

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**ДОВГОПОЛОВ АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ**

**УДК 539.3:621.9**

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

05.02.09 – Динаміка та міцність машин (13 – Механічна інженерія)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

А. Ю. Довгополов

Науковий керівник (консультант)  
Некрасов Сергій Сергійович,  
кандидат технічних наук, доцент

Суми – 2019

## 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 Міністерства освіти і науки України, Суми, 2019.

Сучасні потреби машинобудування і технічно передових галузей виробництва вимагають широкого використання нових матеріалів. Застосування 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). Проведення досліджень, пов'язаних із формоутворенням поверхонь роз'ємних з'єднань деталей машин, дозволяє розширити використання армованих композитів у машинобудуванні. Також розроблення нових способів формоутворення роз'ємних поверхонь деталей із представлених матеріалів та використання нових геометричних форм цих поверхонь є адекватними завданнями, що потребують невідкладного вирішення. Водночас необхідне дослідження якості, точності та міцності формоутворених роз'ємних поверхонь на деталях з армованих композиційних матеріалів.

На даному етапі розвитку виробництва гвинтові з'єднання з різьбою спеціального профілю мало використовують для з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Причинами цього є складність виготовлення цих профілів, особливо внутрішніх, за рахунок відсутності технологічних можливостей. 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.

У роботі вирішене науково-практичне завдання забезпечення міцності роз'ємного гвинтового з'єднання, формоутвореного в армованому композиційному матеріалі, що реалізовано на основі створення імітаційної моделі з'єднання в цілому, та підтверджено адекватність моделі практичним експериментом.

У процесі виконання дисертаційного дослідження одержано такі наукові результати: 1) забезпечено міцність гвинтового роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів шляхом формоутворення різанням гвинтової поверхні; 2) виявлено на основі конструктивного аналізу фактори, що знижують експлуатаційні характеристики роз'ємних з'єднань у деталях з армованих композиційних матеріалів; 3) розроблено методику одержання коефіцієнтів визначального рівняння зі стандартних механічних випробувань на розтягування, стискання; 4) розроблено теоретичну методику досліджень міцності гвинтового з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів, що дозволяє оцінити напруження та деформації в з'єднанні; 5) теоретично та експериментально досліджено вплив параметрів геометрії гвинтового з'єднання на його міцність у деталях з армованих композиційних матеріалів; 6) розроблено і перевірено практичні рекомендації запропонованого способу з'єднання деталей з армованого композиційного матеріалу та визначено вплив пружних характеристик армованого композита на його міцність з урахуванням основних параметрів геометрії з'єднання.

У роботі застосовані сучасні методи модельних та натурних досліджень. Під час дослідження контактних напружень і напружено-деформованого стану в цьому з'єднанні використовували метод скінченно-елементного аналізу, реалізований у програмі LS-DYNA. Знаходження даних про фізико-механічні характеристики армованого склопластикового матеріалу та обчислення коефіцієнтів визначального рівняння виконували 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, а також із

використанням розривної машини моделі 2007 P-0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету. Експериментальні дослідження процесу формоутворення гвинтової поверхні роз'ємного з'єднання проводили на вертикально-фрезерному верстаті 6P13Ф3 із системою ЧПК WL4M. Одержували основні показники міцності гвинтового з'єднання з круглою різьбою в деталях з армованих композиційних матеріалів, використовуючи універсальну розривну машину P20 шляхом експериментального дослідження компонентів з'єднання на стискання. Планування модельних і натурних експериментів та оброблення їх результатів виконували на основі теорії багатofакторного експерименту. Чисельні моделі реалізовували 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 розробленні підходу до забезпечення конструкційної міцності роз'ємного гвинтового з'єднання, формоутвореного в армованому композиційному матеріалі. Водночас розв'язано нові задачі та виявлено такі закономірності:

- 1) визначено вплив параметрів гвинтового з'єднання на його міцність у деталях з армованих композиційних матеріалів, що дозволило встановити залежність міцності з'єднання від геометрії профілю;
- 2) теоретично обґрунтовано технологічні параметри нарізання круглих гвинтових поверхонь методом безцентроїдного огинання на фрезерних верстатах із ЧПК в армованих композиційних матеріалах для забезпечення максимальної міцності гвинтового з'єднання;
- 3) запропоновано методологічні основи визначення максимальної несучої здатності в з'єднанні з армованого композиційного матеріалу залежно від механічних характеристик та геометрії профілю круглої різьби.

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

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 на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету.

**Ключові слова:** армовані композиційні матеріали, роз'ємне гвинтове з'єднання, міцність, моделювання методом скінченно-елементного аналізу, формоутворення різанням, параметри міцності гвинтового з'єднання.

## SUMMARY

*Doghopolov A. Yu.* The strength assurance of detachable threaded joint shaped in fibre reinforced composite materials. – Qualifying scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for granting the Degree of Candidate of Technical Sciences (Ph. D.) 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 contemporary needs of machine building and technically advanced industries require extensive use of new materials. Application of new materials in machine-building makes it possible to bring production to a qualitatively new level and increase its efficiency. At the same time, the assembly of machine parts requires a large number of detachable joints, the surface processing of which has been poorly investigated, therefore, at this stage of development, mainly non-detachable part joints made of fibre reinforced

composite materials (FRCM) are used. Carrying out researches of surface processing of detachable joints' shapes of machine parts allows extending the usage of fibre reinforced composites in machine building. In turn, the development of new methods of forming the detachable parts' surfaces from the former materials and the usage of new geometric shapes of these surfaces are adequate tasks that require urgent investigations. At the same time, it is necessary to study the quality, accuracy and strength of shaped detached surfaces on parts of fibre reinforced composite materials.

At the current stage of production, threaded joints with special threaded profile are not used to assemble parts made of fibre reinforced composite materials. The reasons for this are the complexity of these profiles' production, especially internal ones, due to the lack of technological capabilities. In turn, the rope thread, being due to design features, namely the absence of thin concentrator of stresses owing to the appropriate shape, is best suited for the implementation of a detachable threaded joint in the machine parts made of formerly mentioned materials. Thus, the realization of the design of a durable rope threaded joint is a pressing challenge and requires thorough study and further investigation.

In the paper, the scientific and practical solution to strength ensuring of the detachable threaded joint formed in the fibre reinforced composite material, made on the basis of creating the simulation model of the joint integrally, is solved, and the suitability of the model confirmed by practical experiments.

In the course of the implementation of the theses research the following scientific results were obtained: 1) the detachable threaded joint strength in machine parts made by machining under geometry generation in fibre reinforced composite materials is ensured; 2) factors that reduce performance characteristics of the detachable threaded joint in machine parts made by fibre reinforced composite materials were found on the basis of constructive analysis; 3) a methodology for obtaining the coefficients of the constitutive equation from the standard mechanical tests for tension and compression has been governed; 4) a theoretical methodology for investigating the detachable threaded joint strength in machine parts made by fibre reinforced composite materials has been developed, which allows estimating stress-strain state in the joint; 5) the influence of

parameters of the geometry of the detachable threaded joint on its strength made in machine parts by fibre reinforced composite materials is theoretically and experimentally investigated; 6) practical recommendations for the stipulated method of joining machine parts made of fibre reinforced composite material have been developed and tested, and the influence of the elastic coefficients of the fibre reinforced composite on its strength has been determined taking into account the basic parameters of the joint geometry.

Modern methods for modelling and field research are used in the work. The finite element method, implemented in the program LS-DYNA, was used for investigating the contact stresses and the stress-strain state in this joint. The data on the physical and mechanical characteristics of the reinforced fiberglass material and the finding of the coefficients of the constitutive equation were carried out with the help of an upgraded UME-10TM machine by means of a tensile study (ASTM D 3039/D) and compression (ASTM D 6641/D) of standard and special samples at normal temperatures, as well as with the use of the 2007 model P- 0,5 strength testing machine at the certified laboratory of the Sumy State University. Experimental investigations of the process of machining under surface geometry generation of the threaded joint were carried out on a vertical milling machine 6P13F3 under the CNC WL4M system. The obtaining of the strength basic parameters of the rope threaded joint in the machine parts made of fibre reinforced composite materials was carried out using a universal strength testing machine P20 by experimentally studies of joint elements under compression. model and field experiments planning and the processing of their results are performed on the basis of the theory of the multi-factorial experiment. Numerous models were implemented using licensed software in the framework of international academic internship under the Academic Mobility Program at University of West Bohemia (Pilsen, Czech Republic).

The scientific novelty of the results obtained is to develop an approach to ensuring the structural strength of the detachable threaded joint formed in the fibre reinforced composite material. At the same time, new research objectives were solved and the following patterns were discovered:

1) the influence of the parameters of the detachable threaded joint on its strength in machine parts made of fibre reinforced composite materials have been determined, which allows establishing the dependence of the joint strength on the profile geometry;

2) the technological parameters of machining of rope thread surfaces made by the non-centrifugal form-generating method on CNC milling machines in the fibre reinforced composite materials for providing the maximum strength of the threaded joint has been proved theoretically;

3) the methodological basis for determining the maximum bearing capacity in the joint made of fibre reinforced composite material is proposed, depending on the mechanical characteristics and the threaded profile geometry.

The results of the theses research have been implemented at enterprises engaged in the manufacture of various structure types, machines and aggregates, which include components made of fibre reinforced composite materials. The practical results value, obtained in the paper, for the technically advanced production branches is to create the technology of surface geometry generation of the detachable threaded joint for machine parts made of fibre reinforced composite materials, and in developing an algorithm for strength studying of this detachable rope threaded joint at various stress-strain states. These developments, together with all the features, expand the ability to use detachable threaded joints in machine building and take the use of fibre reinforced composite materials to the next level.

The main results of the thesis have been implemented into production at the enterprise “Scientific-Production Company “Papyrus” Ltd. (Sumy), the State Enterprise “M. K. Yangel Design Bureau “Yuzhnoye” (Dnipro), as well as in preparing of research and qualification papers of students at the Department of Technology of Mechanical Engineering of Machines and Tools of Sumy State University.

**Key words:** fibre reinforced composite materials, detachable threaded joint, strength, FEM simulation modelling, geometry generation by machining, strength parameters of threaded joint.



## Список публікацій за темою дисертації

*Статті у фахових виданнях України:*

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

*Стаття опублікована у виданні України, що входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar. Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2015\\_3\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2015_3_4).*

2. Довгополов А. Ю. Роз'ємні з'єднання деталей, виготовлених із вуглепластику / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Сучасні технології в машинобудуванні = Modern technologies in mechanical engineering : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 11. – С. 102-109.

*Стаття опублікована у виданні України, що входить до довідника 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 у деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 16 (1292). – С. 22-26.

*Стаття опублікована у виданні України, що входить до наукометричних баз даних Index Copernicus (Польща), OCLC WorldCat (США), Google Scholar, а також входить до світового каталогу періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA). DOI: 10.20998/2413-4295.2018.16.04*

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

*Стаття опублікована у виданні України, що водить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-2\(82\)-166-173](https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-166-173).*

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.

*Стаття опублікована у виданні України, що водить до наукометричних баз даних Index Copernicus (Польща), OCLC WorldCat (США), Google Scholar та Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).*

*Статті у зарубіжних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar:*

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

*Тези доповідей:*

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. Dovgopолоv A. Detachable joints of details from the carbon fiber composite / A. Dovgopолоv, 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: матеріали IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. – 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. – Чернігів, 2017, Т. 1. – С. 157.

6. Довгополов А. Ю. Технологія обробки круглої зовнішньої різьби / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Є. А. Агеева // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів ф-ту техн. систем та енергоефективних технологій. : у 2 ч. – 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 в 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 в 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 у 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:*

1. 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.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 КЛАСИФІКАЦІЯ З'ЄДНАНЬ ДЕТАЛЕЙ ВИГОТОВЛЕНИХ АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	3 13
1.1 Загальне уявлення про з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів .....	13
1.2 Суцільні з'єднання деталей з АКМ .....	17
1.2.1 Клейові з'єднання.....	18
1.2.2 Формувальні з'єднання.....	20
1.2.3 Зварні з'єднання .....	21
1.3 Механічні з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів .....	23
1.3.1 Заклепкові з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів .....	23
1.3.2 Спосіб з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів вминанням «клінч-з'єднання».....	26
1.3.3 Самозаклинювальні з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів .....	28
1.3.4 З'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів за рахунок мікроелементів (зшивні та голчасті) .....	30
1.4 Комбіновані з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів .....	32
1.5 Гвинтові з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів та способи їх формоутворення .....	34
Висновки до розділу 1.....	40
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРІЇ ФОРМОУТВОРЕННЯ РІЗАННЯМ ВНУТРІШНЬОЇ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ З КРУГЛИМ ПРОФІЛЕМ У ДЕТАЛЯХ, ВИГОТОВЛЕНИХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	42

2.1 Властивості армованого композиційного матеріалу за різних напружено-деформованих станів.....	42
2.2 Дослідні зразки, технологія виготовлення та методика випробувань.....	46
2.3 Технологія формоутворення різанням внутрішньої поверхні різьбового з'єднання з круглою різьбою в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів .....	53
Висновки до розділу 2.....	61
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗ'ЄМНОГО З'ЄДНАННЯ З КРУГЛОЮ РІЗЬБОЮ В ДЕТАЛЯХ, ВИГОТОВЛЕНИХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>63</b>
3.1 Методи дослідження напружено-деформованого стану з'єднань з армованих композиційних матеріалів.....	63
3.2 Математичне формулювання моделі напружено-деформованого стану гвинтового з'єднання з круглою різьбою, формоутвореного в армованому композиційному матеріалі.....	73
3.3 Математичний опис моделі армованого композиційного матеріалу для визначення напружено-деформованого стану з'єднання методом скінченно-елементного аналізу.....	78
3.4 Моделювання напружено-деформованого стану гвинтового з'єднання з круглою різьбою, виготовленого в армованому композиційному матеріалі, методом скінченно-елементного аналізу.....	85
Висновки до розділу 3.....	95
<b>РОЗДІЛ 4 ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ РОЗ'ЄМНОГО ГВИНТОВОГО З'ЄДНАННЯ З КРУГЛОЮ РІЗЬБОЮ, ФОРМОУТВОРЕНОГО В АРМОВАНОМУ КОМПОЗИЦІЙНОМУ МАТЕРІАЛІ ..</b>	<b>96</b>
4.1 Практична реалізація дослідження міцності роз'ємного гвинтового з'єднання в деталях з армованого композиційного матеріалу .....	97
4.2 Перевірка адекватності результатів експериментального дослідження ...	103
Висновки до розділу 4.....	107

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РОЗ'ЄМНОГО ГВИНТОВОГО З'ЄДНАННЯ З КРУГЛОЮ РІЗЬБОЮ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	108
5.1 Вплив пружних характеристик армованого композиційного матеріалу на міцність гвинтового з'єднання з круглою різьбою .....	108
5.2 Оцінювання похибки прямих вимірювань на основі розрахунку вибіркового стандартного відхилення даних експерименту .....	111
5.3 Методика підбору основних елементів системи різання для виготовлення круглої внутрішньої різьби запропонованою технологією.....	112
5.4 Практичні рекомендації запропонованого способу з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів.....	115
Висновки до розділу 5.....	119
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	123
ДОДАТОК А.....	133
ДОДАТОК Б.....	143
ДОДАТОК В .....	144
ДОДАТОК Г.....	145

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

$K$  – коефіцієнт тензочутливості;

$E$  – модуль пружності;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$p$  – крок різьби;

$t$  – глибина профілю різьби;

$D$  – зовнішній діаметр різьби;

$D_1$  – внутрішній діаметр різьби;

$r_1$  – радіус вершин профілю різьби;

$r_2$  – радіус западин профілю різьби;

$n$  – частота обертання шпинделя;

$S_o$  – подача;

$d_{f-m}$  – діаметр траєкторії формотворної точки;

$\sigma_1$  – нормальні напруження композиту в напрямку осі  $x_1$ ;

$\sigma_2$  – нормальні напруження композиту в напрямку осі  $x_2$ ;

$\sigma_3$  – нормальні напруження композиту в напрямку осі  $x_3$ ;

$\tau_{12}$  – дотичні напруження композиту в площині  $x_1Ox_2$ ;

$\tau_{13}$  – дотичні напруження композиту в площині  $x_1Ox_3$ ;

$\tau_{23}$  – дотичні напруження композиту в площині  $x_2Ox_3$ ;

$F_1$  – масова сила що діє в напрямку осі  $x_1$ ;

$F_2$  – масова сила що діє в напрямку осі  $x_2$ ;

$F_3$  – масова сила що діє в напрямку осі  $x_3$ ;

$\varepsilon_1$  – відносна лінійна деформація композиту в напрямку осі  $x_1$ ;

$\varepsilon_2$  – відносна лінійна деформація композиту в напрямку осі  $x_2$ ;

$\varepsilon_3$  – відносна лінійна деформація композиту в напрямку осі  $x_3$ ;

$\varepsilon_{12}$  – кутова деформація композиту в площині  $x_1Ox_2$ ;

$\varepsilon_{13}$  – кутова деформація композиту в площині  $x_1Ox_3$ ;

$\varepsilon_{23}$  – кутова деформація композиту в площині  $x_2Ox_3$ ;

$u_1$  – компонента вектора перемещень матеріальної точки композиту в напрямку осі  $x_1$ ;

$u_2$  – компонента вектора перемещень матеріальної точки композиту в напрямку осі  $x_2$ ;



$u_3$  – компонента вектора перемещень матеріальної точки композиту в напрямку осі  $x_3$ ;  
 $E_1$  – модуль пружності композиту в напрямку осі  $x_1$ ;  
 $E_2$  – модуль пружності композиту в напрямку осі  $x_2$ ;  
 $E_3$  – модуль пружності композиту в напрямку осі  $x_3$ ;  
 $G_{23}$  – модуль зсуву композиту в площині  $x_2Ox_3$ ,  
 $G_{13}$  – модуль зсуву композиту в площині  $x_1Ox_3$ ,  
 $G_{12}$  – модуль зсуву композиту в площині  $x_1Ox_2$ ;  
 $\nu_{12}$  – коефіцієнт Пуассона композиту в площині  $x_1Ox_2$ ;  
 $\nu_{13}$  – коефіцієнт Пуассона композиту в площині  $x_1Ox_3$ ;  
 $\nu_{23}$  – коефіцієнт Пуассона композиту в площині  $x_2Ox_3$ ;  
 $X_t$  – границя міцності при розтяганні композиту вздовж волокон;  
 $E_m$  – модуль пружності ізотропної матриці;  
 $E_f$  – модуль пружності ізотропного волокна;  
 $\nu_m$  – коефіцієнт Пуассона ізотропної матриці;  
 $\nu_f$  – коефіцієнт Пуассона ізотропного волокна;  
 $G_m$  – модуль зсуву ізотропної матриці;  
 $G_f$  – модуль зсуву ізотропного волокна;  
 $\psi_1$  – відносна площа арматури в площині перерізу осі  $x_1$ ;  
 $\psi_3$  – відносна площа арматури в площині перерізу осі  $x_3$ ;  
 $h$  – товщина армованого шару;  
 $d_f$  – діаметр волокон;  
 $i_f$  – частота армування;  
 $X_t$  – межа міцності під час розтягування вздовж волокон;  
 $Y_t$  – межа міцності при розтягуванні впоперек волокон;  
 $S_c$  – межа міцності при зсуві в площині армування;  
 $d_{instr}$  – діаметр інструмента;  
 $G$  – критерій Кохрена;  
 $F$  – критерій Фішера;  
 $s_u$  – дисперсія розсіювання;  
 $s_y$  – дисперсія відтворюваності;

$R$  – максимальна сила яку витримує гвинтове з'єднання;

$f_y$  – число ступенів вільності дисперсії відтворення;

$h$  – коефіцієнт Стюдента;

$P$  – ймовірність реалізації;

$\mu_F$  – середнє значення генеральної сукупності;

АКМ – армований композиційний матеріал;

НДС – напружено-деформований стан;

СЕ – скінченний елемент;

СЕА – скінченно-елементний аналіз;

МСЕ – метод скінченно-елементного аналізу;

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Розвиток сучасного машинобудування є пріоритетним в Україні. Використання нових матеріалів у машинобудуванні дозволяє вивести виробництво на якісно новий рівень і підвищити ефективність виробництва. 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 використовують для з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Причинами цього є складність виготовлення цих 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) і «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 завдання 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 завдання:

- 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.

*Предметом 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. Одержували дані про фізико-механічні характеристики армованого склопластикового матеріалу знаходили коефіцієнти визначального рівняння 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 6P13Ф3 із системою ЧПК WL4М. Одержання основних показників міцності гвинтового з'єднання з круглою різьбою в деталях з армованих композиційних матеріалів здійснене з використанням універсальної розривної машини Р20 сертифікованої лабораторії Сумського державного університету 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 наступному:**

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

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

3 уперше запропоновано методологічні основи визначення максимальної несучої здатності в з'єднанні з армованого композиційного матеріалу залежно 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 (Додаток Г).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи одержані здобувачем самостійно, а саме: обґрунтований вибір об'єкта та предмета дослідження, обґрунтування плану експерименту, його реалізація і безпосередня участь в обробленні результатів. У наслідок проведеного аналізу науково-технічної літератури в працях [1, 2] здобувач систематизував дані щодо з'єднань, які використовують для деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, та розглянув можливість виготовлення якісно нового роз'ємного з'єднання деталей, виготовлених з названих матеріалів. Разом із науковим керівником було сформульовано мету, завдання дослідження та відпрацьовано структуру дисертації. Написання статей і патентів було здійснене в співавторстві з науковим керівником та студентами кафедри. Експериментальні дослідження здобувач проводив здобувачем 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, 2018 рр.), а також на Сьомій міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017 р.). Основні положення і результати дисертації доповідалися та обговорювалися на Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2016, 2017 рр.), 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 працях, з яких 5 – у виданнях, що входять до переліку фахових видань України та індексуються міжнародними наукометричними базами, 1 стаття – в закордонному виданні та 11 тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях, 1 патент.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел, 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 150 сторінок, зокрема 62 рисунка та 22 таблиці в тексті дисертації, перелік використаних джерел із 102 найменувань – на 10 сторінках, 5 додатків – на 18 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### КЛАСИФІКАЦІЯ З'ЄДНАНЬ ДЕТАЛЕЙ ВИГОТОВЛЕНИХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 1.1 Загальне уявлення про з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів

Армовані композиційні матеріали (АКМ), серед яких найпоширенішими вважають склопластик та вуглепластик, із кожним роком стають усе більш вживаними в промисловості. У технологічно передових галузях виробництва, таких як авіаційна, морська й автомобільна промисловість, для яких знижена вага забезпечує високі динамічні характеристики і низьку витрату палива, представлені матеріали перебувають на одному з перших місць щодо застосування, оскільки знижують вагу та підвищують технічні характеристики машин. Деталі, виготовлені з армованих композиційних матеріалів, в основному з'єднуються одна з одною або деталь з АКМ приєднується до металевої деталі, виготовленої з алюмінію, сталі, титану чи іншого матеріалу [3-7].

У більшості реальних випадків приєднання АКМ до металевих деталей вимагає формування закінченої структури. Закінчена структура є процесом утворення елементів конструкції за рахунок приєднання різних матеріалів до металів із бажаними та унікальними структурними особливостями, такими як більш висока міцність чи жорсткість, опір фізичним пошкодженням або протидія радіаційному ураженню [8]. Врахування всіх основних функціональних властивостей армованих матеріалів не дозволяє задовольнити висунуті вимоги до характеристик міцності цих з'єднань, що створює додаткові проблеми, пов'язані з виготовленням, механічним обробленням та з'єднанням деталей з армованих композиційних матеріалів [9, 10].

За прийнятою в машинобудуванні класифікацією з'єднання деталей, виготовлених з АКМ, можуть бути *роз'ємними* або *нероз'ємними*, *рухомими* чи *нерухомими*. Специфічні властивості цих матеріалів дозволяють створювати



з'єднання, що нерідко задовольняють протилежно висунуті вимоги на початку їх створення. Це пов'язано з жорсткістю вимог, що висуваються до з'єднань деталей із представлених матеріалів. Також ці вимоги є підставою для розроблення нових технологій виготовлення з'єднань та створення нових способів з'єднання конструкцій з АКМ [11].

З'єднання деталей, отримані із застосуванням представлених матеріалів, за характером передавання навантаження поділяють на *стикові* та *підтримувальні*. У стикових – навантаження сприймаються металевими елементами, ці елементи найбільш поширені в комбінованих та механічних з'єднаннях, а в підтримувальних, навантаження на стику сприймається безпосередньо адгезійними прошарками [11].

Умовно всі з'єднання деталей, виготовлених з АКМ, залежно від способу їх реалізації можна поділити на три групи (рис. 1.1):

- суцільні (клеєві, формувальні, зварні);
- механічні (різьбові, заклепкові, самозаклинювальні, зшивні та голчасті);
- комбіновані (клеєво-заклепкові, клеєво-голчасті, клеєво-болтові, клеєво-різьбові та інші поєднання механічних і суцільних з'єднань) [12].



Рисунок 1.1 – Класифікація з'єднань деталей, виготовлених з АКМ

З'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів також класифікують за такими ознаками:

- рухомістю;
- роз'ємністю;
- характером передавання навантаження;
- конструктивними особливостями;
- ступенем автоматизації та механізації виробництва;
- доступом до місця з'єднання та ознаками суцільності.

