриці повного факторного експерименту була реалізована на двох рівнях по двом факторах. Таким чином була реалізована матриця типу 2^3 . В зазначеному дослідженні глибина профілю різьби t змінювалася в межах $0,5 \leq t \leq 1,0$ крок різьби p в межах $1,0 \leq p \leq 4,0$, а параметр ψ_1 в межах $0,1 \leq \psi_1 \leq 0,7$. Далі на основі розрахункових залежностей С. М. Верещаки, були отримані пружні характеристики для відповідного значення відносного об'ємного вмісту арматури шару в поздовжньому напрямку ψ_1 , представлені в таблиці 10.

Моделювання відбувалося методом скінчено елементного аналізу з використанням імітаційної моделі розробленої в роботі, зі зміною основних параметрів у відповідності до плану експерименту таблиця 11, в результаті були отримані значення максимальної сили для кожного конкретного випадку внесені до таблиці 11.

Таблиця 11 – План матриця експерименту

№	x_1	x_2	x_3	t	p	ψ_1	R_{max} , кН
1	-	-	-	0,5	1,0	0,1	6,45
2	+	-	-	1,0	1,0	0,1	7,44
3	-	+	-	0,5	4,0	0,1	8,12
4	+	+	-	1,0	4,0	0,1	8,64
5	-	-	+	0,5	1,0	0,7	16,84
6	+	-	+	1,0	1,0	0,7	14,58
7	-	+	+	0,5	4,0	0,7	15,76
8	+	+	+	1,0	4,0	0,7	17,12
9	0	0	0	0,75	2,5	0,4	17,48

Залежність максимальної сили гвинтового з'єднання з круглою різьбою від основних параметрів геометрії та від пружних характеристик, представлена у вигляді формули 9, коефіцієнти якого отримані методом найменших квадратів за рахунок мінімізації функціоналу.

$$R_{\max} = 4,54tp\psi_1 - 89,74t^2 - 0,77tp - 15,38t\psi_1 - 3,8p\psi_1 + 138,44t + 1,09p + 26,53\psi_1 - 42,78 \quad (9)$$

Практичне значення для виробництва проведеного наукового дослідження полягає, в розробленні технології виготовлення роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою для деталей виготовлених з армованих композитів. Що в свою чергу дозволило отримати працездатне з'єднання яке за показниками міцності наближається до з'єднання виконаного в металі.

Технологічні рекомендації щодо реалізації виготовлення запропонованого з'єднання, впроваджені на підприємстві ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус» для з'єднання за рахунок круглої різьби штоку із армованого композиційного матеріалу механізму закріплення абразивного елемента зі металевим штоком механізму регулювання кута заточування пристрою для заточування леза ножа рисунок 21. Що дозволило зменшити вагу механізму закріплення абразивного елемента із 226 грам до 112 грам.



Рисунок 21 – Пристрій для заточування леза ножа

Запропонований тип роз'ємного гвинтового з'єднання та технологія його виготовлення успішно впроваджені на державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» що дозволило розширити використання роз'ємних з'єднання при виготовленні основної продукції підприємства.

У **додатках** наведено результати експерименту з одержання пружних характеристик АКМ, керуючу програму на мові програмування Python для одержання списку елементів моделі з файлу середовища COSMOSWORKS, командний файл LS-DYNA та акти впровадження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене науково-практичне завдання, пов'язане із забезпеченням міцності гвинтового роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів, за рахунок формування різанням гвинтової поверхні круглого профілю, яка за своїми конструктивними особливостями, а саме відсутністю гострих концентраторів напружень, якнайкраще підходить для представлених матеріалів.

1. Розглянута детальна класифікація з'єднань деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів (АКМ), з якої бачимо що найбільш застосованими для цього типу матеріалів є нероз'ємні з'єднання, для яких і проводяться всі дослідження, пов'язані з одержанням основних показників міцності та критеріїв працездатності цих видів з'єднань.

2. Проведене моделювання напружено-деформованого стану методом скінченно-елементного аналізу в системі LS-DYNA, роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою, в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, в результаті якого визначені основні показники міцності цього

з'єднання за несучою здатністю, що виявилися на досить високому рівні. Згідно з результатами моделювання показник максимальної сили, яку витримує з'єднання, становив $R_{max} = 13,76 \text{ кН}$. Значення максимальних напружень та деформацій згідно з опрацьованими в постпроцесорі LS-PrePost-2.4 даними варіюються межах, що підтверджує зазначену на початку гіпотезу та дає підставу для подальшого проведення експериментального дослідження міцності.