Рухомість з'єднання визначається ступенем переміщення одних його елементів відносно інших у процесі експлуатації. У нерухомих з'єднаннях відносно переміщення елементів відсутнє. Роз'ємність – характеристика, що базується на можливості розбирання та складання з'єднання без руйнування його елементів. До нероз'ємних з'єднань відносять зварні, заклепкові, паяні, клейові, а також болтові з'єднання з великим радіальним натягом. За характером передавання навантаження з'єднання залежно від напрямку дії основного навантаження поділяють на такі, що працюють на зріз або на розтяг. Більшість з'єднань працюють на зріз [13].

За ступенем механізації та автоматизації здійснюваних робіт з'єднання деталей з АКМ поділяють на ті, що виконуються ручним механізованим інструментом, або ті, які реалізуються стандартним автоматизованим обладнанням. За доступом до місця з'єднання поділяють на такі: з одnobічним чи двобічним підходом. Суцільність з'єднання характеризується питомою вагою можливих зазорів між його окремими елементами. Зазвичай за суцільністю з'єднання поділяють на з'єднання з безперервним швом (зварні, паяні, клейові) й точкові (деякі випадки зварних з'єднань, болтові, заклепкові).

На цей час у конструкціях на основі армованих композиційних матеріалів найчастіше трапляються клейові та заклепкові з'єднання. В агрегатно-складальному виробництві таких конструкцій для передових галузей промисловості переважно використовують точкові з'єднання (до 90 %). Незважаючи на те, що клейові з'єднання мають ряд значних переваг, їх не можна застосовувати для передавання зосереджених навантажень при з'єднаннях елементів, що мають велику товщину. У таких випадках широко використовують заклепкові з'єднання [14]. Близько 80 % точкових з'єднань складають заклепкові з'єднання, що в основному зумовлено значно більшою трудомісткістю виготовлення та установлення болтового з'єднання, особливо для високоресурсних з'єднань [15].

Серед наведених вище з'єднань лише механічні є роз'ємними або частково роз'ємними, тому що застосовуються не з метою забезпечення можливості їх розбирання, а для передавання зосереджених навантажень в елементах з'єднання, що мають велику товщину. Міцність і жорсткість цих з'єднань визначають рівнем

концентрації напружень біля кріпильних отворів. При навантаженні цих з'єднань відбувається перерозподіл напружень, що призводить до зміни характеристик міцності конструкції. Для зниження концентрації напружень у зоні отворів композиційні матеріали додатково армують металевою фольгою або високоміцними плівками. Застосування армування дозволяє знизити масу конструкції без зміни експлуатаційних характеристик. Також зниження маси дозволяє збільшити працездатність конструкції в умовах динамічних навантажень. Найважливішими параметрами, що визначають тип і конструктивні особливості механічних з'єднань, є:

- механічні характеристики з'єднувальних матеріалів і додаткових армуючих елементів;
- кількість і геометричне розміщення кріпильних елементів;
- розміри отворів і відстань від отворів до кромки скріплювальних елементів;
- кількість шарів, що скріплюють конструкцію [15].

Нероз'ємні суцільні з'єднання застосовують для передавання розподіленого навантаження, нероз'ємні комбіновані – для передавання зосередженого навантаження з його подальшим перерозподілом. Водночас найважливішими параметрами, що визначають тип і конструктивні особливості з'єднання, є:

- співвідношення товщини з'єднуваних елементів;
- довжина і жорсткість адгезійного прошарку;
- фізико-механічні властивості клейового прошарку;
- співвідношення модулів зсуву клейового та механічного з'єднань.

Здатність армованих композиційних матеріалів до перерозподілу навантаження в процесі експлуатації потрібно враховувати під час проектування з'єднань елементів конструкцій, виготовлених із них. Необхідно також враховувати й такі фактори:

- наявність і величину натягу в механічних з'єднаннях під час виготовлення та експлуатації виробів;
- зусилля затиску кріпильних елементів;

- точність розмірів, форми і розміщення отворів під кріпильні елементи;
- зміну властивостей композиційного матеріалу в процесі експлуатації, пов'язану зі зміною температури експлуатації;

- вологість довкілля і т. ін.

Проектування конструкцій з АКМ з урахуванням перелічених факторів робить необхідним:

- виготовлення на стадії розроблення технічного і робочого проектів та дослідних зразків з'єднання і всього виробу з метою випробування;

- виготовлення дослідної серії виробів, їх контрольну експлуатацію та внесення змін до робочої і технологічної документації [16].

З точки зору виробництва приєднання армованих композиційних матеріалів – досить складний та енергоємний процес, що потребує значних ресурсних та економічних затрат від початку виробництва до його завершення. Як уже зазначалося в попередній літературі [16], ця вартість може досягати більше ніж половину вартості самого виробу. Зазвичай механічні та суцільні з'єднання застосовують у невідповідальних конструкціях. Механічні заклепкові та болтові з'єднання забезпечують достатню силу приєднання, але збільшують вагу з'єднання та не забезпечують герметичності. Саме тому розроблення нових методів з'єднання АКМ і технологій виготовлення з'єднань деталей, виготовлених із представлених матеріалів, є актуальними завданнями та мають важливе значення для окремих галузей виробництва.

## **1.2 Суцільні з'єднання деталей з АКМ**

До суцільних з'єднань деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, відносять три основні види з'єднань: клейові, зварні, формувальні. Цей тип з'єднання вважається нероз'ємним, оскільки в процесі його створення використовують технології, що не дозволяють за потреби розібрати з'єднання без руйнування. Цей тип не витримує великих навантажень і не відзначається великим терміном експлуатації, тому з кожним роком його все менше використовують для

з'єднання конструкцій з армованих композиційних матеріалів. Повністю відмовитися від суцільних з'єднань також неможливо, оскільки кожного року розробляють нові способи за рахунок модернізації старих технологічних процесів, що дає можливість застосовувати цей тип через його економічну ефективність.

### 1.2.1 Клейові з'єднання

Найпоширенішим способом з'єднання деталей, виготовлених з АКМ, одна з одною або з металевими деталями є склеювання. Це суцільне нероз'ємне з'єднання отримують шляхом використання при приєднуванні речовин (клеїв), що мають високий рівень адгезії до з'єднувальних матеріалів. Як клеї в основному використовують матеріали на основі синтетичних полімерів. Конструктивно шви клейових з'єднань здебільшого виконують внапуск із можливим застосуванням додаткових накладок, що підсилюють конструкцію. Найчастіше клейові з'єднання використовують для невідповідальних конструкцій в авіа- та автобудуванні або на будівництві [17, 18, 19, 20]. На рисунку 1.2 [21] показано конструкції клейових швів.

Г

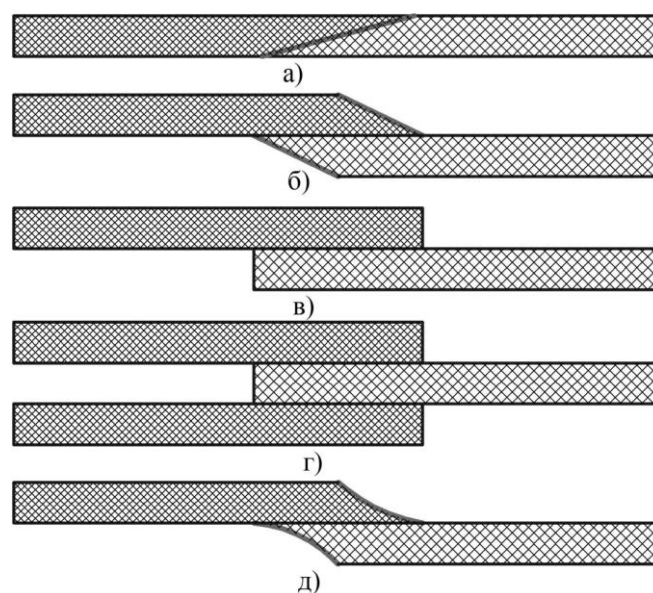


Рисунок 1.2 – Конструкції клейових швів, використовуваних для приєднання деталей з АКМ: а) стикове з'єднання; б) з'єднання з напуском зі скосом; в) просте з'єднання з напуском; г) подвійне з'єднання з напуском; д) покращене з'єднання з напуском [21]

Технологія отримання клейових з'єднань передбачає такі етапи їх створення:

- підготовку поверхонь склеювання з метою забезпечення високої адгезії клею (може проводитися тривало і декількома етапами);
- нанесення шару клею на одну або на обидві поверхні, що склеюються;
- притискання поверхонь одна до одної в особливих температурно-часових умовах.

З'єднання армованих композиційних матеріалів за допомогою клеїв є безперечно одним з основних і найпоширеніших способів зі своїми перевагами та недоліками. Використання клеїв не лише робить з'єднання герметичним, а й запобігає корозії між двома протилежними з'єднуваними матеріалами. У клейовому з'єднанні на відміну від болтового або заклепкового, відбувається розподіл напружень за рахунок відсутності отворів, що послаблюють структуру матеріалу [22].

Основними перевагами клейових з'єднань є:

- високі показники міцності;
- можливість з'єднувати деталі та елементи конструкції, що мають дуже малу товщину;
- здатність з'єднувати матеріали, які мають різні фізико-механічні властивості;
- відсутність ефекту зниження міцності з'єднаних деталей;
- можливість забезпечити з'єднанню герметичність і виключити появу корозії;
- гарні тепло-, звуко- та електроізоляційні властивості;
- універсальність за формою поверхонь для склеювання і, як наслідок, можливість створення виробів складної форми.

Недоліки клейових з'єднань:

- нестабільність фізико-механічних та електричних властивостей упродовж тривалого часу експлуатації й за зміни умов експлуатації (температури, вологості довкілля);
- токсичність клеїв;

- вогнебезпечність;
- складність технологічного оснащення в процесі підготовки поверхонь для склеювання;
- недостатня ефективність з'єднання за високої жорсткості з'єднуваних деталей.

Клейове з'єднання армованих композиційних матеріалів із напуском із двох боків наведено на рисунку 1.3.

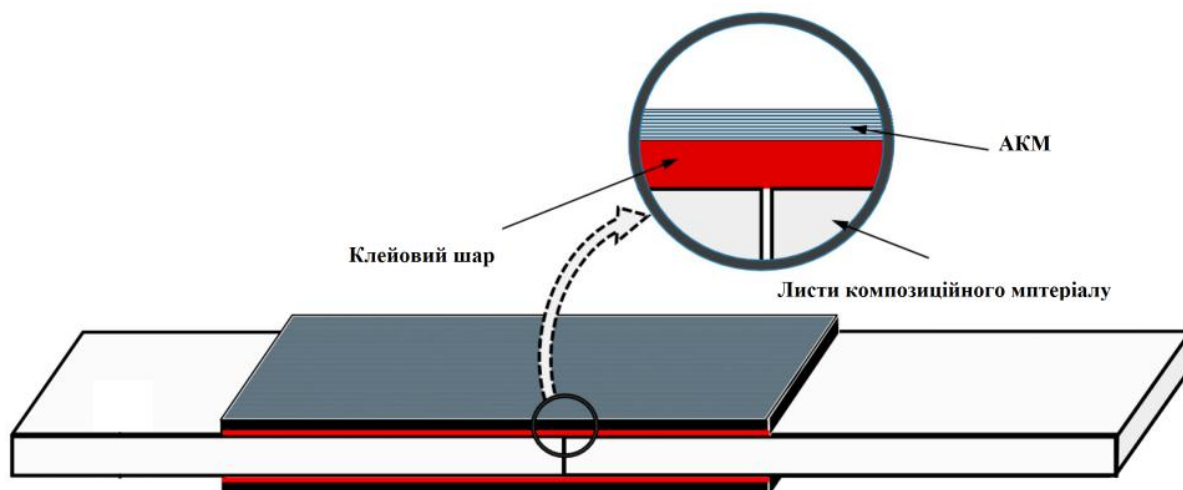


Рисунок 1.3 – Клейове з'єднання армованих композиційних матеріалів із напуском із двох боків [22]

Потреба для кожного типу АКМ окремого відповідного дорогого клею і довгий час, витрачений на процес затвердіння, вважаються одними з основних недоліків клейового з'єднання [23, 24]. Цей метод не придатний для масового виробництва, ураховуючи нинішній попит на високу ефективність виробництва, оскільки вимагає великих фінансових і матеріальних витрат.

### 1.2.2 Формувальні з'єднання

Формувальні з'єднання аналогічні клейовим. Процес утворення формувальних з'єднань називають приформовуванням або контактним формованням. Ці з'єднання широко використовують під час виробництва великих виробів із склопластиків чи з інших армованих композитів. Приформовування полягає в нанесенні в місце стику

шару наповнювача (наприклад, склотканини), просоченого клейовою речовиною, після затвердіння якої утворюється міцне з'єднання. Контактне формування від приформовування відрізняється послідовністю операцій: спочатку окремо формують і просочують матричним матеріалом (клеєм) новий шар наповнювача, а після затвердіння склеюють новий шар із заготовкою виробу таким же самим матричним матеріалом [14].

Зазвичай цей вид з'єднання застосовують для армованих композиційних матеріалів товщиною від 50 мм і більше, оскільки в даному разі, раціональною є ступінчаста конструкція з'єднання, що має такі переваги: зниження внутрішніх напружень в 510 разів і навіть більше, а також мінімальний зсув між шарами АКМ. Для підвищення міцності ступінчастих з'єднань по краях з'єднання застосовують еластичний клей або при з'єднанні високомодульних матеріалів типу вуглепластиків – низькомодульну накладку зі скловолокна.

### **1.2.3 Зварні з'єднання**

Звичайні методи з'єднання армованих композиційних матеріалів, такі як болтове з'єднання, склеювання, клепання, відносять до нетеплових способів приєднання, тоді як зварювання – це тепла дія на місце стику [26, 27]. Цей метод з'єднання застосовують лише для АКМ на основі термопластичних матриць. Зварювання мікрохвилями, індукційне нагрівання, зварювання тертям діють безпосередньо в місці з'єднання, оскільки основним принципом наведених зварних з'єднань є часткове розплавлення матричного матеріалу АКМ, за рахунок цього виникає адгезійний зв'язок і, як наслідок, з'єднання двох матеріалів між собою [26, 28].

Зварні з'єднання відносять до суцільних і отримують шляхом нагрівання або хімічної взаємодії матеріалів зварюваних елементів конструкції між собою. Водночас відбувається зникнення межі поділу між матеріалами виробів у зоні з'єднання за рахунок їх часткового або повного змішування. У разі зварювання полімерних композиційних матеріалів міцність зварного шва визначають розмірами, формою та орієнтацією макромолекул [14]. Зварюванню найчастіше підлягають вироби, виготовлені з однакових матеріалів, оскільки нагрівання деталей у процесі



зварювання забезпечує взаємну дифузію молекул матеріалів у зоні теплової дії. Такий самий ефект може бути досягнутий за допомогою розчинника, нанесеного на зварювані поверхні. Що ж стосується дифузійного зварювання, то його в основному використовують для з'єднання деталей, виготовлених з еластопластиків або термопластиків [26].

Хімічне зварювання відрізняється від дифузійного тим, що замість розчинника використовують хімічний присадний реагент, який вступає в хімічну реакцію з матеріалами без утворення самостійної безперервної фази. Хімічне зварювання застосовують для з'єднання деталей, виготовлених із термопластиків і реактопластиків із поперечними зв'язками між молекулами.

Здебільшого при зварюванні як джерело теплової енергії використовують лазер. На рисунку 1.4 поданий тип зварного з'єднання лазером з обох боків. У процесі приєднання матеріалів за рахунок нагрівання лазером не відбувається контакту елемента нагрівання із з'єднувальними матеріалами, що вважається однією з основних переваг цього методу. Основним недоліком зварних з'єднань вважають зміну структури матеріалу в зоні шва. На сьогодні існує два типи лазерного з'єднання, які найчастіше використовують для цих матеріалів: лазерне глибинне зварювання проникненням та зварювання за рахунок провідності лазерного променя [29]. З кожним роком з'являється все більше нових способів з'єднання за методом зварювання, всі вони більш детально описані в [30].

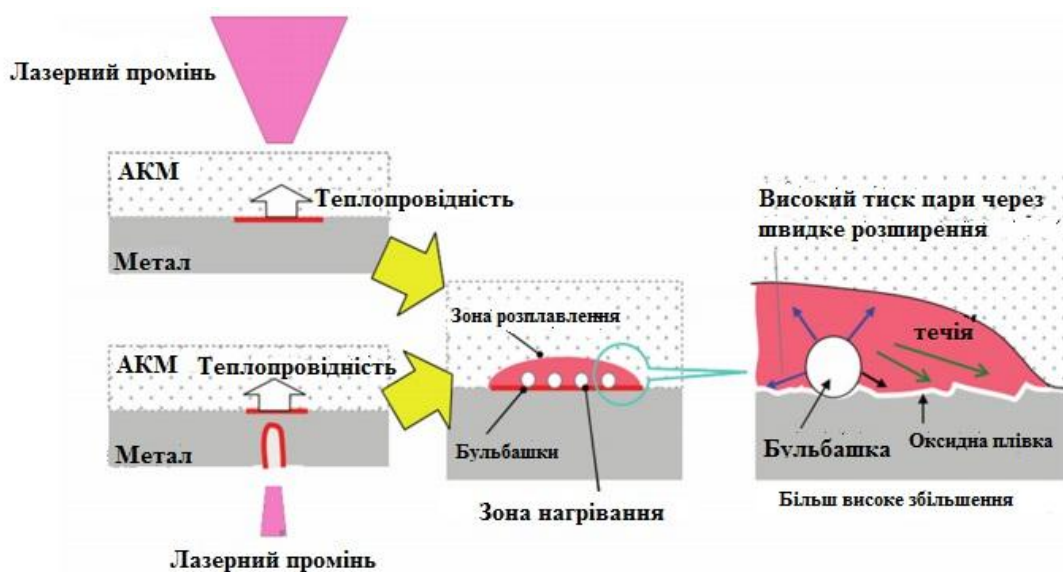


Рисунок 1.4 – Принцип з'єднання лазером з обох боків деталей з АКМ [30]

### **1.3 Механічні з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів**

Механічні з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, в основному класифікують за однією конструктивною ознакою, а саме за типом металевих кріпильних елементів, використовуваних у процесі. Згідно з цією класифікацією з'єднання поділяють на: *різьбові, заклепкові, штифтові*, а також до механічних з'єднань більшість відносить *самозаклинювальні та голчасті*. Цей перелік можна продовжити, оскільки з кожним роком розробляють усе більше нових способів з'єднання цих деталей, але основними й найбільш використовуваними є вище перелічені. Застосування того чи іншого способу залежить в основному від типу навантаження (статичні чи динамічні), надійності й легкості у виробництві, вартості та спеціальних умов (необхідності отримання роз'ємних, рухомих чи інших типів з'єднань).

Механічні з'єднання в основному використовують для з'єднання АКМ між собою, але нерідко їх застосовують для з'єднання композитів із металами чи іншими матеріалами. Нижче більш детально описано всі основні типи механічних з'єднань.

#### **1.3.1 Заклепкові з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів**

Найбільш надійним і поширеним нині механічним способом з'єднання деталей, виготовлених з АКМ, є спосіб з'єднання цих деталей клепанням. Насамперед мова йде про технологічно передові галузі виробництва, такі як авіаційна, морська й автомобільна. Застосування клепання обґрунтоване, його перевагою перед іншими механічними з'єднаннями в надійності, економічному й технологічному відношенні, а головним чином, високим ступенем освоєння та оснащення технологічних процесів. Під час виготовлення таких вузлів, як різного роду панелі та агрегати, клепання до цього часу є найпоширенішим видом

нероз'ємного механічного з'єднання деталей з АКМ, оскільки воно забезпечує необхідні характеристики міцності, надійності та ресурсу роботи конструкції [31-34].

Залежно від поєднання елементів і характеру передавання сил з одного елемента конструкції на інший розрізняють такі види заклепкових швів (рис. 1.5): з'єднання з напуском, стикове з однією накладкою, стикове з двома накладками та з'єднання за допомогою стрингерів.

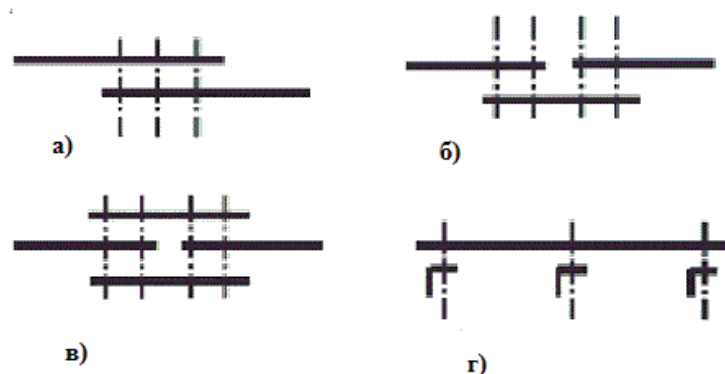


Рисунок 1.5 – Види заклепкових швів: а) з'єднання з напуском; б) стикове з'єднання з однією накладкою; в) стикове з'єднання з двома накладками; г) з'єднання за допомогою стрингерів [14]

Більшість заклепок для з'єднання виготовляють із легких сплавів і сталей. За конструктивними особливостями заклепки поділяють на заклепки з виступаючою або потайною закладними головками.

Окрім звичайних стрижневих заклепок, у ряді виробництв застосовують спеціальні заклепки (наприклад, трубчаста заклепка) для з'єднання деталей, виготовлених з АКМ (рис. 1.6). У разі однобічного доступу до зони клепаання використовують заклепки для однобічного клепаання: *заклепки з осердям, гайки-пістони, заклепки з високим опором зрізу* [32]. В елементах конструкції, схильних до впливу великих напружень зрізу, для з'єднань з двобічним підходом застосовують заклепки з високим опором зрізу або болти-заклепки [34].

Однією з важливих вимог, що висуваються до цілого ряду заклепкових конструкцій, є забезпечення в процесі експлуатації з'єднання необхідної міри герметичності: *підтримання надмірного тиску, відвертання витоків по шву, захист різних відсіків та агрегатів від проникнення в них агресивних рідин і газів та ін.* [35].



Рисунок 1.6 – З'єднання спеціальною заклепкою АКМ та алюмінію [32]

Що ж стосується процесу клепаання, то він полягає в осадженні стрижня заклепки в спеціальний отвір і формуванні з частини стрижня, що виступає, замикальної головки необхідної форми. Необхідно мати на увазі, що при формуванні замикальної головки стрижень заклепки, заповнюючи отвір, деформується нерівномірно, причому його діаметр із боку заставної головки буде меншим, ніж із боку замикальної головки [34].

Формування замикальних головок заклепок здійснюють декількома методами, найбільш поширеними з яких є заклепування ударом, пресуванням, а також розкочуванням. **Заклепування ударом** виконують зазвичай ручним або пневматичним молотком. Ударяють молотком по замикальній головці, а до заставної головки притискають підтримувальний елемент. **Заклепування пресуванням** здійснюють відповідно на пресах. У цьому разі заклепку вставляють в отвір і включають прес. Під час роботи преса автоматично підводиться верхній пуансон, пакет стискається і за допомогою нижнього пуансона утворюється замикальна головка.

**Заклепування розкочуванням** виконують на спеціальних верстатах для розкочування або з використанням універсальних свердлильних верстатів. У цьому разі в процесі клепаання відбуваються стискання пакета і розкочування замикальної головки заклепки спеціальним пуансоном. Останніми роками широко досліджуються процеси магнітно-імпульсного клепаання та клепаання з накладанням ультразвукових коливань з електронагріванням у процесі та ін. На рисунку 1.7

наведено послідовність з'єднання з двох боків спеціальною трубчастою заклепкою двох листів армованих композиційних матеріалів.

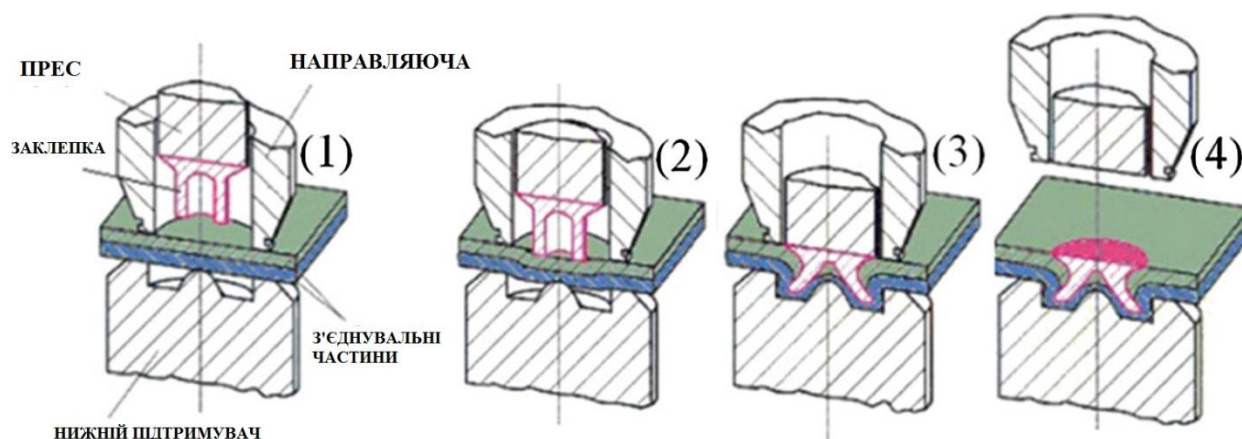


Рисунок 1.7 – Послідовність з'єднання трубчастою заклепкою [34]

У виробництві широко використовують спосіб механічного холодного клепаання ударом, оскільки у разі його використання краще заповнюється отвір стрижнем заклепки і не знижуються механічні властивості з'єднувальних матеріалів, що значно полегшує виконання робіт [13].

Основними перевагами заклепкових з'єднань деталей з армованих композиційних матеріалів є те, що ці з'єднання порівняно з клейовими більш стабільні та краще контролюються. Щодо недоліків, то ними є більш висока вартість виготовлення, більш складніша технологія, а також шум і вібрація в процесі клепаання, що може призвести до руйнування АКМ. Ще одним недоліком є те, що заклепки додатково збільшують вагу елемента конструкції, а в таких галузях, як авіаційна та автомобільна, цей фактор відіграє дуже важливу роль при створенні конструкцій з АКМ і не може не бути взятий до уваги.

### **1.3.2 Спосіб з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів вминанням «клінч-з'єднання»**

З'єднання деталей цим методом відбувається вдавлюванням з'єднуваних деталей одна в одну за допомогою матриці і пуансона. Відбувається локальна деформація листа – одна деталь під тиском входить в іншу. При цьому не

використовуються високі температури або клейові речовини, а листи з'єднуються без ушкодження поверхневого шару – нижня деталь під тиском насаджується на ковадло матриці і буквально розтікається, утворюючи так звану «замикальну головку». Бічні сегменти матриці фіксують цю ділянку. Після закінчення процесу пуансон піднімається, а бічні сегменти матриці повертаються до початкового положення.

Для різних випадків клінч-ділянки з'єднання можуть бути різної форми: прямокутними або круглими, це залежить від вибору оснащення (форми і розмірів матриці та пунсона). «Клінч-з'єднання» є хорошою альтернативою зварному з'єднанню деталей з АКМ, але лише у випадках, якщо їх неможливо з'єднати зварюванням.

Для того щоб правильно реалізувати «клінч-з'єднання», необхідно дослідити безліч параметрів на основі методу оптимізації чи використовуючи скінченно-елементний аналіз [36]. На сьогодні цей спосіб з'єднання АКМ із металами набуває значної популярності, особливо в авто- та авіабудуванні для з'єднання кузовних деталей автомобілів і літаків, а також для виготовлення різного роду корпусних деталей чи елементів обшивки.

Спосіб з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів уминанням поділяють на дві категорії: перша – якщо з'єднання відбувається за один рух преса, а друга – відповідно за два рухи. Для першої категорії беруть до уваги лише одну умову, що впливає на виконання з'єднання, а саме товщини з'єднувальних матеріалів не повинні перевищувати допустимого значення, для другої категорії товщина не має значення, але за рахунок великих капіталовкладень у процес виробництва другий метод рідко використовують на сучасному етапі розвитку цих технологій [37, 38]. На рисунку 1.8 схематично показаний процес з'єднання за допомогою вминання «клінч-з'єднання».

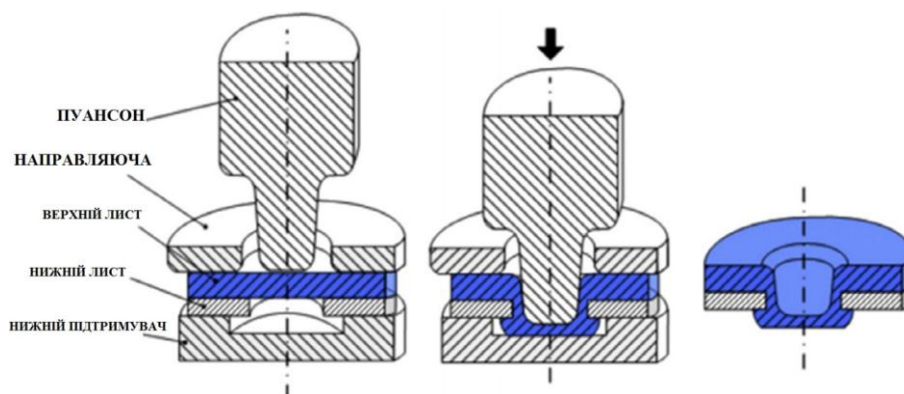


Рисунок 1.8 – Схема клінч-з'єднання двох листів матеріалу [39]

Спосіб з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів уминанням забезпечує ряд переваг, що роблять його досить популярним серед виробників різного роду конструкцій з армованих композиційних матеріалів:

- зберігається структурна цілісність деталі;
- для скріплення не потрібні заклепки;
- не вимагається додаткової підготовки;
- відсутність термічного оброблення підвищує зносостійкість і надійність деталі;
- існує можливість з'єднання декількох листів (більше ніж двох).

Основними недоліками цього типу з'єднання є виникнення додаткових концентраторів напружень у місцях проникнення одного матеріалу в інший за рахунок зміни чи руйнування структури армованого композиційного матеріалу в процесі приєднання.

### **1.3.3 Самозаклинювальні з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів**

До механічних з'єднань деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, більшість науковців також відносить самозаклинювальні з'єднання. Цей тип з'єднання використовують в окремих конструктивних випадках. Відомо, що при використанні більшості механічних з'єднань деталей з армованих композиційних матеріалів у місцях з'єднання відбувається послаблення характеристик міцності за рахунок виникнення додаткових концентраторів напружень в отворах, канавках або в різьбі. Таке послаблення призводить до руйнування з'єднання за короткий проміжок часу. Для протидії саме такому послабленню характеристик міцності і було розроблене конструкторське рішення, що дозволяє збільшити міцність з'єднання за рахунок зменшення експлуатаційного навантаження.

В основу цього рішення покладена умова забезпечення міцного зв'язку між елементарними шарами армованого композиційного матеріалу. При збільшенні

навантаження на з'єднання стискальні напруження повинні зростати і, як наслідок збільшувати його міцність і несучу здатність. З'єднання, що працює вищезазначеним принципом, одержало назву самозаклинювального. Приклади самозаклинювальних з'єднань показані на рисунку 1.9 [14]. Із рисунка бачимо, що заклинювальні профілі розміщені на конічних сполучених поверхнях. Це дозволяє рівномірно розподілити навантаження по всій товщині деталі з армованого композиційного матеріалу. Спеціальне профілювання поверхонь заклинення дозволяє рівномірно розподіляти навантаження по всій довжині з'єднання.

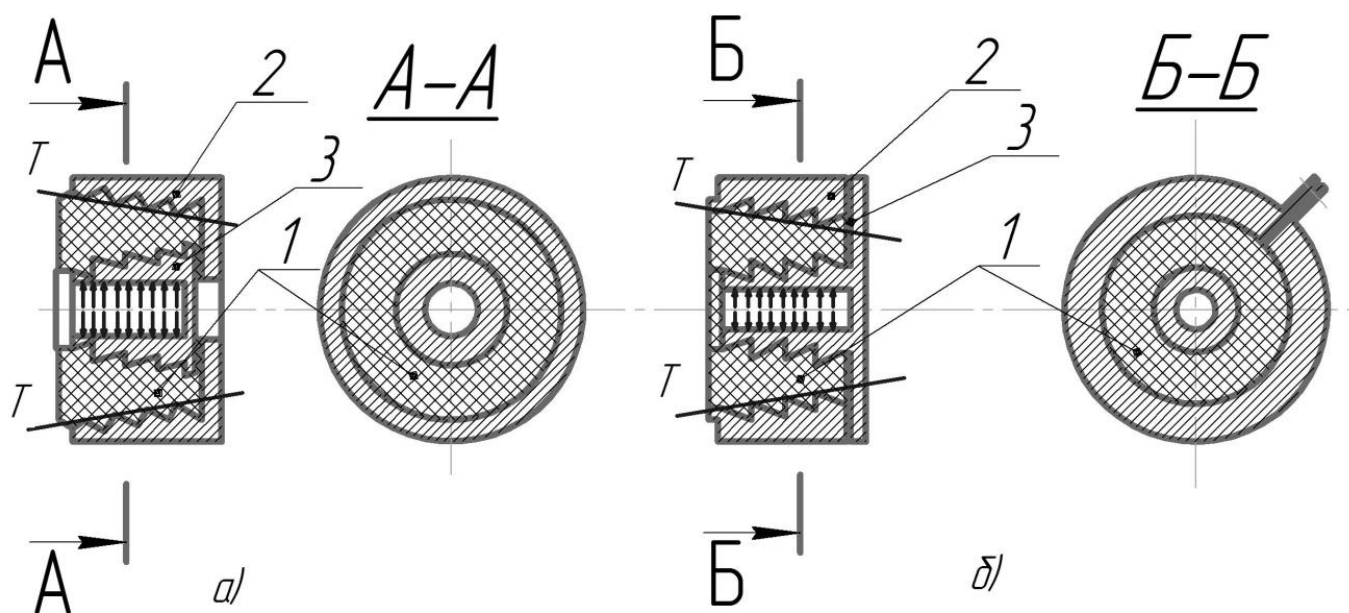


Рисунок 1.9 – Самозаклинювальні з'єднання деталей з АКМ: а) кососиметричне; б) симетричне; 1 – армований композиційний матеріал; 2, 3 – нероз'ємні (а), роз'ємні (б) металеві обойми [14]

Залежно від характеру навантаження і конструкції опорних елементів самозаклинювальні з'єднання можуть бути різними. На рисунку 1.9 наведено розбірні самозаклинювальні з'єднання труб з армованого композиційного матеріалу, що експлуатуються за наявності внутрішнього тиску. Конічні поверхні Т – Т, мають спеціальні заклинювальні канавки, що можуть бути спіральними (рис. 1.9 а) або кільцевими (рис. 1.9 б). Кут нахилу самозаклинювального профілю може бути незмінним по всій довжині або змінюватися за відповідним законом, а самозаклинювальні профілі розміщуватися кососиметрично (рис. 1.9 а) чи



симетрично (рис. 1.9 б). При з'єднанні використовують дві металеві обойми (2 і 3), які за рахунок наявності дна утворюють єдину силову конструкцію. Під час експлуатації з'єднання під дією тиску відбувається рівномірний розподіл навантаження між обоймами. При цьому труба з композиційного матеріалу здавлюється із зусиллями, що зростають у разі збільшення тиску. При використанні обойм зі спіральними заклинювальними канавками конструкцію складають шляхом згвинчування; що стосується використання кільцевих конічних канавок, то обойму роблять роз'ємною з обох боків.

Основними недоліками самозаклинювальних механічних з'єднань можна вважати те, що цей тип з'єднання використовують лише в окремих обмежених специфікою з'єднувальних деталей випадках. Наприклад для з'єднання склопластикових труб чи інших стрижневих елементів конструкцій. Ще одним недоліком є те, що для реалізації процесу з'єднання необхідно виготовляти різного роду додаткові елементи, а це вимагає додаткових матеріальних і фізичних витрат.

#### **1.3.4 З'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів за рахунок мікроелементів (зшивні та голчасті)**

При з'єднанні тонкостінних деталей з армованих композиційних матеріалів важливим фактором є рівномірний розподіл навантаження в зоні з'єднання. У тих випадках, коли клейові з'єднання не забезпечують достатньої міцності, а механічне кріплення за допомогою болтів і заклепок значно послаблює конструкцію, можуть бути застосовані зшивні та голчасті з'єднання (рис. 1.10). Міцність таких з'єднань близька до міцності самого матеріалу і може перевищувати міцність болтових з'єднань (на прикладі фактичних даних) до 18 разів [14], оскільки, як відомо із [40], зі зменшенням діаметра кріпильних елементів міцність з'єднання підвищується. Вивчення механізмів руйнування з'єднання та оцінювання стану з'єднання в зоні концентрації напружень [41, 42] показали що це підвищення спричинене відносним збільшенням міцності зсуву в АКМ і статичною природою руйнування матеріалу.

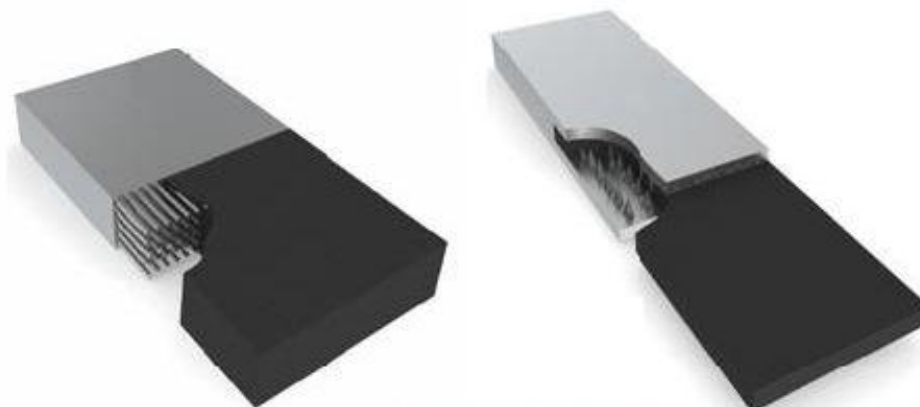


Рисунок 1.10 – Приклад зшивного та голчастого з'єднань деталей з АКМ [42]

Один із прикладів з'єднання деталей з АКМ на основі мікроелементів описаний у праці Я. С. Карпова [43]. Спосіб полягає у заформовуванні в деталь з армованого композиційного матеріалу поздовжніх кріпильних елементів (рис. 1.11), виготовлених із металевого дроту або борних волокон. Після заформовування стрижнів відбувається з'єднання деталей одна з одною, в зону стику подається клейова речовина.

Міцність з'єднання на основі мікроелементів (рис. 1.11) досягається за рахунок адгезійної взаємодії в зоні приєднання й на ділянці заформовування в АКМ. Вимірювання сили висмикування показало, що розрив дроту досягається при глибині вставок більше ніж 10 мм. Дані були підтвержені під час дослідження міцності зразків з'єднання деталей із вуглепластику з різною довжиною зони суміщення [41].

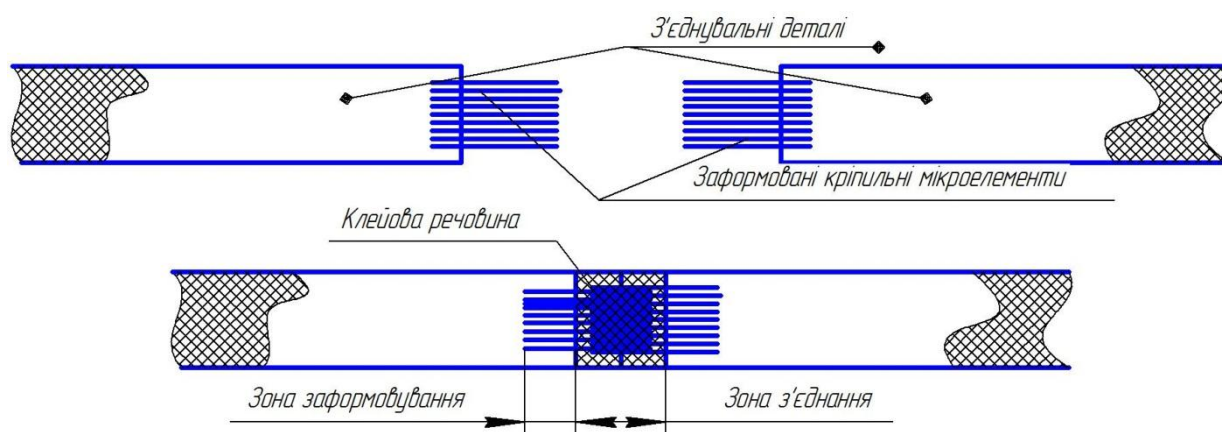


Рисунок 1.11– Спосіб з'єднання з поздовжніми заформованими кріпильними елементами [43]

Подальша робота з технологією виготовлення зшивних і голчастих з'єднань та створення спеціалізованого напівавтоматичного обладнання для їх виконання є нагальними завданнями, вирішення яких дозволить різко розширити обсяг застосування АКМ у силових конструкціях. Основний недолік цього типу з'єднання – це неможливість його роз'ємності без руйнування структури.

#### 1.4 Комбіновані з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів

Поєднання клейового та механічного способів приєднання в один шляхом створення комбінованого з'єднання здебільшого дозволяє уникнути недоліків, властивих обом способам. Найпоширенішим прикладом комбінованого з'єднання є випадок, наведений на рисунку 1.12 (комбінація клейового та механічного з'єднань). Створення такого з'єднання потребує вирішення двох основних завдань: забезпечення спільних деформацій клейового та механічного з'єднань, необхідності створення відповідного тиску в клейовому прошарку при його полімеризації [14]. Перше, вирішується за рахунок відповідного затягування заклепок, друге – за рахунок підвищення еластичності клеїв та їх адгезії до армованого композита або збільшенням кількості заклепок чи підвищенням їх міцності й жорсткості, виготовляючи з різних матеріалів.

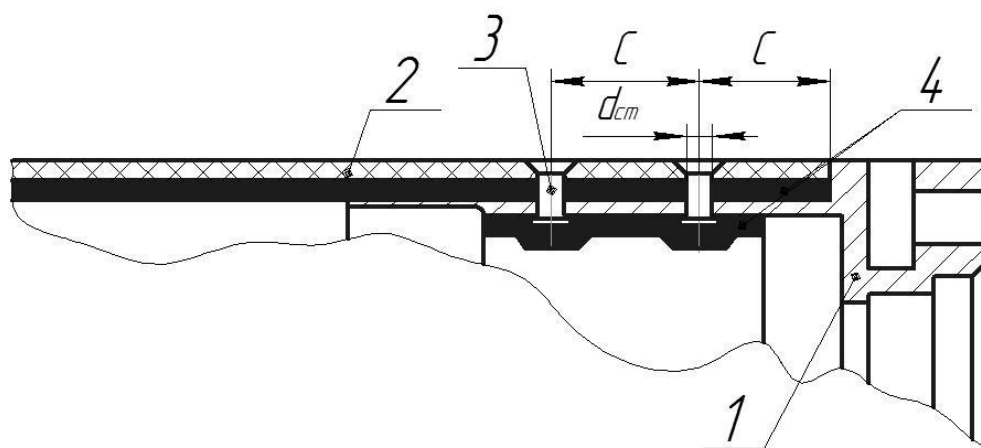


Рисунок 1.12 – Комбіноване металопластикове з'єднання (поєднання клейового та заклепкового способів з'єднання): 1 – металевий каркас; 2 – оболонка з АКМ; 3 – заклепка; 4 – клей [44]

Ще один приклад комбінованого з'єднання високонавантажених конструкцій із металів та АКМ – це застосування різного роду комбінацій механічних з'єднань. Як приклад, у деяких випадках для стикового з'єднання деталей використовують штифто-болтове і штифто-шпилькове з'єднання (рис. 1.13) [11]. Штифти, які вставляють в отвори у фланцях, відіграють роль гайок. Фланці можуть мати різні конструкції, виготовлятися різними методами і зміцнюватися введенням додаткових елементів у вигляді металевої фольги, борних плівок та ін. З метою розподілу навантаження на фланці отвори під штифти можуть бути розміщені не в один, а в декілька рядів.

У багатьох випадках приєднання раціонально використовувати як комбіноване з'єднання поєднання голчастого та клейового з'єднань. Водночас схема розміщення мікроелементів (голок) значно не змінюється, але мікроелементи розміщуються в основному в місцях найбільших концентраторів напружень у клейовому шві, тобто на кінцях з'єднувальних елементів. Наявність піддатливих та жорстких зв'язків у клейовому шві забезпечує краще залучення елементів АКМ до роботи та компенсує недостатню міцність клейового з'єднання [45].

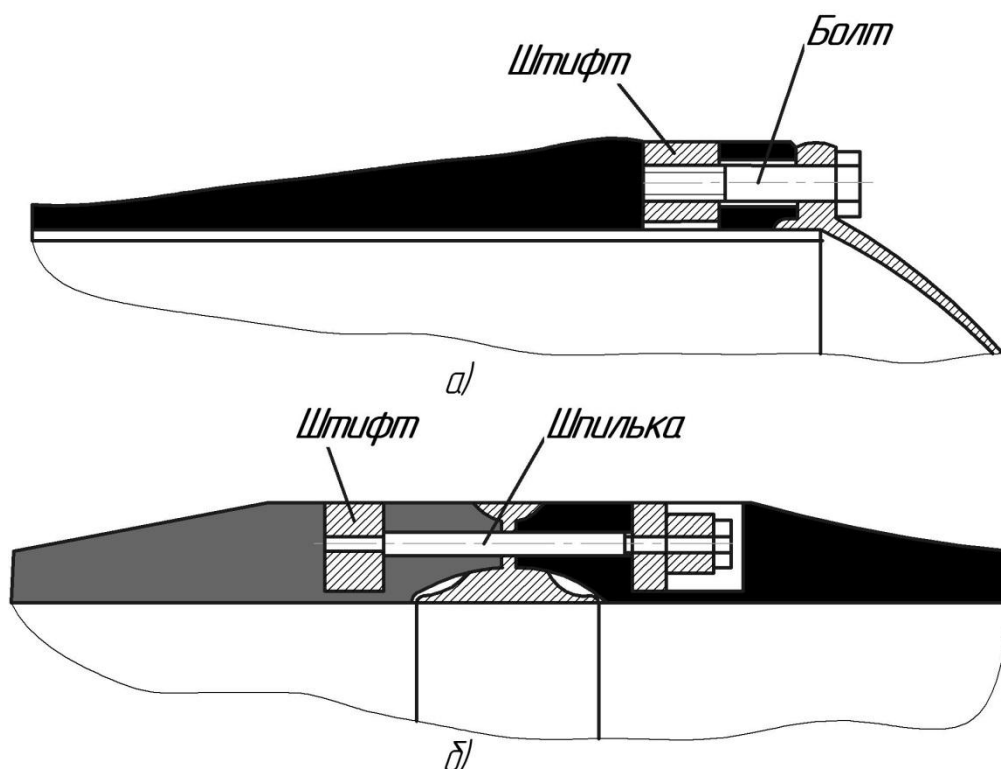


Рисунок 1.13 – Конструкції штифто-болтового (а) та штифто-шпилькового (б) з'єднань деталей з АКМ [45]

Незважаючи на всі переваги комбінованих з'єднань, вони мають декілька істотних недоліків: дороговизна та складність виготовлення, що не дозволяють використовувати їх для масового виготовлення деталей.

### 1.5 Гвинтові з'єднання деталей з армованих композиційних матеріалів та способи їх формоутворення

Розглянуті вище види з'єднань в основному використовують для сполучення каркасних конструкцій, виготовлених з АКМ, наприклад, для з'єднання листів обшивки або елементів якихось корпусних деталей одна з одною. Що ж стосується гвинтових з'єднань деталей, виготовлених з АКМ, то в них своя специфіка виготовлення та застосування [46].

Гвинтові з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, виконують або за допомогою виготовлення різьби на поверхнях з'єднуваних деталей, або за допомогою розміщення в деталях з АКМ металевих кріпильних вставок (рис. 1.14 б), в яких уже виконана різьба, через яку й відбувається подальше приєднання. Конструкція різьби (її діаметр і профіль), якщо вона формоутворюється на деталі з армованого композита, відрізняється від конструкції стандартних типів різьби [44], що становить додаткові труднощі під час її виготовлення. Більшість конструкцій, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, що передбачають з'єднання елементів за допомогою різьби, зазвичай, з'єднується за допомогою металевих елементів із виконаною в них різьбою.

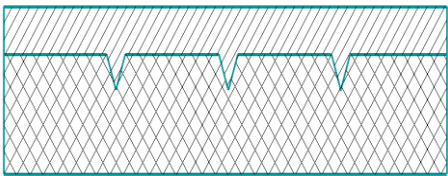
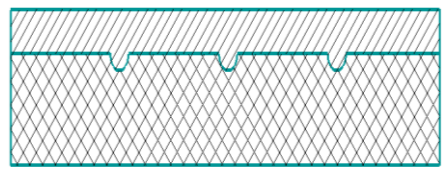
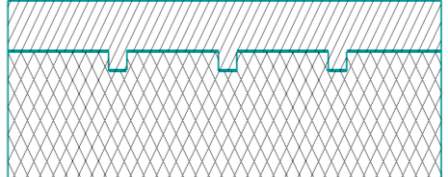
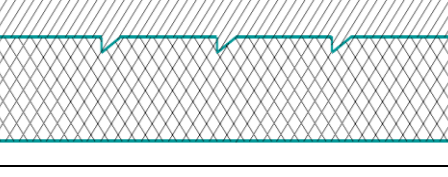


Рисунок 1.14 – Реалізація гвинтового з'єднання в АКМ за допомогою вставки:

а) металева вставка, розміщена в деталі з АКМ; б) фото металевих вставок

Міцність гвинтового з'єднання здебільшого залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, технології виготовлення різьби, габаритів з'єднаних деталей, але найбільше на міцність впливають зовнішні сили, що діють на з'єднання. Ураховуючи значну різниця механічних характеристик АКМ та металу, в основному в межі міцності на зріз, і те, що метал витримує більш високі навантаження на зріз, ніж армовані композиційні матеріали, різьби для виготовлення їх у цих матеріалах зазвичай мають несиметричний або спеціальний профіль. Несиметричність залежить від співвідношення допустимих напружень при міжшаровому зрізі в АКМ. У таблиці 1.1 наведені гвинтові профілі, найбільш придатні для їх формоутворення, на поверхнях деталей, виготовлених з АКМ, а також їх основні переваги й недоліки [46].