3. Розроблена методика визначення механічних властивостей та одержання коефіцієнтів визначального рівняння для армованих композиційних матеріалів, що робить можливими подальше моделювання процесів деформування та руйнування конструкцій і з'єднань цих матеріалів.

4. Експериментально впроваджені режими обробки, інструмент із необхідною геометрією і технологія виготовлення роз'ємного гвинтового з'єднання в деталях із склопластику за рахунок адаптації способу обробки гвинтових поверхонь круглого профілю методом огинання.

5. Експериментально визначені параметри, що забезпечують максимальну міцність різьби з зовнішнім діаметром 6 мм, виготовленої в армованому композиційному матеріалі. Відповідно до розрахунків максимальні показники міцності будуть для гвинтового з'єднання з такими основними параметрами: значення кроку різьби $p = 4 \text{ мм}$, значення глибини профілю різьби $t = 0,9 \text{ мм}$

6. Отримана математична залежність максимальної сили від параметрів геометрії гвинтового з'єднання з круглою різьбою та від пружних характеристик. Розроблені практичні рекомендації застосування цього роз'ємного гвинтового з'єднання в різного роду конструкціях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Запропоноване роз'ємне з'єднання і технологія його виготовлення успішно впроваджені на підприємствах ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус» (м. Суми), це з'єднання застосовують при сполученні елементів пристрою для заточування леза ножа один з одним. Гвинтове з'єднання з круглою різьбою використовують також при з'єднанні деталей квадрокоптерів одна з одною, виробником яких є державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» (м. Дніпро). Акти впровадження додаються.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Довгополов, А. Ю. Утворення роз'ємних з'єднань деталей з вуглепластику / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2015. – № 3. – С. 11 – 15.

Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar.

2. Довгополов, А. Ю. Роз'ємні з'єднання деталей, виготовлених з вуглепластику / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – Вип. 11. – С. 102 – 109.

Входить до періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

3. Довгополов, А. Ю. Дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – № 16 (1292). – С. 22 – 26.

Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus (Польща), OCLC WorldCat (CILA), Google Scholar, та Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

4. Довгополов, А. Ю. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби з великим кроком / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, С. О. Чигрин, І. В. Калужний // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2018. – № 2(82). – С. 166 – 173.

Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar:

5. Довгополов, А. Ю. Моделювання напружено-деформованого стану роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів методом СЕА / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Д. О. Жигилій // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. — № 5 (1330). – С. 10 – 17.

Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus (Польща), OCLC WorldCat (CILLA), Google Scholar, та Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

6. Довгополов А. Ю. Розробка теорії формоутворення різанням внутрішньої гвинтової поверхні з круглим профілем в деталях виготовлених з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Східноєвропейський журнал. Серія: Технічні науки – Варшава, Польща, 2019 – № 43. – С. 22 – 28.

Іноземне видання входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar:

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Довгополов, А. Ю. Утворення роз'ємних з'єднань з композиційних матеріалів / С. С. Некрасов, А. Ю. Довгополов // Прогресивні технології в машинобудуванні, – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2016. – С. 45.

2. Dovgoplov, A. Detachable joints of details from the carbon fiber composite / A. Dovgoplov, S. Nekrasov, S. Zolotova // With foreign languages to manual understanding, better technologies and ecologically safer environment: The tenth all Ukrainian scientific practical student`s, postgraduate`s and teacher`s conference, Sumy : Sumy state university, 2016. – P. 122.

3. Довгополов, А. Ю. Роз'ємні з'єднання із вуглепластику/ А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Сучасні технології в промисловому виробництві, IV Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, – Суми : СумДУ, 2016. – Ч. 1. – С. 113.

4. Довгополов, А. Ю. Технологія обробки роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях: II Міжнародна науково-практична конференція, – Суми: СумДУ, 2017. – С. 69-70.

5. Довгополов, А. Ю. Дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VII Міжнародна науково-практична конференція, – Чернівці : Том 1. – С. 157.

6. Довгополов, А. Ю. Технологія обробки круглої зовнішньої різьби / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Є. А. Агєєва // Сучасні технології у промисловому виробництві : Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту техн. систем та енергоефективних технологій, – Суми : СумДУ, 2017. – Ч.1. – С. 67.

7. Довгополов, А. Ю. Експериментальне дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю.