Таблиця 1.1 – Типи гвинтових профілів, рекомендовані для їх виготовлення на деталях з АКМ

Профілі різьби	Переваги	Недоліки
	Простота виготовлення та контролю, велика площа контакту	Наявність радіальних напружень при навантаженні, концентрація напружень у гострих кутах
	Невелика концентрація напружень, велика площа контакту	Наявність радіальних напружень при навантаженні складність щодо виготовлення та контролю
	Відсутність радіальних напружень при навантаженні, простота виготовлення та контролю	Зменшення площі зрізу та зменшення міцності за рахунок наявності канавки, складність виготовлення
	Відсутність радіальних напружень при навантаженні, велика площа зрізування	Наявність концентраторів напружень, складність виготовлення

На сьогодні існує два найпоширеніших напрямки підвищення міцності гвинтових з'єднань деталей, виготовлених з АКМ: розроблення спеціальних

конструкторських рішень та зміна технології виготовлення виробів з армованих композитів.

Одним із прикладів раціонального конструкторського рішення є з'єднання за допомогою різьби металевої деталі та деталі, виготовленої з АКМ, за різних схем навантаження. Це рішення передбачає такі дії: при навантаженні деталі з композиційного матеріалу тиском із середини різьба на ній нарізується зовнішньою, а металева деталь має внутрішню різьбу (рис. 1.15 а) і навпаки – при навантаженні зовні металева деталь виконується з внутрішньою різьбою (рис. 1.15 б) [44].

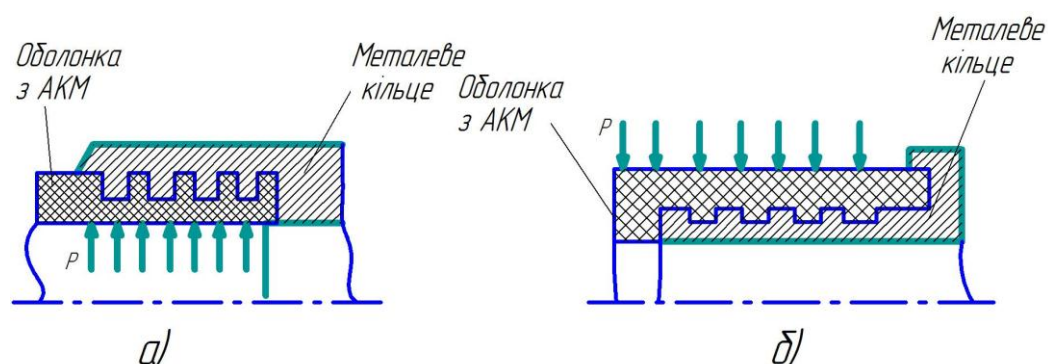


Рисунок 1.15 – Способи розміщення елемента з'єднання з армованого композиційного матеріалу з металом залежно від місця прикладення сили **P**:  
а) схема з внутрішньо прикладеною силою; б) схема із зовнішньо прикладеною силою [44]

Другий напрямок підвищення міцності гвинтових з'єднань – це зміна технології виготовлення виробу з композиційного матеріалу. Його реалізують такими способами:

- підвищенням еластичності матриці АКМ;
- спеціальним укладанням армованого наповнювача під час виготовлення деталі, що передбачає сприйняття ним навантаження на зріз (це підвищує допустиме навантаження до 8 разів);
- проклеюванням гвинтового з'єднання (після цього воно стає нероз'ємним), що підвищує міцність до 30 %.

Здебільшого гвинтові з'єднання, утворюванні формоутворенням гвинтової поверхні на деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, є

несиловими. Силіві з'єднання реалізуються за рахунок металевих гвинтових елементів, які заформовуються в деталь з АКМ, і через них відбувається подальше з'єднання [47]. Причиною такої реалізації силових з'єднань є відсутність достовірної інформації про показники міцності гвинтових з'єднань зі спеціальним профілем різьби, формоутворених на деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Для прикладу можна взяти різьбу із круглим профілем, згідно з працею В. Г. Комарова [47], в якій він зробив припущення і теоретично обґрунтував, що ця різьба повинна мати досить непогані показники міцності у разі її використання для силових з'єднань деталей з АКМ. Основна причина, чому на сьогодні не одержані ці показники – це відсутність правильної технології формоутворення гвинтової поверхні з круглим профілем на деталях, виготовлених з армованих композитів.

Технології виготовлення різьби в деталях з армованих композиційних матеріалів є двох видів: механічна обробка гвинтової поверхні [48, 49] або її формування такими методами, як пресування, лиття чи накатування [50]. Вибір методу залежить від матеріалу деталей, розмірів різьби, серійності випуску та наявності відповідного обладнання. Технологія виготовлення дуже впливає на міцність, правильно підібрана технологія – це запорука успіху в досягненні міцного й надійного з'єднання.

Основні переваги механічної обробки різьби над іншими технологіями отримання полягають у такому [48]:

- різьба може бути виготовлена з більшою точністю, ніж за інших методів;
- можливе виготовлення різьби довжиною більше ніж два діаметри;
- немає принципових труднощів під час виготовлення внутрішньої різьби діаметром менше ніж 4 мм та зовнішньої різьби діаметром 8 мм, що не можуть бути отримані пресуванням чи литтям;
- внутрішня різьба може бути створена в будь-якому місці деталі;
- при дрібносерійному виробництві механічна обробка економічно вигідніше, ніж формування.



Механічну обробку застосовують також при виготовленні різьби на великогабаритних деталях, коли методи пресування або лиття не вдається використовувати через обмеженість потужностей обладнання, труднощі виготовлення оснащення та ін.

Механічна обробка поряд з істотними перевагами має такі недоліки:

- на поверхні оброблюваної деталі порушується лаковий шар, що захищає її від впливу довкілля;
- крихкий АКМ під час обробки може кришитися, через що не вдається отримати правильний профіль різьби;
- формоутворена різанням різьба менш міцна, ніж формована, оскільки відбувається руйнування шарів матеріалу в процесі обробки [50].

Формоутворення різанням зовнішньої різьби для з'єднання деталей типу патрубків, конусів, труб, втулок, ємностей виконують різцями, фрезами, шліфувальними кругами або різьбовими головками. З точки зору точності та якості обробки гвинтової поверхні більш прогресивним методом є різьбошліфування [50].

Нарізування різьби різцями на токарних верстатах застосовують під час оброблення невеликих партій деталей, а також у тих випадках, якщо інший інструмент застосувати не вдається. При цьому на деталях з АКМ можна нарізати різьбу будь-якого стандартного або спеціального профілю (рис. 1.16). Найбільш складними щодо виготовлення є 5-й, 8-й та 11-й типи (рис. 1.16) [47].

Метод нарізування різьби різцем має такі переваги:

- найвища чистота поверхні порівняно з усіма іншими способами, крім різьби отриманої шліфуванням та формуванням;
- простота конструкції інструменту і пов'язана з цим мала його вартість;
- можливість застосування одного інструмента для виготовлення різьби довільного розміру.

Нарізування різьби різцем проводять шляхом послідовних проходів із різною глибиною різання. Під час оброблення армованих деталей, виготовлених намотуванням, напрямком обертання збігається з напрямком обертання під час операції намотування. Обробку виконують різцями, оснащеними пластинками з

твердих сплавів, що мають таку геометрію різальної частини: кут  $\alpha = 10-15^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$  [47]. Кут заточування профілю різця відповідає куту профілю різьби. Швидкість різання рекомендується брати такою, що дорівнює 40 – 70 м/хв. Застосування охолоджувальних рідин (емульсій) знижує міцність різьбових з'єднань на 10-15% порівняно з варіантом, коли охолодження проводили повітряним струменем, у той самий час підвищує чистоту оброблюваної поверхні [50].

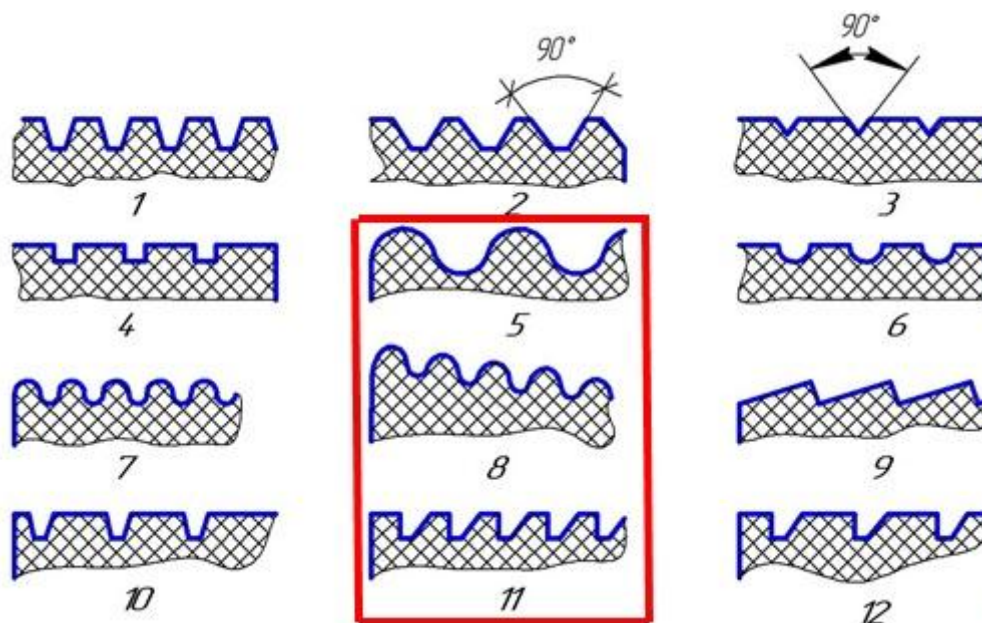


Рисунок 1.16 – Рекомендовані профілі різьби, для нарізання на деталях виготовлених з АКМ : 1 – метрична згідно з ГОСТом 11709–66; 2 – трикутна симетрична; 3 – трикутна несиметрична; 4 – прямокутна несиметрична; 5 – кругла симетрична; 6 – кругла несиметрична; 7 – трубна циліндрична згідно з ГОСТом 6357–52; 8 – трубна конічна, ГОСТ 6211–52; 9 – пилоподібна; 10 – трапеційдна несиметрична; 11 – упорна симетрична, ГОСТ 10177–62; 12 – упорна несиметрична [47]

Внутрішня різьба як у глухих, так і в наскрізних отворах деталей з АКМ нарізується мітчиками, виготовленими з швидкорізальної сталі, на які наносять азотоване або хромоване покриття. Конструкція має три канавки для виходу стружки. Під час виготовлення різьбових отворів у деталях з армованих композиційних матеріалів хороші результати отримали використовуючи мітчики з шаховим розміщенням ниток різьби (рисунок 1.17). У цьому разі загальна довжина

ниток, що перебувають в контактi з АКМ, скорочується на 33 %. Композит встигає «відпочити» під час паузи в процесі різання, після цього його знову ріжуть. Різьбу отримують більш чистою [47]. Для полегшення виходу стружки канавки мітчиків необхідно полірувати. Щоб виключити сильне гальмування інструменту при його закручуванні, передній кут повинен мати значення від 5 до 10°. З огляду на пружне відновлення АКМ діаметр мітчика збільшують порівняно з номіналом на 0,05 – 0,1 мм [47].

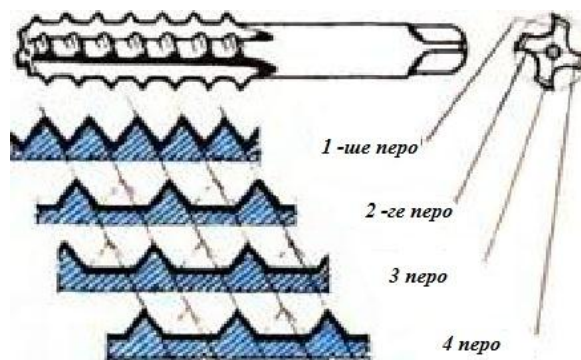


Рисунок 1.17 – Шаховий мітчик для нарізання різьби в АКМ

Усі інші способи формоутворення гвинтової поверхні в деталях з армованих композиційних матеріалів більш детально описані в праці [47].

## Висновки до розділу 1

1. З'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, класифікують за такими технологічними параметрами: рухомістю роз'ємністю, характером передавання навантаження, конструктивними особливостями, ступенем автоматизації та механізації, доступом до місця з'єднання та ознаками суцільності.

2. Більшість з'єднань деталей з АКМ виготовляють нероз'ємними або частково роз'ємними, їх використовують в основному для з'єднання каркасних конструкцій у передових галузях промисловості, де армовані композити займають одне з перших місць за застосуванням.

3. Основні типи з'єднань, використовуваних для цих матеріалів, такі як суцільні, механічні чи комбіновані, в сукупності з усіма основними ознаками створюють картину, яка дає зрозуміти, що на сучасному етапі основні зусилля

спрямовані на модернізацію даних типів з'єднань за рахунок використання нових сучасних технологічних рішень.

4. Гвинтові з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, виконують або за допомогою виготовлення різьби на поверхнях з'єднуваних деталей, або за допомогою розміщення в деталях з АКМ металевих кріпильних вставок.

5. При утворенні гвинтового з'єднання деталей з АКМ профіль, що формоутворюється на деталях, має спеціальний чи несиметричний профіль за рахунок особливостей матеріалу та для досягнення задовільних показників міцності. Ці обставини спричиняють значні труднощі, пов'язані з технологією формоутворення представленої гвинтової поверхні і, як наслідок, потребують значних фінансово-матеріальних і технологічних витрат, а отже, й додаткового часу на її виготовлення. Також неможливість якісного виготовлення спеціальних гвинтових профілів на деталях з АКМ через відсутність відповідних технологій виготовлення зумовлює використання з'єднань зі спеціальним профілем, формоутвореним на деталях з АКМ, лише для несилових конструкцій.

6. У результаті аналізу літературних джерел присвячених з'єднанням деталей виготовлених з АКМ, можна зробити висновок що основна причина, внаслідок якої гвинтові з'єднання з різьбою, формоутвореною на поверхні деталей виготовлених з АКМ, не використовуються в силових конструкціях, – це відсутність достовірної інформації про показники міцності цих з'єднань. Згідно з більшістю теоретичних даних гвинтові поверхні зі спеціальним профілем (наприклад, круглим), повинні мати непогані показники міцності, але оскільки немає технології, що забезпечувала б якісне формоутворення різьб із цим профілем експериментальне дослідження міцності даного гвинтового профілю є неможливим. Отже, розроблення нових технологій формоутворення гвинтових поверхонь зі спеціальним профілем на деталях, виготовлених з АКМ, та подальше дослідження міцності з'єднання з цим профілем – завдання актуальні та потребують вирішення.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРІЇ ФОРМОУТВОРЕННЯ РІЗАННЯМ ВНУТРІШНЬОЇ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ З КРУГЛИМ ПРОФІЛЕМ У ДЕТАЛЯХ, ВИГОТОВЛЕНИХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Перш ніж почати роботу над розробленням технології формоутворення різанням внутрішньої гвинтової поверхні з круглим профілем деталей, виготовлених з АКМ, необхідно одержати інформацію про деякі характеристики з'єднання з круглою різьбою, необхідні для подальшої роботи. Оскільки в нашому випадку внутрішня різьба буде формоутворюватися в армованому матеріалі, а зовнішню планується нарізати на металевій деталі, то перше, що потрібно зробити, – це проаналізувати властивості нашого армованого матеріалу за різних напружено-деформованих станів. Цей аналіз дасть можливість підібрати найкращу схему армування для нашого випадку та обрати матеріал для виготовлення деталі, в якій буде формоутворюватися внутрішня різьбова поверхня. Наступне, з чим потрібно розібратися, – це визначитися з технологією виготовлення армованого композита, а також провести експериментальні дослідження для отримання всіх механічних характеристик виготовленого армованого матеріалу. Останнє, що потрібно зробити для одержання всіх необхідних даних для подальшого розроблення технології формоутворення різанням запропонованої різьбової поверхні, – це розібратися з усіма особливостями механічної обробки різанням армованих композитів для їх урахування під час створення технології обробки.

#### **2.1 Властивості армованого композиційного матеріалу за різних напружено-деформованих станів**

Використання армованих композиційних матеріалів розкриває нові можливості для виготовлення машин і механізмів із високим ККД, зниженим енергоспоживанням та малою масою. Армований композиційний матеріал (АКМ) – це суцільний матеріал із двох або більше компонентів, серед яких

можна виділити армувальні елементи (волокна), що забезпечують необхідні механічні характеристики матеріалу і матрицю (в'язучий матеріал), який забезпечує спільну роботу волокон. Найпоширенішими АКМ в промисловості на сьогодні вважають матеріали, армовані вуглецевими та скляними волокнами, а як матрицю для них використовують епоксидну смолу різних модифікацій, ці матеріали одержали назви вуглепластиків та склопластиків відповідно. Наприклад, у літературних джерелах визначення терміна «вуглепластик» таке: вуглепластик – це матеріал, що має високу граничну міцність (1 000-2 600 МПа) та низький коефіцієнт тертя (в парі «вуглепластик – сталь 45» значення коливається в межах від 0,1 до 0,17 залежно від дослідних умов) за рахунок використання у своєму складі вуглецевих волокон [13].

Під час проектування будь-якого з'єднання основним є наявність достовірної інформації про механічні властивості матеріалу компонентів з'єднання. Водночас властивості армованого композиційного матеріалу залежать від багатьох факторів, серед яких характер армування, технологія виготовлення та подальше термічне оброблення. Згідно з більшістю літературних джерел переваги та високі механічні характеристики АКМ найбільш істотно реалізуються в орієнтованих матеріалах, армованих паралельними волокнами, тобто в так званих односпрямованих шарах, шляхом укладання таких шарів у різних напрямках (рис. 2.1)[1, 2, 13, 52].

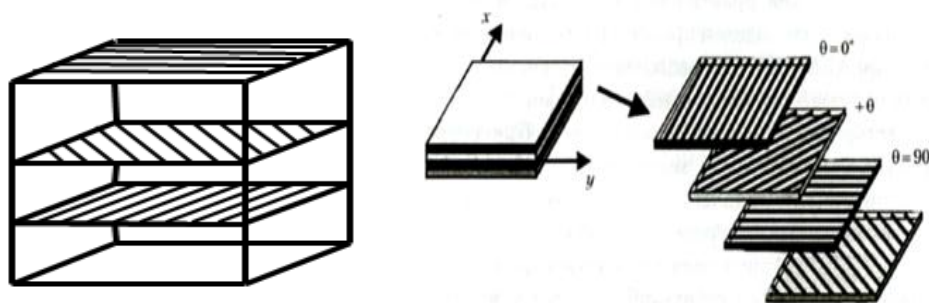


Рисунок 2.1 – Багатошаровий АКМ з односпрямованих шарів [52]

В армованому композиційному матеріалі основну частку навантаження сприймають волокна, оскільки їх гранична міцність та питома жорсткість значно вищі за деякі метали, тому в разі їх поєднання з відповідним матричним матеріалом утворюється структура, що має досить високі механічні характеристики

міцності [13]. Порівняння властивостей композиційних матеріалів із металами подані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння властивостей армованих композиційних матеріалів із конструкційними матеріалами [13]

Параметр	Склопластик	Вуглепластик	Алюміній 7050-T7451	Сталь PH138M0
Густина·10 <sup>-3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	2,1	1,5	2,82	7,76
Межа міцності, МПа:				
при розтягуванні вздовж волокон	1 250	1 130	485	1 385
при розтягуванні перпендикулярно до волокон	35	42	-	-
при стисканні вздовж волокон	600	1 130	-	-
при зсуві	68	63	-	-
Питома міцність при розтягуванні вздовж волокон·10 <sup>-3</sup> , М	83	73	172	178
Модуль пружності, ГПа:				
вздовж волокон	45	137	72	205
Перпендикулярно до волокон	12	7	-	-
Модуль зсуву, ГПа	4,5	4,2	27	80

Міцність АКМ залежить від багатьох факторів, одним з яких є напрямок прикладеної сили відносно волокон, його застосування при тривимірному навантаженні характеризується низькою міцністю при поперечному зсуві та трансверсальному обтисненні. На рисунку 2.2 подана залежність міцності склопластику (армованого у двох взаємно перпендикулярних напрямках) від напрямку прикладання зовнішньої сили.

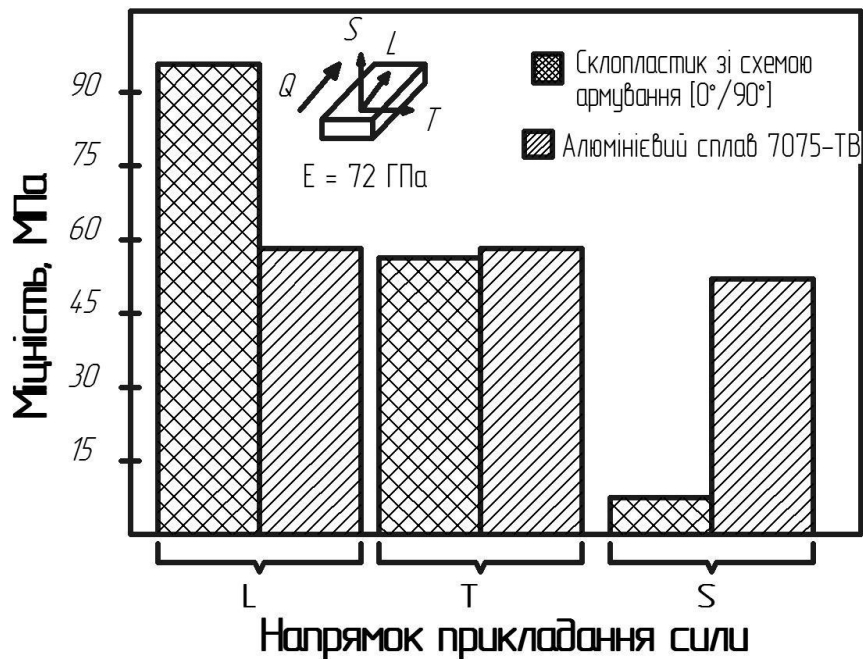


Рисунок 2.2 – Залежність міцності склопластику від напрямку прикладання сили

Згідно з графіком наведеним на рисунку 2.2, склопластик краще за металеві сплави витримує поздовжні навантаження, а при поперечних – істотно їм поступається, тому раціонально його застосовувати під час роботи на розтягування чи стискання вздовж волокон [1].

На основі проведеного аналізу було вирішено для формоутворення роз'ємного з'єднання з круглою різьбою використовувати матеріал, армований скляними волокнами, тобто склопластик. Для проведення досліджень був обраний склопластиковий армований матеріал, як матрицю використовували епоксидну смолу. Більш детально одержання властивостей матеріалу і сама технологія його отримання будуть описані в наступних підрозділах цього розділу. Під час вибору армованого матеріалу для формоутворення в ньому гвинтового з'єднання керувалися двома аспектами: великим поширенням матеріалу в промисловості а та можливістю встановлення загальних фізичних явищ під час їх оброблення. Також одним із найважливіших факторів, що акцентував вибір саме на склопластику, є майже втричі менша ціна на склотканину, ніж на вуглецеве волокно, але відпрацювання технології дозволить у подальшому провести аналогічні дослідження і для вуглепластикового армованого матеріалу.



## 2.2 Дослідні зразки, технологія виготовлення та методика випробувань

Випробування армованих композиційних матеріалів характеризуються рядом особливостей і відрізняються від металів різними типами руйнування при навантаженні в ідентичних умовах. Анізотропія і неоднорідність армованих композитів, а також практично повна відсутність пластичних деформацій за всіх можливих видів руйнування обумовлюють значні труднощі при отриманні об'єктивних характеристик навіть при одновісному навантаженні [52, 53]. Тому обґрунтування вибору зразка часто вимагає більших зусиль, ніж проектування конструктивного елемента з композита [54]. Створення однорідного поля деформацій на робочій ділянці – необхідна умова коректності проведення випробувань на розтягування і стискання.

Принцип Сен-Венана в анізотропних матеріалах порівняно з традиційними ізотропними матеріалами виявляється в різкому розширенні зон крайового ефекту, що вимагає збільшення довжини зразка. Довжина робочої частини зразків при стисканні обмежується можливістю втрати їх стійкості [54].

У нашому випадку при виготовленні дослідних зразків для визначення фізико-механічних властивостей армованого склопластикового матеріалу використовували матрицю та волокно з такими параметрами: склопластикову тканину марки T13-70 з розмірами решітки (0,5x0,5 мм) товщина тканини 0,2 мм згідно з ISO1886–90 [55] (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики склотканини марки T20-270 [55]

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

Як матрицю використовували епоксидну смолу EPOXY-520 ISO 6272-2:2011 [56], виготовлену Чеською компанією *Spolchemie*. Основні фізико-механічні характеристики наповнювача наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні фізико-механічні характеристики епоксидної смоли EPOXY-520 [57]

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

Ці компоненти використовували і для виготовлення пластини, в якій відбувалося формоутворення гвинтової поверхні круглої різьби (більш детально - в підрозділі 4.1).

Умови формування дослідних зразків приведені у відповідності до методики ASTM D 790 – 17 [58], ASTM D 3039/D [59] та ASTM D 6641/D [60].

Для визначення механічних характеристик склопластику при розтягуванні й стисканні використовували плоскі зразки у вигляді вирізаних із багат шарових пластин смужок шириною 15-17 мм, армованих в двох взаємно перпендикулярних напрямках (схема укладки  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{12}$ ) згідно з ASTM D 3039/D [59]. Пластини виготовляли методом ручної укладки з однонапрямлених шарів склотканини. Для зв'язку армуючих елементів в єдине ціле застосовували модифіковану епоксидну смолу, яку змішували з отверджувачем у масовій пропорції 100:33. Смола та волокно були зважені на електронних вагах з абсолютною похибкою  $\pm 0,1$  г. Загальна товщина пластини становила 12 шарів із масовою часткою волокнистого наповнювача не менше ніж 60 %. Для видалення надлишків епоксидної смоли було застосоване пресування під тиском із використанням модифікованої універсальної розривної машини УМЕ-10ТМ, сила дії становила 30 кН (рис. 2.3).

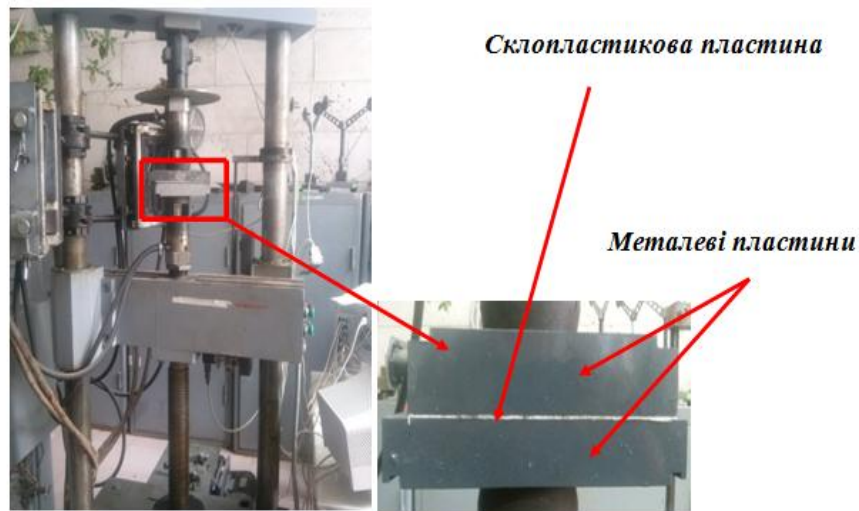


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд установки для виготовлення дослідних зразків

Дослідні зразки виготовляли за запропонованою технологією, оскільки експериментально було встановлено, що склопластикові зразки, виготовлені за цією технологією, мають межу міцності при розтягуванні майже вдвічі більшу, ніж зразки, виготовлені без прикладання зовнішньої сили при формуванні. Два зразки з однаковою кількістю шарів були отримані за різними технологіями: перший – без прикладання зовнішньої сили, його розміри становили 150-16-2 мм, другий – розміром 150-16-1 мм, кількість шарів склопластикової тканини однакова - 12 шарів. Товщина різна за рахунок видалення надлишків матриці під дією зовнішнього навантаження. Провівши дослідження представлених зразків на розтягування та одержавши значення межі міцності при розтягуванні для кожного з них (для першого  $\sigma_{B1} = 116$  МПа, для другого  $\sigma_{B2} = 203$  МПа), було вирішено всі подальші дослідні зразки виготовляти за вищенаведеною технологією під тиском.

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, в результаті формування за запропонованою технологією під зовнішнім тиском її товщина становила 16 мм.

Дослідження міцності зразків при розтягуванні здійснювали з використанням спеціально розроблених фіксаторів, закріплюваних гвинтами (рис. 2.4). Фото зразків

для випробувань на розтягування наведені на рисунку 2.5. Запобігти руйнуванню зразків від локальних контактних напружень у місцях їх закріплення вдалося за допомогою приклеєних накладок. Довжину накладок вибирали з умови забезпечення міцності на зсув клейового з'єднання [61].



Рисунок 2.4 – Фото фіксаторів із закріпленим у них склопластиковим зразком



Рисунок 2.5 – Фото склопластикового зразка

На рисунку 2.6 подано фото дослідження склопластикового зразка на міцність при розтягуванні. Зразок закріплений у фіксаторах та встановлений на модифікованій універсальній розривній машині УМЕ-10ТМ.

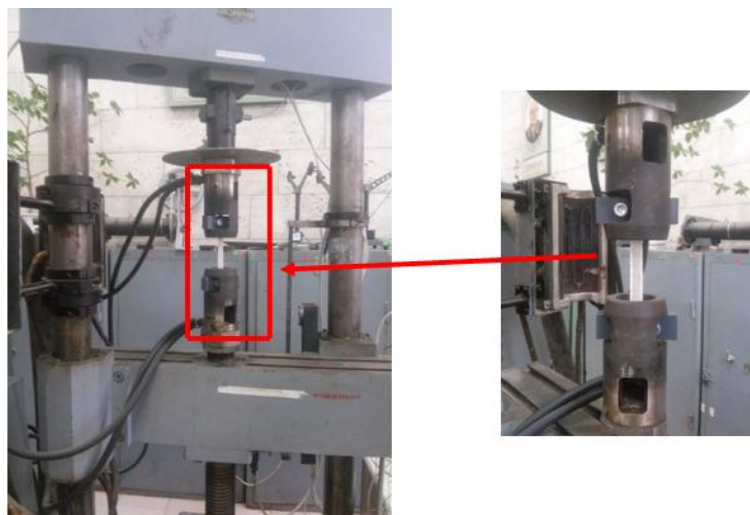


Рисунок 2.6 – Дослідна установка на базі УМЕ-10ТМ в зборі для дослідження склопластикового зразка на розтягування

Для дослідження на розтягування були виготовлені п'ять зразків за запропонованою раніше технологією, розміри яких занесені до таблиці 2.4. Межі міцності матеріалу під час дослідження його на розтягування наведені в таблиці 2.5.

Дослідження склопластикових зразків на стискання також проводили на модифікованій універсальній розривній машині УМЕ-10ТМ. Для цього були додатково виготовлені за запропонованою технологією п'ять зразків, розміри яких зведені в таблиці 2.4. Дослідження проводили згідно з ASTM D 6641/D. На рисунку 2.7 подано фото зразка ,закріпленого в спеціальному пристрої на дослідній машині. У таблиці 2.5 наведені одержані параметри міцності представлених зразків.

Таблиця 2.4– Розміри дослідних зразків для дослідження їх на розтягування і стискання

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

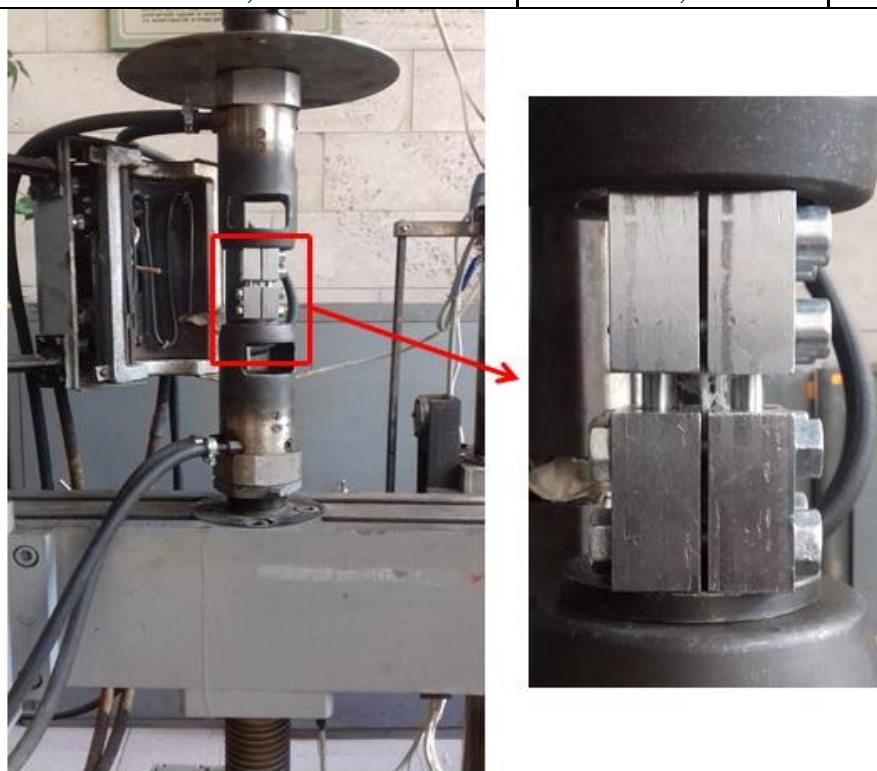


Рисунок 2.7 – Фото зразка, закріпленого в спеціальному пристрої на дослідній машині під час дослідження на стискання

Таблиця 2.5 – Параметри міцності представлених зразків

Зразок	Граничне навантаження $F_B$ , кН	Гранична міцність $\sigma_B$ , МПа	Вид руйнування згідно з ASTM D 3039/D	Вид руйнування згідно з ASTM D 6641/D
1 <sub>роз.</sub>	3,45	198,1	AGM	-
2 <sub>роз.</sub>	3,07	168,6	LAT	-
3 <sub>роз.</sub>	3,45	198,1	LAT	-
4 <sub>роз.</sub>	3,45	192,5	LAT	-
5 <sub>роз.</sub>	3,81	205,7	LAT	-
1 <sub>ст.</sub>	2,34	70,3	-	НАТ
2 <sub>ст.</sub>	2,92	80,9	-	НАТ
3 <sub>ст.</sub>	2,46	75,2	-	НАТ
4 <sub>ст.</sub>	2,87	79,5	-	НАТ
5 <sub>ст.</sub>	2,94	98,3	-	НАТ

НАТ – поперечний у робочій зоні зверху; AGM – під кутом у робочій зоні посередині; LAT – прямий збоку біля прихвату

Для одержання пружних характеристик армованого склопластикового матеріалу була використана методика згідно з ASTM D 3039/D [59], на основі якої експериментально визначені модуль пружності та коефіцієнт Пуассона при розтягуванні. Для визначення зазначених характеристик використовували плоскі зразки у вигляді вирізаних із багатошарових пластин смужок шириною 15-17 мм, армованих у двох взаємно перпендикулярних напрямках (схема укладки  $[0^\circ/90^\circ]_{12}$ ). Кількість зразків – 10 штук. Основні розміри представлених зразків наведені в таблиці 2.6.

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

Для вимірювання деформацій використовували тензорезистори КФ4П1-3-200 з базою 10 мм. Середнє значення коефіцієнта тензочутливості  $K = 2,0 \cdot 10^{-6}$ . Наклеювання тензорезисторів відбувалося відповідно до інструкції з наклеювання АЖВ2.782.001 ТО. Для вимірювання вихідних сигналів тензорезисторів та подання звітів у цифровому вигляді використовували вимірювальну тензометричну систему СПТ – 3. Фото розміщення тензорезисторів на дослідному зразку подано на рисунку 2.8.

Таблиця 2.6 – Розміри дослідних зразків для отримання пружних характеристик армованого склопластикового матеріалу

Зразок	Відстань між опорами $l$ , мм	Ширина $b$ , мм	Товщина $h$ , мм
1	150	15,25	1,15
2	150	16,64	1,14
3	150	16,66	1,15
4	150	16,91	1,20
5	150	15,13	1,16
6	150	15,47	1,16
7	150	16,47	1,16
8	150	16,25	1,13
9	150	15,78	1,14
10	150	15,82	1,13

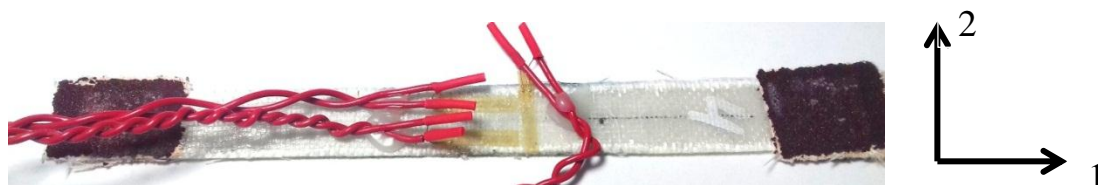


Рисунок 2.8 – Фото дослідного зразка з наклеєними на ньому тензорезисторами

Дослідна установка на базі розривної машини моделі 2007 Р-0,5 із використанням системи тензометричної СПТ-3 для визначення пружних характеристик склопластику при розтягуванні наведена на рисунку 2.9

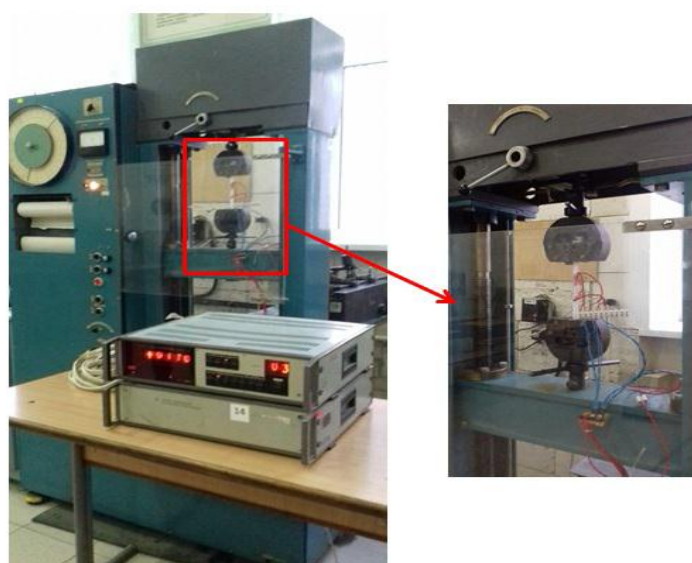


Рисунок 2.9 – Дослідна установка для визначення пружних характеристик склопластику при розтягуванні

Одержані в результаті експерименту модулі пружності та коефіцієнти Пуассона для кожного із зразків занесені до таблиці 2.7, а всі експериментальні дані та подальші розрахунки, виконані в табличному процесорі MS-Excel для роботи з електронними таблицями, наведені в додатку А.

Таблиця 2.7 – Одержані в результаті експерименту модулі пружності та коефіцієнти Пуассона для кожного з дослідних зразків

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ср. зн.
$E_1$ , ГПа	11,87	12,39	13,29	13,97	12,39	12,47	12,71	12,67	12,41	12,47	12,67
$\nu_{12}$	0,13	0,12	0,14	0,10	0,13	0,14	0,18	0,19	0,12	0,13	0,13

Одержані в результаті експериментів пружні та механічні характеристики склопластикового армованого матеріалу будуть у подальшому використовуватися під час моделювання напружено-деформованого стану з'єднання методом скінченно-елементного аналізу для створення моделі матеріалу в системі LS-DYNA.

### **2.3 Технологія формоутворення різанням внутрішньої поверхні різьбового з'єднання з круглою різьбою в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів**

Одержавши всі фізико-механічні характеристики армованого склопластикового матеріалу за рахунок проведення відповідного комплексу експериментів (пункт 2.2) та виготовивши склопластикову пластину для нарізання в ній різьби, основне завдання, що залишається вирішити, – це розроблення відповідної технології формоутворення різьбової поверхні. Раніше в роботі зазначалося, що виготовляти в даному матеріалі було вирішено різьбове з'єднання з круглою різьбою, оскільки згідно з прийнятою на початку гіпотезою показники міцності цього з'єднання повинні бути максимально високими і наближатися до показників аналогічного з'єднання з метричною різьбою, виконаного в металі. Така конфігурація гвинтового з'єднання в АКМ була обрана у зв'язку з тим, що подібна геометрія гвинтового профілю дозволить уникнути поганих показників міцності та



не допустити виникнення гострих концентраторів напружень у профілі з'єднання [62].

Круглу різьбу, для нарізання її в склопластику запропоновано використовувати тому, що вона краще з усіх типів різьб працює на зріз та характеризується досить великою стійкістю і підвищеним опором динамічним навантаженням за рахунок відсутності гострих концентраторів напружень [63]. Профіль цієї різьби наведений на рисунку 2.10, основні параметри якої: крок  $p$ , глибина профілю  $t$ , зовнішній  $D$ , внутрішній  $D_1$  діаметри та  $r_1$  і  $r_2$  – радіуси вершин і западин профілю, відповідно.

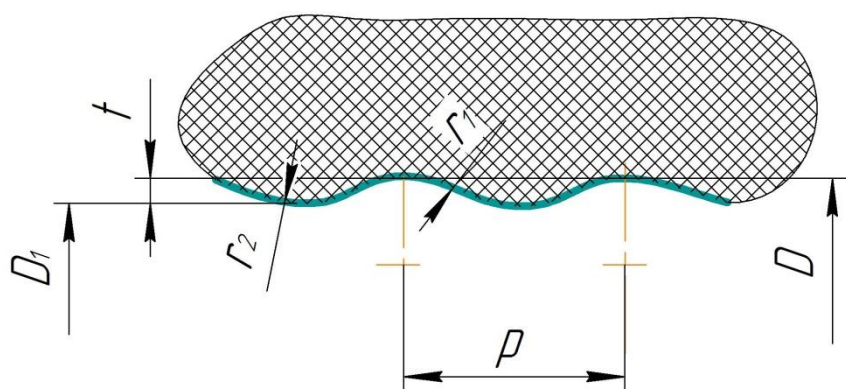


Рисунок 2.10 – Основні параметри круглої внутрішньої різьби

Існують такі способи отримання гвинтової поверхні в деталях з армованого композиційного матеріалу: формоутворення різанням, пресуванням, заливанням компаунда, формуванням профілю, отриманням профілю при відцентровому формуванні та ін.

Для армованих матеріалів нарізання різьби механічним обробленням є переважачим способом формоутворення різьбової поверхні, що забезпечує необхідну точність різьби. Проте не можна не враховувати того факту, що міцність з'єднання, яка залежить як від фізико-механічних властивостей матеріалів з'єднаних деталей, так і від методу отримання різьби, буде нижчою, ніж при формоутворенні різанням через руйнування армувальних шарів склопластикового матеріалу та порушення цілісності його армованої структури в місці утворення різьбової поверхні. Все ж таки метод формоутворення різьби різанням набуває широкого використання для армованих композиційних матеріалів і має свої

особливості під час оброблення цих матеріалів, урахувавши які, можна отримати досить точну та якісну різьбову поверхню [64]. На основі зазначених тверджень і було вирішено отримати різьбову поверхню способом механічної обробки.

У нашому випадку 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, а він також формоутворює гвинтову поверхню за один прохід [65]. Армовані композити, в нашому випадку склопластик, як відомо, краще обробляти гостро заточеним різцем. Перевагою цього методу є також те, що оброблення гвинтової поверхні відбувається за один прохід, що зменшує час оброблення, а отже, й час контакту різальної кромки з АКМ також зменшується, що позитивно впливає на сам процес різання і не допускає миттєвого зростання температур та зношення різальної кромки [66].

Механічна обробка композиційних матеріалів значно відрізняється від обробки металів [67]. Армовані композиційні матеріали також різняться між собою за своїми властивостями та обробляються з урахуванням індивідуальних особливостей. Відмінності властивостей, що впливають на оброблюваність матеріалу, всередині групи композитів більш значні, ніж наприклад, серед металів. Це становить певні труднощі під час виконання оброблення армованого композиційного матеріалу. Найчастіше початок виготовлення виробів із цих матеріалів вимагає повного переосмислення традиційних методів оброблення, переліку використовуваного інструменту, способу закріплення заготовки, а в деяких випадках – навіть застосування спеціалізованого обладнання та оснащення [67].

У процесі механічної обробки різанням АКМ різальна кромка спричиняє відшаровування волокон, тому під час різання АКМ вона повинна бути максимально гострою, щоб запобігти виникненню тертя між інструментом та заготовкою. Для прикладу на рисунку 2.11 показане свердло від компанії Sandvik, геометрія заточування якого згідно з даними, зазначеними виробником, 85 PT, а сплав – CD10. Використання цього свердла в сукупності з усіма зазначеними ознаками дозволяє досягати високої якості під час оброблення отворів [69].



Рисунок 2.11 – Свердло від компанії Sandvik для оброблення АКМ [69]

Для якісного та довготривалого оброблення армованих композиційних матеріалів ймовірність зношення інструменту повинна бути мінімальною, оскільки будь-які зміни геометричної форми різальної кромки призведуть до миттєвого зростання температур у зоні різання і критичного зношення кромки. Геометрію інструменту потрібно підбирати так, щоб забезпечити легке ненавантажене різання з виникненням мінімальних сил різання [70]. Геометричні параметри різального інструменту, рекомендовані для оброблення армованих композиційних матеріалів, мають такі межі варіювання: передній кут  $\gamma = 20-30^\circ$ , задній кут:  $\alpha = 10-15^\circ$ , кут загострення  $\beta = 30-60^\circ$  [70].

Оброблення різанням армованого склопластикового матеріалу має ряд особливостей, що зводяться до такого.

1 Яскраво виражена анізотропія властивостей. Вона визначає відмінність процесу різання під час оброблення вздовж і поперек армуючих волокон. Схема армування істотно впливає на якість і продуктивність оброблення, тому під час розроблення технологічної операції механічного оброблення композиційних матеріалів необхідно враховувати також напрям оброблення відносно напрямку армування.

2 Складність одержання високої якості поверхневого шару. Шарувата структура призводить до того, що при зношуванні інструменту відбувається розшарування матеріалу. Крім того, уразі перерізання армуючих волокон, особливо при перехресному армуванні, спостерігається розкуйовдження перерізаних волокон, що призводить до погіршення якості поверхневого шару, тому іноді застосовують додаткову обробку операцію, наприклад зачищення.

3 Низька теплопровідність матеріалів, що обумовлює погане відведення теплоти із зони різання в стружку та оброблювану деталь. Тому під час оброблення високоміцних композиційних матеріалів основна частина теплоти відводиться через

різальний інструмент. Згідно з експериментальними даними тепловий баланс під час оброблення полімерних матеріалів такий: в інструмент – 90 %, в стружку – 5 %, в оброблювану деталь – 5 %, тоді як під час оброблення металів іноді до 90 % теплоти відноситься стружкою і лише 10 % поглинається деталлю та інструментом [70].

4 Інтенсивна дія скловолокна, що має високу твердість і абразивну здатність.

5 Високі пружні властивості. Сили різання під час оброблення композитів у 10-20 разів нижчі, ніж при обробленні металів, а пружні характеристики вищі, тому точність оброблення меншою мірою визначається пружними деформаціями системи: верстат – оснащення – інструмент.

6 Неможливість застосування мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Це обумовлюється тим, що більшість армованих композиційних матеріалів досить сильно поглинає вологу. Тому застосування МОР у багатьох випадках призводить до введення додаткової операції – сушіння виробу або взагалі до безповоротної зміни фізико-механічних властивостей матеріалу.

7 Специфічні вимоги техніки безпеки під час різання композиційного матеріалу. Це пов'язано з виділенням найдрібніших частинок матеріалу під час різання.

Дуже важливу роль у забезпеченні високих експлуатаційних показників виробів з армованих композитів відіграє стан поверхневого шару виробу. Він істотно впливає на міцність, зношення, діелектричні показники, водопоглинання та ін. Механічне оброблення істотно змінює властивості поверхневого шару (а саме шорсткість поверхневого шару), що впливає як на водопоглинання та показники міцності, так і на зносостійкість. Розріз армуючих волокон призводить до зниження міцності виробів на 20 %.

Механічне оброблення виробів з армованих композиційних матеріалів інтенсифікує процес водопоглинання. Це відбувається за рахунок того, що під час оброблення, по-перше, знімається завжди наявний на поверхні шар полімеризованої матриці, що є ніби захисним шаром; по-друге, перерізаються армуючі волокна наповнювача; водночас утворюються мікротріщини та інші дефекти матеріалу, що порушують його міцність [71]. Згідно з вищезазначеним механічне оброблення армованих композиційних матеріалів – досить складний та високотехнологічний

процес, що потребує значних матеріальних і наукових витрат, та врахування всіх перелічених особливостей для оброблення, щоб досягти необхідного результату.

Для нарізання круглої різьби в армованому склопластиковому матеріалі за запропонованою технологією [65] був виготовлений однозубий інструмент, що має гострий кут заточування. На початку проведення експериментального освоєння цієї технології оброблення, як інструментальний матеріал була використана швидкорізальна сталь Р6М5, вибір цього інструментального матеріалу був зумовлений частим використанням його в промисловості та невисокою ціною. Але після формоутворення перших різьбових поверхонь було виявлено, що вже після нарізання різьби в першому отворі інструмент почав значно зношуватися і потребував подальшого заточування. Саме через причини швидкого зношення для подальших експериментів було вирішено застосовувати як інструментальний матеріал твердий сплав.

Однозубий інструмент був виготовлений з особливо малозернистого твердого сплаву К55SF (виробник – фірма Guhring, Німеччина). Основні властивості цього інструментального матеріалу, зазначені виробником, наведені в таблиці 2.8. Інструмент виготовляли методом ручного заточування із твердосплавного циліндра діаметром 6 мм довжиною 35 мм. На рисунку 2.12 наведений ескіз виготовленого однозубого інструмента із зазначеними основними геометричними параметрами, призначеними згідно з вищенаведеними рекомендаціями.