Довгополов, С. С. Некрасов/ Прогресивні технології машинобудуванні : Матеріали VII – міжнародної науково-технічної конференції, – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. – С. 110 – 113.

8. Довгополов, А. Ю. Технологія обробки роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Сучасні технології у промисловому виробництві : Матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, – Суми: СумДУ, 2018. – С. 59-60.

9. Довгополов, А. Ю. Моделювання напружено-деформованого стану різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції, – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 140 – 142.

10. Довгополов, А. Ю. Експериментальне дослідження міцності роз'ємного з'єднання в деталях з АКМ / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : Матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 120 річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та Механіко-машинобудівного інституту, Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 45–48.

Патент України:

11. Патент на корисну модель UA 115892U МПК В23С 3/32 (2006.01), Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби/ С.С. Некрасов, А. Ю. Довгополов; Заявник і патентовласник Сумський державний університет, заявл. 12.12.2016; опубл. 25.04.2017. Бюл. № 8.

АНОТАЦІЯ

Довгополов А.Ю. Забезпечення міцності роз'ємного гвинтового з'єднання, формоутвореного в армованому композиційному матеріалі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – «Динаміка та міцність машин» (13 – механічна інженерія) – Сумський державний університет, Міністерство освіти і науки України, Суми, 2019.

У роботі вирішена науково-практична задача із забезпечення роз'ємних гвинтових з'єднань деталей виготовлених з армованих композиційних матеріалів максимальною міцністю, шляхом теоретичних та експериментальних досліджень впливу на неї параметрів геометрії з'єднання. Виявленні фактори, які найбільше знижують експлуатаційні характеристики цього типу з'єднання, що дозволило розробити методики теоретичних досліджень його міцності, та оцінити напруження та деформації в ньому. На основі розробленої методики одержання коефіцієнтів визначального рівняння зі стандартних механічних випробувань, було розроблено імітаційну модель визначення напружено-деформованого стану представленої типу гвинтового з'єднання. У дисертаційному дослідженні розроблено і перевірено практичні рекомендації запропонованого способу з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів.

Результати дисертаційного дослідження становлять інтерес для впровадження їх на підприємствах, де виготовляють різного роду конструкції, машини та агрегати, до складу яких входять деталі з армованих композиційних матеріалів.

лів. Практичне значення одержаних у роботі результатів для технічно передових галузей виробництва полягає в створенні технології формоутворення поверхні роз'ємного з'єднання для деталей, виготовлених з АКМ, та розробленні алгоритму дослідження міцності цього роз'ємного з'єднання з круглою різьбою за різних напружено-деформованих станів. Ці розробки в сукупності з усіма ознаками розширюють можливість використання роз'ємних з'єднань у машинобудуванні та виводять використання АКМ на новий рівень.

Ключові слова: армовані композиційні матеріали, імітаційна модель, напружено-деформований стан, роз'ємне гвинтове з'єднання, міцність.

SUMMARY

Andrii Y. Dovgoplov The strength assurance of detachable threaded joint of reinforced composites parts. - Qualifying scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for granting the Degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.02.09 - "Dynamics and Strength of Machines" (13 – Mechanical Engineering). - Sumy State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2019.

The scientific and practical problem of assurance of maximal strength of detachable threaded joint of reinforced composites parts strength was solved by theoretical and experimental studies conducted on joint geometry parameters influence. The factors, reducing performance characteristics the most, were identified for such type of a joint. These allowed to develop methods for strength theoretical studies and assessment. Basing on the developed method of constitutive equation coefficients determination according to standard mechanical tests, the stress and strain state simulation model of the threaded joint was built. The research has given practical reasonable recommendations for the proposed parts' joint method made of reinforced composite materials.

The thesis research is of great interest for their implementation at the enterprises producing various construction, machine and unit types made of reinforced composite parts. The practical significance of obtained results for technically advanced industries is to create a technology for the detachable threaded joint shape in fibre reinforced composite materials and to develop an algorithm for the strength study of such joint with a rope thread under different stress-strain states. Altogether, these developments extend the usage of detachable threaded joints in mechanical engineering and fibre-reinforced composite materials at a new level.

Keywords: reinforced composite materials, simulation model, stress and strain state, detachable threaded joint, strength.

Підписано до друку 10.05.2019 р. Формат 60x84/16.

Обл.-вид. арк. 0,9. Ум. друк. арк 1,1. Тираж 100 пр. Замовлення № 784.

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 3062 від 17.12.2007 р.