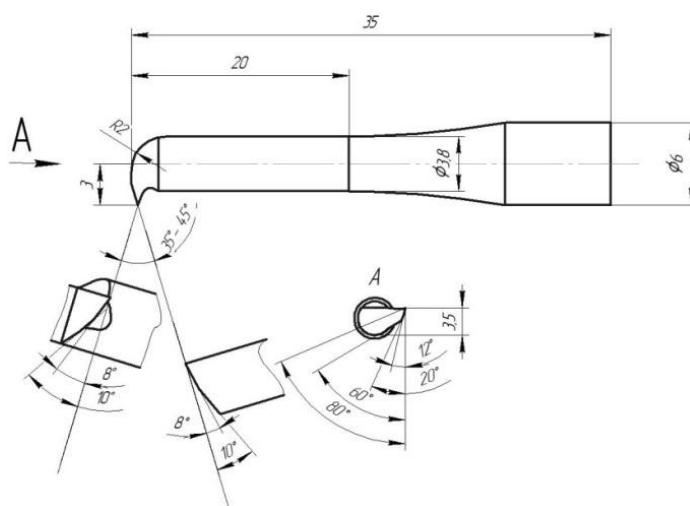


Рисунок 2.12 – Ескіз виготовленого однозубого інструмента

Таблиця 2.8 – Основні властивості інструментального матеріалу однозубого інструменту [72]

Марка сплаву	Вміст кобальту Co, %	Розмір зерна, мкм	Твердість, HV	Класифікація ISO [ISO 513]
К 55 SF	9	0,2-0,5	1 920	K10-K30

На рисунку 2.13 а зображене фото однозубого інструмента, що кріпиться в спеціальній втулці, а на рисунку 2.13 б – 3D-модель інструмента, виконана в середовищі SOLIDWORKS.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Однозубий інструмент для оброблення круглої різьби:

- а) фото однозубого інструмента, що кріпиться в спеціальній втулці;
- б) 3D-модель інструмента, виконана в середовищі SOLIDWORKS

Для виконання формоутворення гвинтової поверхні наведеним методом [65] його необхідно було адаптувати конкретно для нашого випадку. Для цього додатково в систему оброблення потрібно ввести розточувальний пристрій, що допоможе реалізувати процес нарізання різьби в армованому склопластиковому матеріалі за запропонованою технологією. Цей розточувальний пристрій зображений на рисунку 2.14.

Після одержання всіх елементів системи різання для проведення процесу формоутворення різанням круглої різьби та визначення всіх конструктивних параметрів для оброблення, було успішно виготовлено круглу різьбу в армованій склопластиковій пластині за запропонованою технологією.

Схема оброблення круглої різьби однозубим інструментом у склопластиковому армованому матеріалі подана на рисунку 2.14 а. Згідно цієї схемою армований матеріал обробляється однозубим інструментом, закріпленим у розточувальному пристрої, який кріпиться в цанговій оправці фрезерного верстата з

ЧПК моделі 6P13Ф3. На рисунку 2.14 б наведене фото процесу фрезерування, на якому також показані всі елементи системи різання.

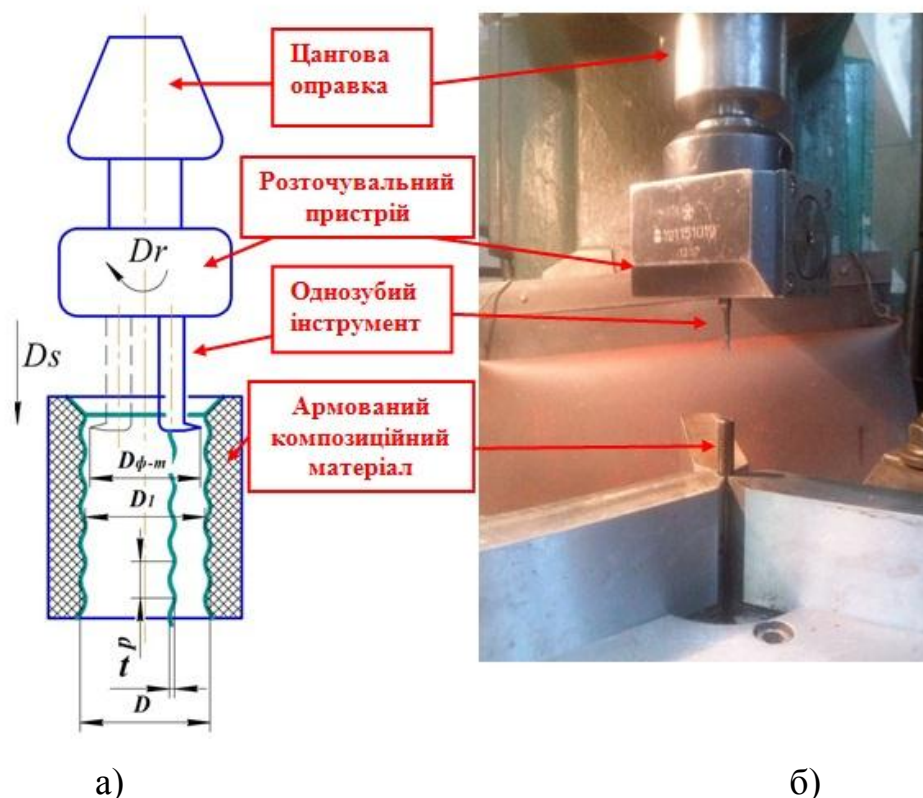


Рисунок 2.14 – Оброблення круглої різьби в АКМ: а) спрощена схема оброблення; б) фото процесу оброблення

Реалізація процесу формоутворення круглої гвинтової поверхні методом огинання [65] відбувалася на фрезерному верстаті з ЧПК моделі 6P13Ф3, для якого була написана спеціальна керуюча програма на оброблення круглої різьби. Режими різання були такими: частота обертання шпинделя  $n = 2\ 000$  об/хв; подача  $S_o = 0,1$  мм/об. Ці режими різання рекомендовані виробником інструментального матеріалу під час оброблення ним армованих композиційних матеріалів.

Спрощена кінематика процесу оброблення різьби в АКМ така: різальному інструменту надають прямолінійного руху вздовж осі заготовки, за різальний інструмент використовують однозубий інструмент із гострим кутом заточування (рис. 2.12), а діаметр траєкторії формотворної точки  $d_{\phi-m}$ , що дорівнює сумі внутрішнього діаметра  $D_I$  різьби та глибини профілю різьби  $t$  (рис. 2.10), встановлюють за рахунок розточувального пристрою (рис. 2.14), водночас

інструменту надають обертання відносно власної осі і додатково – колового руху навколо осі заготовки, узгодженого з його прямолінійним рухом таким чином, що за один коловий рух інструменту надають прямолінійний рух уздовж осі заготовки, величина якого дорівнює кроку  $p$  різьби, причому діаметр колового руху дорівнює глибині профілю різьби  $t$ , крім того, вісь заготовки розміщують паралельно осі обертання інструменту [66].

Величина діаметра траєкторії формотворної точки  $d_{\phi-m}$ , (рис. 2.14 а) для оброблення круглої різьби визначається за формулою 2.1:

$$d_{\phi-m} = D_1 - t, \quad (2.1)$$

де  $D_1$  – внутрішній діаметр різьби, мм;  
 $t$  – глибина профілю різьби, мм.

Обробляють круглу різьбу з однієї установки заготовки, внутрішній діаметр можна не виконувати, фаску також не потрібно виконувати. Для цього способу необов'язковим є також виконання канавки для виходу однозубого інструменту.

Для перевірки на практиці запропонованої технології формоутворення різанням гвинтової поверхні в деталях з АКМ було виконано декілька пробних експериментів. Виготовляли круглу різьбу з основними параметрами  $p = 4$  мм, і  $t = 1$  мм, цю різьбу нарізували на діаметрі 5 мм згідно з вищеописаною технологією. Експерименти дозволили встановити можливість виготовлення зазначеної різьби за цією технологією для проведення подальших розрахунків.

## Висновки до розділу 2

1 Проведений аналіз групи армованих композиційних матеріалів за різних напружено-деформованих станів дозволив обрати для формоутворення різанням гвинтової поверхні в ньому склопластиковий армований матеріал. Для його виготовлення використовували склотканину марки Т20–270 з розмірами решітки (0,5x0,5мм), товщина тканини 0,2 мм, згідно з ISO 1886-90 [55], армовану у двох взаємно перпендикулярних напрямках (схема укладання шарів склотканини  $[0^\circ/90^\circ]_{200}$ ), та епоксидну смолу EPOXY-520 (ISO 6272-2:2011) [56], виготовлену



Чеською компанією *Spolchemie*. Додатково для видалення надлишків епоксидної смоли до заготовки була прикладена зовнішня сила для одержання кращих показників міцності матеріалу.

2 Одержані механічні характеристики міцності запропонованого армованого матеріалу за рахунок виконання експериментальних досліджень зразків на розтягування та стискання згідно методик описаних в ASTM D 3039/D [59], ASTM D 6641/D [60].

3 Реалізована технологія формоутворення круглої внутрішньої різьби методом огинання з врахуванням усіх особливостей механічного оброблення армованих композитів та виготовленням однозубого інструмента з особливо малозернистого твердого сплаву K55SF методом ручного заточування з циліндра діаметром 6 мм.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗ'ЄМНОГО З'ЄДНАННЯ З КРУГЛОЮ РІЗЬБОЮ В ДЕТАЛЯХ, ВИГОТОВЛЕНИХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сучасні методи дослідження напружено-деформованого стану (НДС) з'єднань деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, для кожного окремого типу з'єднань різні. В основному класичні теорії дослідження розроблені для основних типів з'єднань, таких як клейові, заклепкові, болтові. Принцип цих теорій зводиться до числових методів розрахунку або моделювання за рахунок скінченно-елементного аналізу. У розділі описані методи дослідження НДС для клейового, болтового та заклепкового з'єднань деталей з АКМ. У нашому випадку для розрахунку НДС роз'ємного з'єднання запропоновано використовувати скінченно-елементний аналіз з інтегруванням у часі явним методом із використанням програмних продуктів LS-DYNA компанії LSTC.

#### **3.1 Методи дослідження напружено-деформованого стану з'єднань з армованих композиційних матеріалів**

На сьогодні основними методами розрахунку напружено-деформованого стану під час проектування, створення та відпрацювання конструктивних елементів з'єднань із застосуванням композиційних матеріалів є числові методи, що дозволяють одержати необхідну інформацію за мінімальних обмежень на геометричні та механічні параметри з'єднання [73].

Згідно з цими методами на першому етапі дослідження проводять вибір моделі суцільного середовища або моделей суцільних середовищ – складових частин з'єднання. Водночас необхідною умовою є можливість експериментального визначення необхідних параметрів, а вже потім проводять безпосередню математичну формалізацію поставленого завдання.

На наступному етапі поставлене завдання зводиться тим чи іншим способом до алгебраїчної задачі, розв'язання якої можливе за допомогою засобів обчислювальної техніки. Під час цього етапу аналізують точність апроксимації диференційованих рівнянь скінченними алгебраїчними, перевіряють стійкість розрахункової схеми, її розв'язність і цілісність, оцінюють збіжність та ефективність обраного числового методу розв'язання [74].

Далі переходять до програмування й розрахунку. На сучасному етапі банк різних програм механіки розрахунку досить великий, тому при складанні програми для вирішення якогось конкретного завдання можна використовувати досить добре апробовані методики розрахункового аналізу. Завершальний етап з оцінювання одержаних результатів необхідно проводити шляхом порівняння їх із даними спеціального перевірного експерименту.

Числові методи розрахунку за внутрішньою структурою набули великого поширення на практиці, Ці методи характеризуються тим, що при їх застосуванні зазвичай відбувається перетворення масивів вихідних величин в матриці систем рівнянь великого порядку, що вимагають спеціальних машинних способів записування, зберігання та розрахунку. Ці методи вимагають значних обсягів машинної пам'яті, але досить економічні за кількістю виконуваних комп'ютером операцій.

**Метод скінченних різниць.** Для чисельного розв'язування диференціального рівняння (систем рівнянь) необхідно замінити похідні скінченними різницями. При цьому диференціальне рівняння (система рівнянь) зводиться до системи алгебраїчних, розв'язання яких і виконує комп'ютер. Для ілюстрації суті МСР розглянемо безперервну функцію  $U_{(x)}$ , графік якої наведений на рисунку 3.1.

Розділимо вісь абсцис на кінцеві інтервали довжини  $\Delta x$ . У трьох довільних сусідніх точках  $x_{n-1}$ ,  $x_n$  і  $x_{n+1}$  функція  $U_{(x)}$  буде відповідно набувати значень  $U_{n-1}$ ,  $U_n$ ,  $U_{n+1}$ , значення  $U_{n+1}$  і  $U_{n-1}$  можна виразити через  $x_{n-1}$  і  $x_{n+1}$  за допомогою такого ряду:

$$U_{n+1} = U_n + \left( \frac{dU}{dx} \right)_n \Delta x + \left( \frac{d^2U}{dx^2} \right)_n \cdot \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots, \quad (3.1)$$

$$U_{n+1} = U_n - \left( \frac{dU}{dx} \right)_n \Delta x + \left( \frac{d^2U}{dx^2} \right)_n \cdot \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots, \quad (3.2)$$

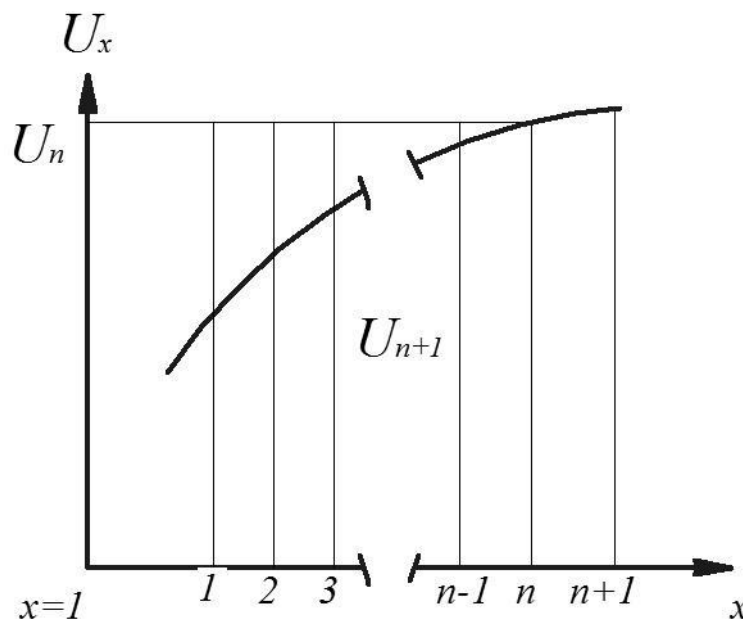


Рисунок 3.1 – Скінченно-різницева сітка подання функції

Для апроксимації скінченно-різницевої форми першою похідною другого порядку необхідно відняти (3.2) від (3.1), у результаті одержуємо:

$$\left( \frac{dU}{dx} \right)_n = \frac{U_{n+1} - U_{n-1}}{2\Delta x} \quad (3.3)$$

Цей вираз називається центральною різницею. Помилка апроксимації у цьому разі має другий порядок. Для одержання скінченно-різницевого аналога другою похідною необхідно додати (3.2) і (3.1) та виразити другу похідну, тоді одержуємо:

$$\left( \frac{d^2U}{dx^2} \right)_n = (U_{n+1} - 2U_n + U_{n-1}) / (\Delta x)^2. \quad (3.4)$$

Наведене рівняння також має другий порядок апроксимації. Для розв'язання скінченно-різницевих рівнянь розроблений ряд методів. Найбільш поширеними є різні варіанти методу прогону [73, 74]. У праці М. І. Сьоміна метод ортогонального прогону використаний для вирішення завдання про розподіл напружень у стрижневому клейовому з'єднанні зі змінною товщиною елементів при статичному навантаженні [75]. Скінченно-різницевий метод розв'язання

застосовують під час аналізу динамічного навантаження тришарового металополімерного з'єднання. Коректність одержаних результатів у разі статичного навантаження перевіряють методом фотопружності, а в разі динамічного навантаження – за характеристиками розсіювання енергії в з'єднанні [75].

**Метод скінченно-елементного аналізу.** На сьогодні основним методом моделювання елементів з'єднань та оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) армованих композиційних матеріалів є метод скінченно-елементного аналізу (МСЕ) [76].

Алгоритм МСЕ дозволяє проводити дослідження НДС конструкцій за найбільш загальних граничних умов та зовнішніх навантажень. Метод має достатню універсальність і високу точність, дозволяє аналізувати складні за конфігурацією конструкції, їх окремі вузли чи з'єднання, характеризується великою гнучкістю в поданні складних задач із багатьма зв'язками та складними граничними умовами за загальних умов навантаження.

Численні дослідження застосування МСЕ для вирішення завдань механіки суцільних середовищ та оцінювання НДС в зоні механічних з'єднань плоских елементів конструкцій з армованих композиційних матеріалів (АКМ) показали, що МСЕ має цілий ряд важливих методологічних та алгоритмічних переваг:

- варіаційне формулювання при МСЕ не накладає жорстких обмежень на вибір базисних функцій;
- матриця системи дозвільних рівнянь симетрична, має позитивне значення, структуру стрічкового типу, а кількість нульових елементів може бути визначена заздалегідь;
- МСЕ дозволяє точніше, ніж усі інші числові методи, апроксимувати граничні умови, причому однаково легко враховуються як кінематичні, так і статичні граничні умови;
- побудова дискретної системи за МСЕ вимагає виконання простих та одноманітних дій, матричне формулювання яких зручне для комп'ютерної реалізації;

– при використанні МСЕ досить просто виявляють грубі помилки внаслідок чіткої механічної інтерпретації завдання;

– МСЕ дозволяє вільно розміщувати вузлові точки (що приводить до їх економії), а також зробити скінченно-елементну сітку менших розмірів в місцях великих градієнтів шуканих функцій.

Із математичної точки зору МСЕ є узагальненням методу Релея-Рітца-Галеркіна, що забезпечує мінімізацію функціонала потенціальної енергії шляхом визначення лінійної комбінації пробних функцій:

$$\varphi = \sum_1^N a_i \cdot \varphi_i, \quad (3.5)$$

де  $a_i$  – коефіцієнти, що обчислюються із системи  $N$  алгебраїчних рівнянь.

Основна проблема при використанні МСЕ пов'язана з вибором пробних функцій  $\varphi_i$ , які повинні гарантувати простоту і достатню точність обчислень. Особливість МСЕ полягає в тому, що ці функції беруть частково-поліноміальними і зазвичай відмінними від нуля лише в межах скінченного елемента, а коефіцієнти  $a_i$  мають певний фізичний зміст.

Так, для криволінійних оболонок (задіяних у з'єднаннях) у разі двох незалежних змінних розроблений цілий ряд скінченних елементів, побудованих на основі теорії пологих оболонок. Поверхня оболонки описується набором параметричних рівнянь:

$$x = x_i(\theta_1, \theta_2), i = 1, 2, 3, \quad (3.6)$$

де  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ ,  $\theta_1, \theta_2$  – незалежні змінні в рівнянні оболонки [77, 78, 74], що визначаються через похідні  $x$ , які входять як змінні коефіцієнти до диференціальних рівнянь.

На сьогодні у МСЕ для апроксимації некриволінійних оболонок останні подаються набором плоских частин, кожна з яких (зокрема, плоска пластина) є простим елементом оболонки. Деформації вигину і розтягування враховують при складанні простих елементів. При такому моделюванні довільної оболонки

необхідно проводити аналіз збіжності розв'язків для оригінальної та криволінійної оболонок.

У загальному випадку на елементи оболонки діють згинальні й мембранні силові чинники, що спричиняють у плоских елементах незалежні деформації за умови їх мінімізації.

Оболонки та їх з'єднання містять (разом із двовимірними) й одновимірні елементи – стрижневі (заклепки, болти та ін.). Тому при апроксимації досліджуваної області реальної конструкції скінченними елементами необхідно також розглядати й стрижневі елементи, які в загальному випадку можуть працювати на розтягування-стискання, кручення та згин.

З'єднувальні пластини (прості оболонки) розбиваються зазвичай на сітки плоских трикутних і чотирикутних скінченних елементів, побудованих на основі лінійної теорії вигину пластин. Функції їх форми дозволяють урахувати як мембранні деформації, так і деформації вигину. В зоні елементів механічного кріплення згущується сітка плоских елементів.

Кріпильні елементи в типових з'єднаннях при навантаженні в площині з'єднаних елементів працюють на зріз. Моделювання цих елементів проводять скінченними елементами для зсуву (СЕЗ), що являють собою сполучні елементи з вузловими точками, розміщеними на серединних поверхнях з'єднаних деталей (рис. 3.2 а). Жорсткість таких елементів на зсув  $K(t)$  визначається із співвідношення:

$$K(t) = A \cdot G^* / H \quad (3.7)$$

де,  $G^*$  – уточнений модуль зсуву (СЕЗ);  $A$ ,  $H$  – площа, що падає на один СЕЗ, та його довжина. Особливістю таких скінченних елементів зсуву є включення піддатливості матеріалів з'єднаних деталей у жорсткість зсуву через значення уточненої величини  $G^*$ .

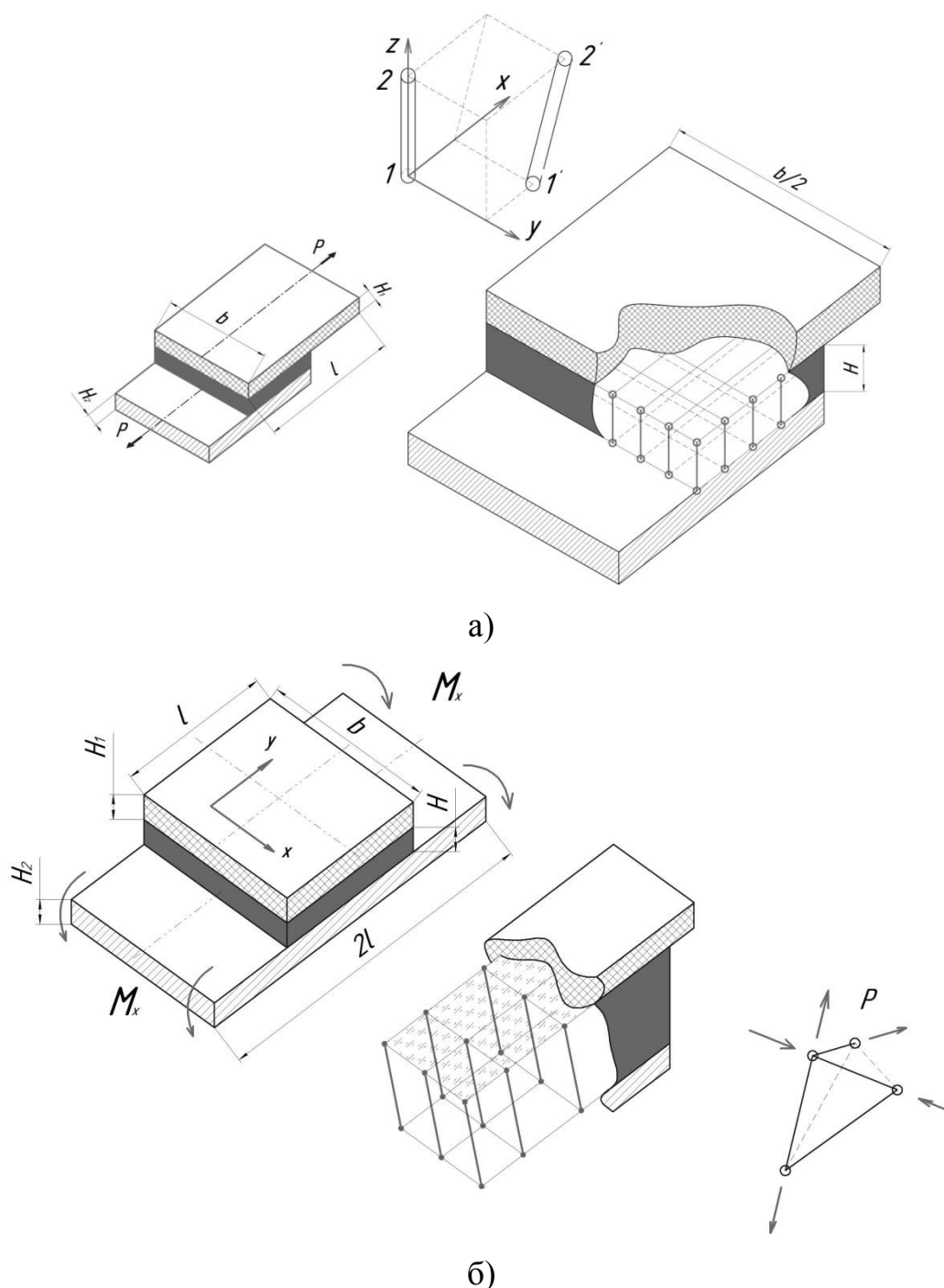


Рисунок 3.2 – Моделювання за допомогою методу скінченно-елементного аналізу пластин на зсув (а) та згинання (б)

Так, наприклад, під час моделювання клейового з'єднання припускають, що жорсткість на зсув клейового прошарку, розміщеного між ідентичними елементами двох з'єднаних пластин, рівномірно розподіляється між вузловими точками скінченних елементів зсуву (які під час розрахунку «замінюють» клей). У цьому разі жорсткість зсуву СЕЗ визначають додаванням до них суміжних плоских елементів:



$$K(t) = \sum_e \left[ \left( \frac{A_e}{J_e} \right) / H \right] \cdot G, \quad (3.8)$$

де  $J_e$  – число вузлів в елементі  $e$  ( $J_e = 3 \dots 4$ ).

Для передавання згинальних навантажень застосовують «фермову» модель матеріалу сполучного шару – він замінюється набором стрижневих сполучних скінченних елементів (СССЕ), що працюють як на розтягування, так і на стискання (рис. 3.2 б). Водночас, виходячи зі звичайних припущень про мінімізацію деформацій, з оцінювання жорсткості на зсув клейового прошарку можна одержати осьову жорсткість СССЕ:

$$E \cdot S = GA / (2 \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha), \quad (3.9)$$

де  $E$  і  $S$  – модуль пружності та площа СССЕ;  $G$  і  $A$  – модуль зсуву і площа матеріалу клейового прошарку, що замінюється стрижневими елементами;  $\alpha = \frac{\arctg(z_m - z_n)}{y_m - y_n}$ .

У зазначених СССЕ відсутні три обертальні та два поступальні ступені вільності.

Розглянемо типовий плоский скінченний елемент (рис. 3.3), що зазнає одночасно дії мембранних і згинальних силових чинників. Деформований стан при розтягуванні та стисканні елемента описується величинами переміщень  $u$  і  $v$  кожної вузлової точки  $i$ . Мінімізація загальної енергії деформації дозволяє записати матриці жорсткості у вигляді

$$\{F_i\} = [k^P] \cdot \{\delta_i^P\}. \quad (3.10)$$

У цьому разі переміщення та вузлові сили мають відповідно такий вигляд:

$$\delta_i^P = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}, F_i = \begin{Bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \end{Bmatrix}.$$

Деформований стан, спричинений згинанням елемента, однозначно визначається вузловими переміщеннями  $w$  у напрямі осі  $z$  і двома кутами повороту  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  (рис. 3.3). Це дає можливість подати відповідні матриці жорсткості у вигляді:

$$\{F_i^n\} = [k^n] \cdot \{\delta_i^n\}, \quad (3.11)$$

де

$$\delta_i^n = \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}, F_i^n = \begin{Bmatrix} F_{iz} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \end{Bmatrix}.$$

За базовий скінченний елемент для дослідження плоского НДС найчастіше беруть трикутний лінійний елемент першого порядку (рис. 3.3 б). Функціями форми цього елемента є статичні координати:

$$N_1 = L_1; N_2 = L_2; N_3 = L_3. \quad (3.12)$$

Функції переміщень при цьому описують поліномами першого порядку в  $L$  – координатах:

$$\begin{aligned} u &= L_1 \cdot u_1 + L_2 \cdot u_2 + L_3 \cdot u_3, \\ v &= L_1 \cdot v_1 + L_2 \cdot v_2 + L_3 \cdot v_3. \end{aligned} \quad (3.13)$$

За базовий скінченний елемент під час аналізу вигину найчастіше вибирають повністю погоджений трикутний елемент, що характеризується трьома основними ступенями вільності в кожній вершині (прогин і кути повороту відносно осей  $x$  і  $y$  та  $\theta_x$  і  $\theta_y$ ) та додатковими кутами повороту нормалей по середині сторін  $\theta_{ni}$  (рис. 3.3 в). У цьому разі основні функції, які потрібно визначити, мають третій порядок, а отже, допускають параболічний закон зміни нормальної похідної на межі.

Для того щоб число ступенів вільності в кожному вузлі виявилось однаковим, вважають, що величина нормальної похідної всередині зовнішньої сторони дорівнює середньому арифметичному значенню цієї похідної на її кінцях.

Подібний трикутний елемент використовують для побудови погоджених чотирикутних елементів із сімома внутрішніми ступенями вільності. У кожному трикутнику, що входить до зазначеного чотирикутника, вектор вузлових переміщень містить по три основні згинальні функції та величину нормальної похідної в середині однієї внутрішньої сторони. Функції форми для кожного піделемента в остаточному вигляді мають по 10 членів.

Чотирикутний елемент (рис. 3.3 в) є сукупністю чотирьох трикутних. У центрі тяжіння чотирикутного елемента знаходиться внутрішній вузол.

Матрицю жорсткості і вектор вузлових сил можна отримати шляхом додавання відповідних компонентів трикутних елементів. Внутрішній вузол пов'язаний лише з вузлами, що належать даному елементу. Його переміщення повністю визначаються переміщеннями інших вузлів елементу. Розв'язання системи основних рівнянь дозволяє отримати переміщення зовнішніх вузлів, оскільки зроблене виключення невідомих, таких, що відповідають ступеням вільності внутрішнього вузла, а його переміщення виражаються через переміщення зовнішніх. Визначивши переміщення внутрішнього вузла, знаходять переміщення, деформації та напруження в чотирикутному елементі. Результуючі їх значення визначають шляхом усереднення величин, одержаних для трикутних елементів.

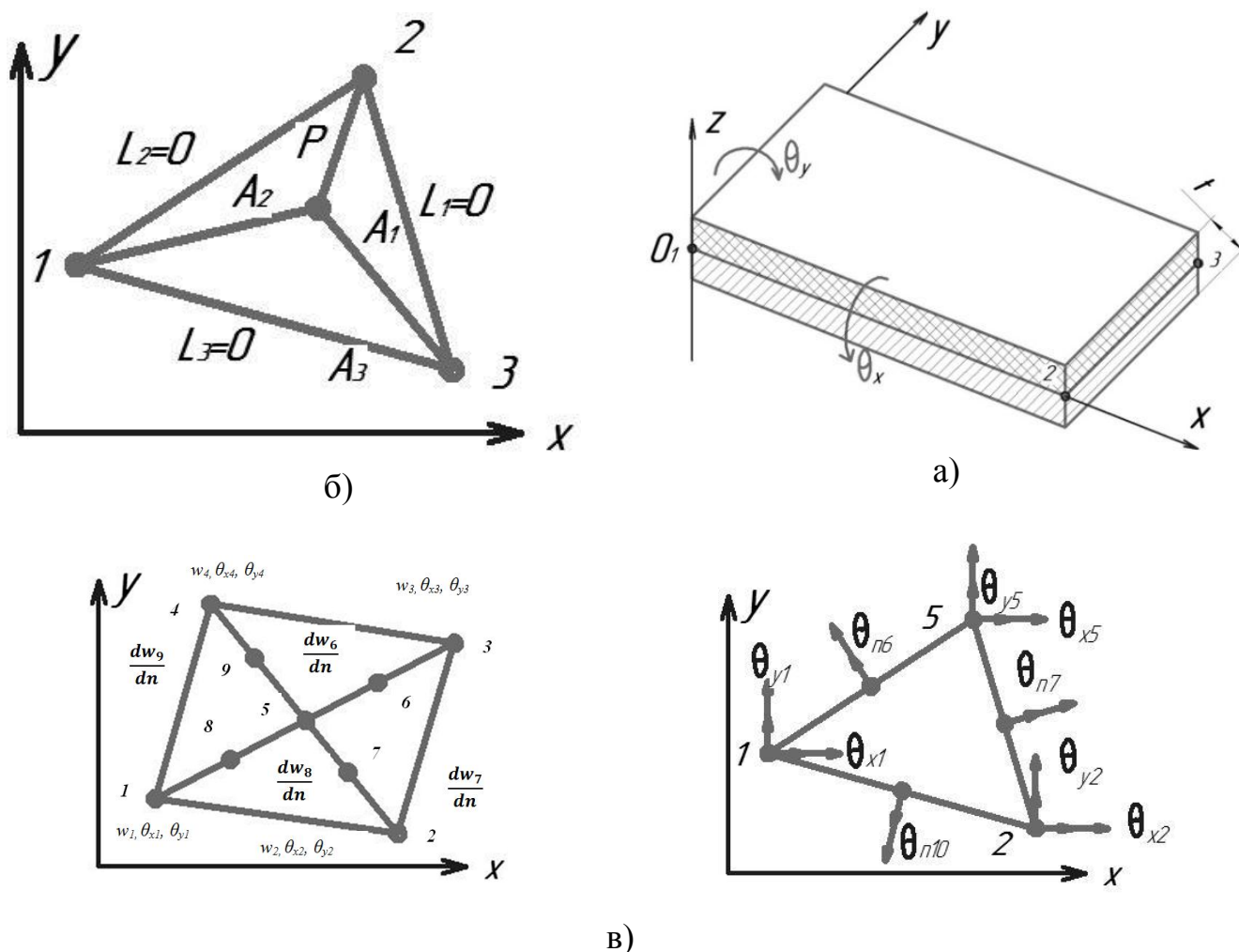


Рисунок 3.3 – Плоскі скінченні елементи: типовий елемент (а), базовий трикутний для аналізу плоского НДС (б), базовий елемент для оцінювання НДС з урахування згину (в)

Аналіз відповідності й точності одержаних при скінченно-елементному моделюванні результатів засвідчив, що найкраща точність (5-6 %) досягається при відношенні розміру скінченного елемента до характерного розміру елемента 0,1-0,15, а для балок – при грубішому розбитті.

Типова бібліотека скінченних елементів дає можливість проводити прикладне моделювання механічних, клейових і клеємеханічних з'єднань [74]. Достовірність результатів у кожному конкретному випадку для відповідальних сполучних вузлів необхідно перевіряти експериментально або на модельних зразках з'єднань, або безпосередньо на натурних конструкціях.

### **3.2 Математичне формулювання моделі напружено-деформованого стану гвинтового з'єднання з круглою різьбою, формоутвореного в армованому композиційному матеріалі**

Система, яку моделювали, в роботі описана у вигляді двох об'єктів (гайки з внутрішньою різьбою або її частини (матеріал гайки – армований склопластиковий матеріал) і металевої вставки (абсолютно жорсткого тіла) із зовнішньою різьбою або її частини), що відповідно орієнтовані у просторі одне відносно одного та взаємодіють між собою. Вставка із зовнішньою різьбою перебуває під дією зовнішніх сил, значення яких потрібно визначити, до моменту руйнування внутрішньої різьби. Об'єкти взаємодіють одне з одним за контактними поверхнями, створюючи одне в одному деформації за рахунок дії контактних сил, обумовлених заданою моделлю тертя у відповідних місцях контактних поверхонь. Кожний з об'єктів чинить опір деформаціям, унаслідок чого виникають внутрішні сили (напруження), що відповідають заданій моделі матеріалу. Водночас якщо міцність об'єкта не достатня, то відбувається його руйнування. Критерій і схема руйнування задаються моделлю даного процесу. В нашому випадку основними показниками поданими вище для металевої деталі із зовнішньою різьбою, можна не враховувати, оскільки щодо деталі, виготовленої з АКМ, вони будуть незначними. Задача яка вирішується в роботі розглядається в квазістатичній постановці, так як вставка

переміщується з відносно малою швидкістю. Система, яку потрібно розв'язати для заданих умов, складається з таких рівнянь:

1 Статичний зміст. Диференціальні рівняння рівноваги:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial \alpha_3} + F_1 &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{21}}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial \alpha_3} + F_2 &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{31}}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial \sigma_3}{\partial \alpha_3} + F_3 &= 0. \end{aligned} \quad (3.14)$$

2 Геометричний зміст. Зв'язку деформацій із переміщеннями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1} \right), \quad \varepsilon_{13} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_3} + \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1} \right); \\ \varepsilon_{21} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_2} \right), \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2}, \quad \varepsilon_{23} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_3} + \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_2} \right); \\ \varepsilon_{31} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_3} \right), \quad \varepsilon_{32} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1} \right), \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_3}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

3 Фізичний зміст. Закон Гука для ортотропного тіла:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

#### 4 Початкові та граничні умови:

Механічні граничні умови задавали:

- жорстким закріпленням зовнішньої діаметральної поверхні гайки з АКМ;
- обмеженням лінійних переміщень вздовж двох горизонтальних осей точок верхньої та нижньої поверхонь вставки;
- симетричними граничними умовами на бічних поверхнях обох тіл, що лежать в координатних площинах глобальної системи координат;
- умовами невідривного (No Separation) приведеного у дотикання (Closed) контакту з тертям (Frictional) гвинтової поверхні гайки до абсолютно жорсткої (Rough) гвинтової поверхні вставки у з'єднанні.

Початкові умови:

- нерухома гайка;
- поступальний рух з постійною лінійною швидкістю вставки вздовж вертикальної осі з моменту контакту.

#### 5 Умова руйнування:

У літературних джерелах відомо 3 форми руйнування роз'ємних гвинтових з'єднань: руйнування від розтягування з'єднаних деталей та зсуву і зминання в з'єднанні. Перші дві форми пов'язані з процесами руйнування в плані (пласким напруженим станом), тоді як останній є наслідком об'ємного (тривісного) напруженого стану. В дослідженні вважається, що руйнування відбувається пошарово і в моделі з'єднання, виконаного в товстій композитній пластині, використовується критерій міцності руйнування композиційного матеріалу за Chang-Chang [79-80].

Взагалі в літературі описано 4 механізми руйнування роз'ємних гвинтових з'єднань у плані розтріскування матриці, руйнування матриці від стискання та від зсуву і розрив волокон. У застосованому критерії ці механізми враховано.

Критерій міцності при розтяганні розраховується за формулою:

$$\left( \frac{\sigma_1}{Y_t} \right)^2 + \frac{\int_0^{\varepsilon_{12}} \tau_{12} d\varepsilon_{12}}{\int_0^{\varepsilon_{12}''} \tau_{12} d\varepsilon_{12}} = e_M^2 \quad (3.17)$$

Якщо  $e_M \geq 1$  – незадовільний результат,  $e_M < 1$  – достовірний результат.

У формулі 3.17  $\sigma_1$  та  $\tau_{12}$  – нормальне напруження вздовж волокон та дотичне напруження в площині армування відповідно;  $Y_t$  – межа міцності при розтягуванні вздовж волокон  $\sigma_1 \geq 1$ ,  $\epsilon_{12}$  – кут зсуву в площині армування та  $\epsilon_{12}''$  – граничний кут зсуву – кутова деформація, що відповідає межі міцності при зсуві.

Для врахування зсуву в моделі використовують наведені нелінійні залежності Nahn і Tsai за формулою [81]:

$$\epsilon_{12} = \left( \frac{1}{G_{12}} \right) \tau_{12} + \beta \tau_{12}, \quad (3.18)$$

де  $G_{12}$  – модуль зсуву в площині армування;  $\beta$  – експериментальна константа, яку визначають при випробуваннях на зсув.

Критерій міцності при розтягуванні може бути переписаний з урахуванням зсуву у вигляді

$$\left( \frac{\sigma_1}{Y_t} \right) + \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4} \beta \tau_{12}^4}{\frac{S_c^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4} \beta S_c^4} = e_M^2, \quad (3.19)$$

де  $S_c$  – межа міцності при зсуві в площині армування.

Якщо  $e_M \geq 1$  – незадовільний результат,  $e_M < 1$  – достовірний результат.

Загальний критерій міцності за наявності стискальних напружень взято за формою Hashin, описується формулою (3.20) або (3.21) [82]:

$$\left( \frac{\sigma_2}{2S_c} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{Y_c} + \frac{\int_0^{\epsilon_{12}} \tau_{12} d\epsilon_{12}}{\int_0^{\epsilon_{12}''} \tau_{12} d\epsilon_{12}} = e_d^2, \quad (3.20)$$

$$\left( \frac{\sigma_2}{2S_c} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{Y_c} + \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4} \alpha \tau_{12}^4}{\frac{S_c^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4} \beta S_c^4} = e_d^2. \quad (3.21)$$

Система, доповнена врахуванням зсуву в площині армування та руйнування волокон, матиме вигляд (3.22) або (3.23) [80].

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \frac{\int_0^{\varepsilon_{12}} \tau_{12} d\varepsilon_{12}}{\int_0^{\varepsilon_{12}'} \tau_{12} d\varepsilon_{12}} = e_f^2, \quad (3.22)$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right) + \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\beta\tau_{12}^4}{\frac{S_c^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\beta S_c^4} = e_f^2. \quad (3.23)$$

Якщо  $e_f \geq 1$  – незадовільні результати,  $e_f < 1$  – достовірні результати.

В нашому випадку, в процесі моделювання використовується лише один із зазначених вище критеріїв руйнування, система самостійно, на основі моделі матеріалу та умов його руйнування визначає який із представлених критеріїв порібно застосувати для заданих умов.

Розв'язання цієї визначальної системи рівнянь у роботі виконане методом скінченних елементів з інтеграцією за часом, явним методом за допомогою пакета LS-DYNA компанії LSTC. Для випадку моделювання навантаження в головній січній площині взято крок інтеграції від 1 до 10 нс. Цим забезпечується чисельна постійність процедур за нормальної форми скінченних елементів. Для зменшення перекручення скінченних елементів у роботі задіяний алгоритм періодичного перестроювання SE-сітки (геометричний критерій).

Загальний алгоритм моделювання описаний у працях [83, 84]. Розв'язання задачі реалізується ітераційним процесом, який інтегрує рівняння руху на деякому малому проміжку часу і перевіряє виконання умов руйнування. Після цього оновлюються SE-сітки і граничні умови, а тоді обчислюються напруження та деформації і виконується чергова ітерація. Процес триває до завершення зазначеного часу розрахунку.



### 3.3 Математичний опис моделі армованого композиційного матеріалу для визначення напружено-деформованого стану з'єднання методом скінченно-елементного аналізу

Ураховуючи те, що більшість конструкцій з армованих композиційних матеріалів зазвичай складаються з комбінації по-різному орієнтованих односпрямованих шарів, властивості цих конструкцій і можливі варіанти схем армування досить різноманітні, але на відміну від ізотропних матеріалів армовані композити мають чітко виражену анізотропію. У цьому разі руйнування більш «слабкого» шару за статичного чи динамічного навантаження може відбуватися раніше, ніж настане момент граничного стану АКМ в цілому.

В армованому композиційному матеріалі з регулярною структурою зазвичай наявні повторювані елементи у вигляді односпрямованих шарів. Нехтуючи неоднорідністю структури на мікрорівні кожного шару, можна знайти ефективні характеристики окремих шарів на макрорівні. За цих умов деформаційна модель матеріалу має квазіоднорідну структуру, складену з різних шарів. Саме тому досить складно отримати АКМ з подібними властивостями навіть під час виготовлення однієї партії АКМ за подібних умов.

У нашому випадку для одержання математичного опису моделі матеріалу, для проведення подальшого моделювання необхідно одержати показники пружних характеристик АКМ. Для цього ми використали підхід на основі наближених розрахунків за В. Фойгтом і Ф. Рейсом, детально описаний у працях [85, 86-88]. А за основу одержання математичного опису моделі АКМ були взяті теоретичні розрахунки, проведені С. М. Верещакою в праці [89].

Будемо розглядати склопластиковий армований матеріал, який ми використали, як лінійне пружне ортотропне тіло, для якого розрахункові залежності пружних характеристик армованого високомодульними волокнами шару мають вигляд:

$$E_1 = \psi_1 E_e + \frac{(1 - \psi_1)(1 + \psi_3)}{1 - \psi_3} E_m, \quad (3.24)$$

$$E_2 = \frac{\psi_1 (1 + \psi_1) (1 + \psi_3)}{(1 - \psi_1) (1 - \psi_3) (1 - \nu_6^2)} E_M, \quad (3.25)$$

$$E_3 = \psi_3 E_6 + \frac{(1 + \psi_1) (1 + \psi_3)}{(1 - \psi_1) (1 - \nu_6^2)} E_M, \quad (3.26)$$

$$\nu_{12} = \frac{\nu_6 (1 + \psi_3) (1 + \psi_1)}{\psi_1 (1 - \psi_3) (1 - \psi_1) (1 - \nu_6^2)} \frac{E_M}{E_6}, \quad (3.27)$$

$$\nu_{13} = \nu_6 \psi_3 + (1 - \psi_3) \nu_M, \quad (3.28)$$

$$\nu_{23} = \nu_B \psi_3 + (1 - \psi_3) \nu_M, \quad (3.29)$$

$$G_{12} = \frac{1 + \psi_1}{(1 - \psi_1) (1 + \psi_3)} G_M, \quad (3.30)$$

$$G_{23} = \frac{1 + \psi_3}{(1 - \psi_3) (1 - \psi_1)} G_M, \quad (3.31)$$

$$G_{13} = \frac{(1 + \psi_1) (1 + \psi_3)}{(1 - \psi_1) (1 - \psi_3)} G_M, \quad (3.32)$$

де  $E_1, E_2, E_3$  – модулі пружності у відповідному напрямку  $x_1, x_2, x_3$ ;  $G_{23}, G_{13}, G_{12}$  – модулі зсуву відповідно в площинах  $x_2Ox_3, x_1Ox_3, x_1Ox_2$ ;  $\nu_{ij}$  – коефіцієнт Пуассона, перший індекс вказує на напрям діючого напруження, а другий – на напрям поперечної деформації, що виникає при цьому;  $E_M$  та  $E_B$  – модулі пружності ізотропних матриці та волокна відповідно;  $\nu_M$  і  $\nu_B$  – коефіцієнти Пуассона ізотропних матриці та волокна;  $G_M, G_B$  – модуль зсуву ізотропних матриці та волокна, а  $\psi_1, \psi_3$  – відносна площа арматури в площині перерізу осей 1 і 3 (рис. 3.4).

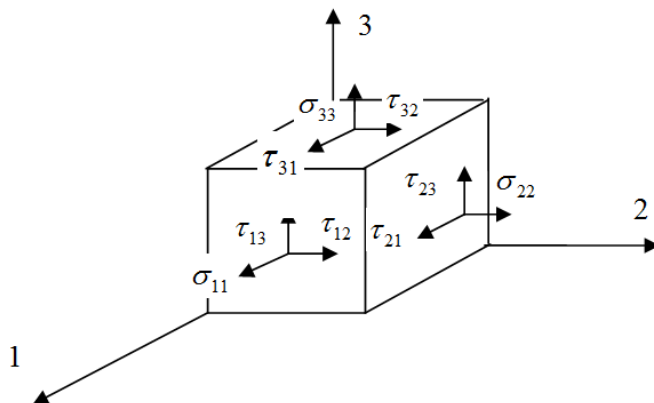


Рисунок 3.4 – Об'ємний напружений стан [89]

Коефіцієнт армування  $\psi_1$ , що характеризує відносний об'ємний вміст волокон, можна визначити за формулою

$$\psi_1 = \frac{\pi(d_e)^2}{4h} i_e, \quad (3.33)$$

де  $h$  – товщина армованого шару;  $d_e$  – діаметр волокон;  $i_e$  – частота армування. Величина  $\psi_3$  визначається за допомогою емпіричних залежностей і зазвичай змінюється в інтервалі  $\psi_3 = (0,05 - 0,15)\psi_1$ . Геометрія односпрямованого армованого шару показана на рисунку 3.5.

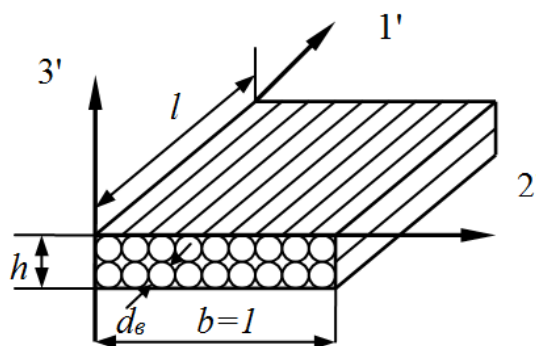


Рисунок 3.5 – Геометрія односпрямованого армованого шару [87]

Співвідношення пружності для ортотропного армованого шару в його осях симетрії 1, 2, 3 з урахуванням технічних сталих у матричній формі мають вигляд

$$\{\sigma\} = [A_0]\{\varepsilon\}, \quad \{\varepsilon\} = [B_0]\{\sigma\}, \quad (3.34)$$

де

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}, \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad - \quad \text{матриці-стовпці}$$

напружень і деформацій шару в напрямку осей симетрії 1, 2, 3 (рис. 3.5);

$$[A_0] = \begin{bmatrix} a_{11}^0 & a_{12}^0 & a_{13}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & a_{22}^0 & a_{23}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & & a_{33}^0 & 0 & 0 & 0 \\ сим. & & & a_{44}^0 & 0 & 0 \\ & & & & a_{55}^0 & 0 \\ & & & & & a_{66}^0 \end{bmatrix}, [B_0] = \begin{bmatrix} b_{11}^0 & b_{12}^0 & b_{13}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & b_{22}^0 & b_{23}^0 & 0 & 0 & 0 \\ & & b_{33}^0 & 0 & 0 & 0 \\ сим. & & & b_{44}^0 & 0 & 0 \\ & & & & b_{55}^0 & 0 \\ & & & & & b_{66}^0 \end{bmatrix} -$$

матриці жорсткості та піддатливості ортотропного шару в напрямку осей симетрії 1, 2, 3 відповідно.

Розв'язуючи одночасно дві системи рівнянь (3.34) щодо коефіцієнтів жорсткості  $a_{ij}^0$ , можна знайти такі співвідношення:

$$\begin{aligned} a_{11}^0 &= [b_{22}^0 b_{33}^0 - (b_{23}^0)^2] \Delta^{-1}, & a_{22}^0 &= [b_{11}^0 b_{33}^0 - (b_{13}^0)^2] \Delta^{-1}, \\ a_{33}^0 &= [b_{11}^0 b_{22}^0 - (b_{12}^0)^2] \Delta^{-1}, & a_{12}^0 &= [b_{13}^0 b_{23}^0 - b_{12}^0 b_{33}^0] \Delta^{-1}, \\ a_{13}^0 &= [b_{12}^0 b_{23}^0 - b_{22}^0 b_{13}^0] \Delta^{-1}, & a_{23}^0 &= [b_{12}^0 b_{13}^0 - b_{11}^0 b_{23}^0] \Delta^{-1}, \end{aligned}$$

$$\Delta = b_{11}^0 b_{22}^0 b_{33}^0 + b_{12}^0 b_{23}^0 b_{31}^0 + b_{21}^0 b_{32}^0 b_{13}^0 - b_{13}^0 b_{22}^0 b_{31}^0 - b_{21}^0 b_{12}^0 b_{33}^0 - b_{11}^0 b_{32}^0 b_{23}^0,$$

$$a_{44}^0 = \frac{1}{b_{44}^0}, \quad a_{55}^0 = \frac{1}{b_{55}^0}, \quad a_{66}^0 = \frac{1}{b_{66}^0}. \quad (3.35)$$

Коефіцієнти піддатливості  $b_{ij}^0$  можна записати за допомогою технічних сталей:

$$\begin{aligned} b_{11}^0 &= \frac{1}{E_1}, \quad b_{12}^0 = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, \quad b_{13}^0 = -\frac{\nu_{31}}{E_3}, \quad b_{21}^0 = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, \\ b_{22}^0 &= \frac{1}{E_2}, \quad b_{23}^0 = -\frac{\nu_{32}}{E_3}, \quad b_{31}^0 = -\frac{\nu_{13}}{E_1}, \quad b_{32}^0 = -\frac{\nu_{23}}{E_2}, \\ b_{33}^0 &= \frac{1}{E_3}, \quad b_{44}^0 = \frac{1}{G_{23}}, \quad b_{55}^0 = \frac{1}{G_{13}}, \quad b_{66}^0 = \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Оскільки в нашому випадку армований композит складається з кількох різноорієнтованих шарів односпрямованого матеріалу, то відповідно до рисунка 3.6 одержуємо системи координат: загальні  $\alpha, \beta, z$  та локальні  $1^{(k)}, 2^{(k)}, z$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ), де  $k$  – номер односпрямованого шару в пакеті багат шарового матеріалу,  $n$  – кількість шарів;  $\varphi^{(k)}$  – кут між осями загальної системи координат та осями

локальної системи координат  $k$ -шару композита. Можна побачити, що в повернених осях  $\alpha, \beta, z$  армований шар має анізотропні властивості й одну площину пружної симетрії. Тоді стають доречними співвідношення пружності:

$$\{\sigma_{\alpha\beta}^{(k)}\} = [A_{\varphi}^{(k)}] \{\varepsilon_{\alpha\beta}^{(k)}\}, \quad (3.37)$$

$$\text{де } \{\sigma_{\alpha\beta}^{(k)}\} = \{\sigma_{\alpha}^{(k)}, \sigma_{\beta}^{(k)}, \sigma_z^{(k)}, \tau_{\beta z}^{(k)}, \tau_{\alpha z}^{(k)}, \tau_{\alpha\beta}^{(k)}\}^T,$$

$$\{\varepsilon_{\alpha\beta}^{(k)}\} = \{\varepsilon_{\alpha}^{(k)}, \varepsilon_{\beta}^{(k)}, \varepsilon_z^{(k)}, \gamma_{\beta z}^{(k)}, \gamma_{\alpha z}^{(k)}, \gamma_{\alpha\beta}^{(k)}\}^T \quad - \text{ матриці-стовпці напружень і}$$

деформацій  $k$ -шару в напрямку осей  $\alpha, \beta, z$ ;

$$[A_{\varphi}^{(k)}] = \begin{bmatrix} a_{11}^{\varphi(k)} & a_{12}^{\varphi(k)} & a_{13}^{\varphi(k)} & 0 & 0 & 0 \\ & a_{22}^{\varphi(k)} & a_{23}^{\varphi(k)} & 0 & 0 & 0 \\ & & a_{33}^{\varphi(k)} & 0 & 0 & 0 \\ \text{сим.} & & & a_{44}^{\varphi(k)} & a_{45}^{\varphi(k)} & 0 \\ & & & & a_{55}^{\varphi(k)} & 0 \\ & & & & & a_{66}^{\varphi(k)} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{матриця коефіцієнтів}$$

жорсткості  $k$ -шару в напрямку осей  $\alpha, \beta, z$  загальної системи координат.

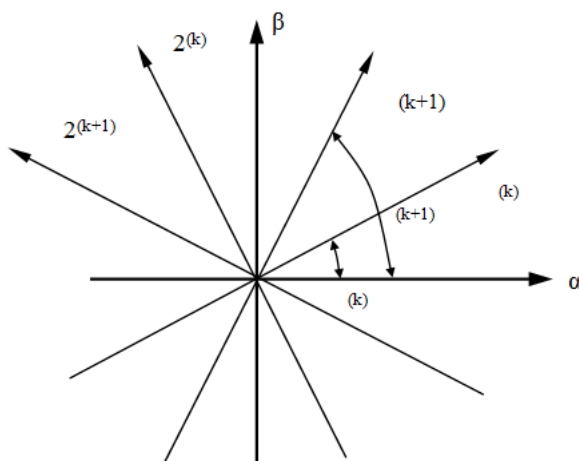


Рисунок 3.6 – Системи координат багат шарового композита [90]

Для подальшого викладення матеріалу систему рівнянь (3.37) зручно подати у вигляді

$$\{\sigma_{\alpha}^{(k)}\} = [A_{\alpha}^{(k)}] \{\varepsilon_{\alpha}^{(k)}\}; \quad \{\sigma_{\alpha\beta}^{(k)}\} = [A_{\alpha\beta}^{(k)}] \{\varepsilon_{\alpha\beta}^{(k)}\}; \quad (3.38)$$

$$\text{де } \{\sigma_{\alpha}^{(k)}\} = \{\sigma_{\alpha}^{(k)}, \sigma_{\beta}^{(k)}, \sigma_z^{(k)}, \tau_{\alpha\beta}^{(k)}\}^T; \quad \{\sigma_{\alpha\beta}^{(k)}\} = \{\tau_{\beta z}^{(k)}, \tau_{\alpha z}^{(k)}\}^T;$$

$$\begin{aligned} \{\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha^{(k)}\} &= \{\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha^{(k)}, \boldsymbol{\varepsilon}_\beta^{(k)}, \boldsymbol{\varepsilon}_z^{(k)}, \boldsymbol{\gamma}_{\alpha\beta}^{(k)}\}^T; & \{\boldsymbol{\varepsilon}_{\alpha 3}^{(k)}\} &= \{\boldsymbol{\gamma}_{\beta z}^{(k)}, \boldsymbol{\gamma}_{\alpha z}^{(k)}\}^T; \\ [A_\alpha^{(k)}] &= \begin{bmatrix} a_{11}^{\phi(k)} & a_{12}^{\phi(k)} & a_{13}^{\phi(k)} & a_{16}^{\phi(k)} \\ & a_{22}^{\phi(k)} & a_{23}^{\phi(k)} & a_{26}^{\phi(k)} \\ & \text{сум.} & a_{33}^{\phi(k)} & a_{36}^{\phi(k)} \\ & & & a_{66}^{\phi(k)} \end{bmatrix}; \\ [A_{\alpha 3}^{(k)}] &= \begin{bmatrix} a_{44}^{\phi(k)} & a_{45}^{\phi(k)} \\ \text{сум.} & a_{55}^{\phi(k)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.39)$$

У разі коли армований композит є набором  $n$  різноорієнтованих шарів односпрямованого матеріалу, зведені пружні характеристики розглянутого пакета шарів обчислюють із співвідношень, аналогічних наведеним у другому розділі роботи [90]:

$$\{\boldsymbol{\sigma}_\alpha\} = [A_\alpha] \{\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha\}, \quad \{\boldsymbol{\sigma}_{\alpha 3}\} = [A_{\alpha 3}] \{\boldsymbol{\varepsilon}_{\alpha 3}\} \quad (3.40)$$

або

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\sigma}_\alpha \\ \boldsymbol{\sigma}_\beta \\ \boldsymbol{\sigma}_z \\ \boldsymbol{\tau}_{\alpha\beta} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{16} \\ & a_{22} & a_{23} & a_{26} \\ & \text{сум.} & a_{33} & a_{36} \\ & & & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_\alpha \\ \boldsymbol{\varepsilon}_\beta \\ \boldsymbol{\varepsilon}_z \\ \boldsymbol{\gamma}_{\alpha\beta} \end{Bmatrix}, \\ \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{\beta z} \\ \boldsymbol{\tau}_{\alpha z} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{44} & a_{45} \\ \text{сум.} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\gamma}_{\beta z} \\ \boldsymbol{\gamma}_{\alpha z} \end{Bmatrix}, \end{aligned}$$

де

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ij}^{\phi(k)} \bar{h}^{(k)}.$$

Технічні сталі багат шарового композита при розтяганні можна одержати, перетворивши систему рівнянь (3.40) до вигляду

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}_\alpha &= a_{11}\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha + a_{12}\boldsymbol{\varepsilon}_\beta + a_{13}\boldsymbol{\varepsilon}_z + a_{16}\boldsymbol{\gamma}_{\alpha\beta}, \\ 0 &= a_{12}\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha + a_{22}\boldsymbol{\varepsilon}_\beta + a_{23}\boldsymbol{\varepsilon}_z + a_{26}\boldsymbol{\gamma}_{\alpha\beta}, \\ 0 &= a_{13}\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha + a_{23}\boldsymbol{\varepsilon}_\beta + a_{33}\boldsymbol{\varepsilon}_z + a_{36}\boldsymbol{\gamma}_{\alpha\beta}, \\ 0 &= a_{16}\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha + a_{26}\boldsymbol{\varepsilon}_\beta + a_{36}\boldsymbol{\varepsilon}_z + a_{66}\boldsymbol{\gamma}_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Підставивши вираз  $E_\alpha = \sigma_\alpha / \varepsilon_\alpha$  у перше рівняння системи рівнянь (3.41), попередньо записавши деформації  $\varepsilon_\beta$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\gamma_{\alpha\beta}$  як функції параметра  $\varepsilon_\alpha$  за допомогою 3 останніх рівнянь (3.40), неважко знайти значення  $E_\alpha$ :

$$E_\alpha = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{11}}. \quad (3.42)$$

У формулі (3.42)  $M_{11}$  – мінор елемента  $a_{11}$  узагальненої матриці  $[A_\alpha]$ . Аналогічно обчислюють інші значення технічних сталей:

$$E_\beta = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{22}}, \quad E_z = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{33}}, \quad (3.43)$$

де  $E_\beta$ ,  $E_z$  – модулі пружності першого роду;

$$G_{\alpha\beta} = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{44}}, \quad G_{\alpha 3} = a_{55} - \frac{(a_{45})^2}{a_{44}}, \quad G_{\beta 3} = a_{44} - \frac{(a_{45})^2}{a_{55}}, \quad (3.44)$$

де  $G_{\alpha\beta}$ ,  $G_{\alpha 3}$ ,  $G_{\beta 3}$  – модулі зсуву;

$$\nu_{\alpha\beta} = \frac{M_{12}}{M_{11}}, \quad \nu_{\alpha z} = \frac{M_{13}}{M_{11}}, \quad \nu_{\beta z} = \frac{M_{23}}{M_{22}}, \quad (3.45)$$

де  $\nu_{\alpha\beta}$ ,  $\nu_{\alpha z}$ ,  $\nu_{\beta z}$  – коефіцієнти Пуассона. Інші три значення коефіцієнтів Пуассона  $\nu_{\beta\alpha}$ ,  $\nu_{z\alpha}$ ,  $\nu_{z\beta}$  знаходять за допомогою співвідношень

$$\nu_{ij} E_j = \nu_{ji} E_i \quad (i, j = \alpha, \beta, z). \quad (3.46)$$

Тут перший індекс коефіцієнта Пуассона вказує на напрямок дії сили, а другий – на напрямок поперечної деформації, спричиненої цією силою.

У нашому випадку для склопластикового армованого матеріалу як матрицю використовували епоксидний полімер ЕРОХУ-520 із такими параметрами пружності:  $E_m = 1\,793$  МПа,  $G_m = 1\,500$  МПа,  $\nu_m = 0,33$ . Армуючим елементом композиції є тканина сатинової структури Т13-270. Товщина тканини дорівнює 0,15 мм. Щільність тканини за основою становить 36 ниток/см, за утком – 20 ниток/см. Діаметр волокна становить  $1,5 \cdot 10^{-3}$  мм. Механічні характеристики

волокна:  $E_B = 45\,000$  МПа,  $G_B = 1\,100$  МПа,  $\nu_B = 0,24$ . Кількість волокон в одній нитці досягає 800 шт. Модуль пружності нитки дорівнює 74 506 МПа, модуль зсуву й коефіцієнт Пуассона нитки можна брати такими самими, як і для волокна.

Технічні сталі пружності розглянутих багатошарових композитів, отримані за допомогою раніше одержаних залежностей (3.18)–(3.26) і з урахуванням одержаних експериментально модулів пружності та коефіцієнта Пуассона (одержання детально описано в пункті 2.2), наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Пружні характеристики армованого матеріалу

$E_1 = E_x$ , МПа	$E_2 = E_y$ , МПа	$E_3 = E_z$ , МПа
12 688,09	12 688,09	6 538,42
$\nu_{21} = \nu_{yx}$	$\nu_{31} = \nu_{zx}$	$\nu_{32} = \nu_{zy}$
0,13	0,22	0,22
$G_{12} = G_{xy}$ , МПа	$G_{23} = G_{yz}$ , МПа	$G_{31} = G_{zx}$ , МПа
2 145,26	1 827,09	1 827,09

### 3.4 Моделювання напружено-деформованого стану гвинтового з'єднання з круглою різьбою, виготовленого в армованому композиційному матеріалі, методом скінчено-елементного аналізу

Для розв'язання задачі моделювання напружено-деформованого стану запропонованого роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою методом скінченно-елементного аналізу був розроблений такий алгоритм (рис. 3.7.)

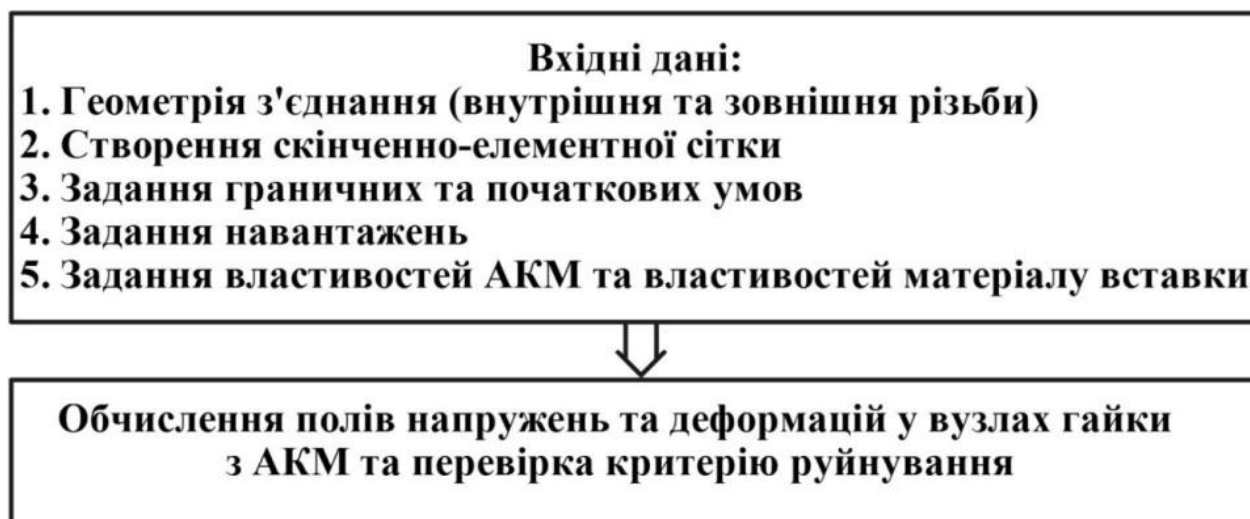


Рисунок 3.7 – Алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану з'єднання методом скінченно-елементного аналізу.



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, вважають  $p$  – крок різьби та  $t$  – глибину профілю різьби (профіль зображено на рис. 2.10).

Для перевірки адекватності запропонованої моделі було взято за основу різьбу із параметрами аналогічними метричній різьбі М6х1,0 ISO 724:1993 [91]. Вибір круглої різьби з параметрами, аналогічними до метричної різьби М6х1,0, був зумовлений можливістю подальшого її практичного виготовлення з використанням існуючого обладнання та технологічного оснащення, наявного на базі лабораторії кафедри ТМВІ Сумського державного університету.

Для моделювання використовували круглу різьбу з параметрами, що змінювалися у відповідних межах: глибина профілю різьби  $t$  – у межах від 0,5 до 1,0 мм, а крок різьби  $p$  – у межах від 1,0 до 4,0 мм. В таблиці 3.2 наведені значення основних параметрів круглої різьби для кожного з випадків, для яких було виконано моделювання напружено-деформованого стану з'єднання.

Таблиця 3.2 – Основні параметри різьби для кожного випадку моделювання

№	$t$ (глибина профілю різьби)	$p$ (крок різьби)
1	1	4
2	1	1
3	0,5	4
4	0,5	1
5	0,75	2,5

Реалізація алгоритму, показаного на рисунку 3.7, буде наведена нижче для варіанта круглої різьби з параметрами  $p = 4$  мм,  $t = 1$  мм. Гайка з АКМ з круглою внутрішньою різьбою та металева вставка (абсолютно жорстке тіло) із зовнішньою різьбою були виконанні у вигляді 3D-CAD-моделей у графічному редакторі SOLIDWORKS, для скорочення часу розрахунків із з'єднання був вирізаний окремий сегмент, над яким і проводили всі подальші операції (рис. 3.8). Згідно з рекомендаціями зазначеними в праці Д. В. Криворучка [92], 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. 3.8).

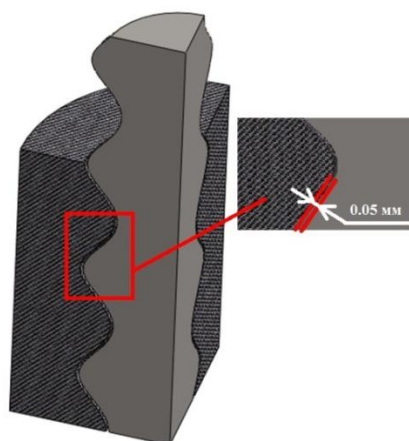


Рисунок 3.8 – 3D-CAD-модель з'єднання в графічному редакторі SOLIDWORKS

Створення скінченно-елементної сітки виконане засобами SOLIDWORKS, до складу якого входить модуль скінченно-елементного аналізу COSMOSWORKS, що має вбудований генератор поданої сітки. У нашому випадку використовували тетраедричні скінченні елементи (СЕ) з 10 вузлами (TYPE 10, згідно із класифікацією LS-DYNA). 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 поверхонь 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 3.9 подана СЕ сітка елементів запропонованого з'єднання.

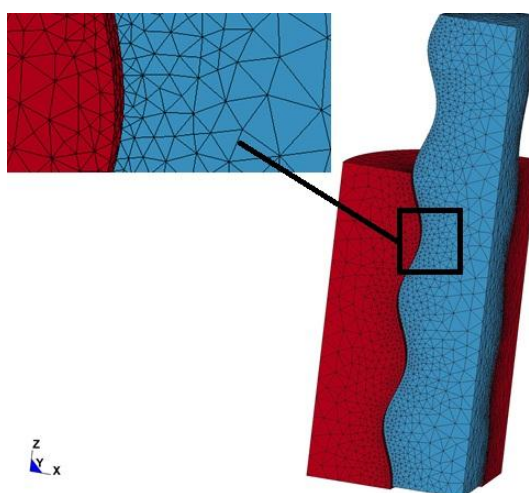


Рисунок 3.9 – Скінченно-елементна сітка елементів системи моделювання

У процесі створення скінченно-елементної сітки за допомогою модулю COSMOSWORKS було виявлено, що цей модуль не створює списку елементів моделі для командного файлу LS-DYNA. Було вирішено поставлену проблему таким чином: мовою програмування Python була написана керуюча програма для отримання списку елементів моделі із файлу середовища COSMOSWORKS. Текст цієї програми поданий у додатку Б.

Механічні граничні умови задавали жорстким закріпленням декількох границь гайки з АКМ. У цьому разі гайку жорстко закріплювали по зовнішній діаметральній поверхні (рис. 3.10). Для вставки задавали обмеження переміщення вздовж осей 1 та 2. Початкові умови для вставки задавали поступальним переміщенням її вздовж осі 3 з відповідною швидкістю.

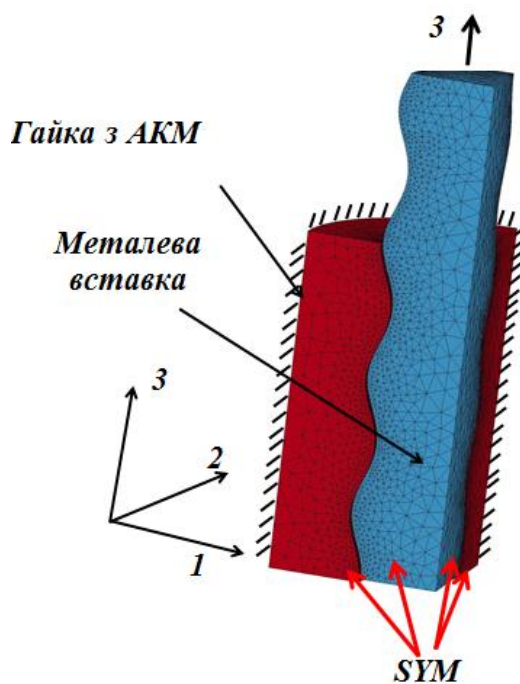


Рисунок 3.10 – Розрахункова схема та граничні умови моделі НДС з'єднання з армованих композиційних матеріалів

У процесі моделювання всі пружні та механічні характеристики армованого композиційного матеріалу (тобто створення моделі матеріалу) задавали як для лінійного пружного ортотропного тіла, уточнений розрахунок пружних характеристик відбувався за формулами 3.24-3.32. Що стосується внесення механічних характеристик запропонованої моделі матеріалу до командного файлу

LS-DYNA, було використано ключове слово для опису моделі матеріалу – це \*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE тип 22, яке дозволило в повному обсязі задати всі властивості армованого склопластикового матеріалу для моделювання. Цей тип матеріалу найкраще підходить для опису напружень та деформації композитного матеріалу в процесі його навантаження, через те що він враховує три типи руйнування шарів: розривання волокон при розтягуванні, розтріскування матриці та волокна при розтягуванні та стисканні. Цим типом матеріалу також враховують розділ моношарів при перевищенні допустимих дотичних та нормальних напружень [93]. У таблиці 3.3 наведений опис моделі матеріалу в командному файлі LS-DYNA.

Таблиця 3.3 – Опис моделей матеріалу в командному файлі LS-DYNA

<b>*MAT_COMPOSITE_DAMAGE</b>								
<b>MID</b>	<b>RO</b>	<b>E<sub>A</sub></b>	<b>E<sub>B</sub></b>	<b>E<sub>C</sub></b>	<b>PRBA</b>	<b>PRCA</b>	<b>PRCB</b>	<b>G<sub>AB</sub></b>
22	2,00*E <sup>-6</sup>	12688,09	12688,09	6538,42	0,13	0,22	0,22	2145,26
<b>G<sub>BC</sub></b>	<b>G<sub>CA</sub></b>	<b>K<sub>fail</sub></b>	<b>AOPT</b>	<b>MACF</b>	–	–	–	–
1827,09	1827,09	0	2,0	1,0	–	–	–	–
<b>X<sub>P</sub></b>	<b>Y<sub>P</sub></b>	<b>Z<sub>P</sub></b>	<b>A<sub>1</sub></b>	<b>A<sub>2</sub></b>	<b>A<sub>3</sub></b>	–	–	–
0	0	0	1,000	0	0	–	–	–
<b>V<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>D<sub>1</sub></b>	<b>D<sub>2</sub></b>	<b>D<sub>3</sub></b>	<b>BETA</b>	–	–
0	0	0	0	1,0	0	0	–	–
<b>S<sub>C</sub></b>	<b>X<sub>T</sub></b>	<b>Y<sub>T</sub></b>	<b>Y<sub>C</sub></b>	<b>ALPH</b>	<b>S<sub>N</sub></b>	<b>S<sub>YZ</sub></b>	<b>S<sub>ZX</sub></b>	–
50,0	195,0	195,0	80,0	0	-	-	-	–
<b>Змінна</b>	<b>Опис</b>							
MID	Ідентифікатор матеріалу. Номер згідно класифікатору LS-Dyna							
RO	Густина, кг/м <sup>3</sup>							
E <sub>A</sub>	E <sub>1</sub> модуль Юнга в напрямку осі 1, МПа							
E <sub>B</sub>	E <sub>2</sub> модуль Юнга в напрямку осі 2, МПа							
E <sub>C</sub>	E <sub>3</sub> модуль Юнга в напрямку осі 3, МПа							
PRBA	ν <sub>21</sub> коефіцієнт Пуассона в площині 21							
PRCA	ν <sub>31</sub> коефіцієнт Пуассона в площині 31							
PRCB	ν <sub>32</sub> коефіцієнт Пуассона в площині 32							
G <sub>AB</sub>	G <sub>12</sub> модуль здвигу в площині 12, МПа							
G <sub>BC</sub>	G <sub>23</sub> модуль здвигу в площині 12, МПа							
G <sub>CA</sub>	G <sub>31</sub> модуль здвигу в площині 12, МПа							
K <sub>fail</sub>	Об'ємний модуль руйнування матеріалу							
AOPT	Вибір розміщення осей матеріалу, (детальніше [93])							

Продовження таблиці 3.3

MACF	Зміна осей матеріалу для елементів типу «брусок», (детальніше [93])
$X_P, Y_P, Z_P$	Координати точки <b>P</b> для опції AOPT=1, (детальніше [93])
$A_1, A_2, A_3$	Компоненти вектора <b>a</b> для опції AOPT=2, (детальніше [93])
$V_1, V_2, V_3$	Компоненти вектора <b>v</b> для опції AOPT=3, (детальніше [93])
$D_1, D_2, D_3$	Компоненти вектора <b>d</b> для опції AOPT=2, (детальніше [93])
BETA	Кут в градусах для опції AOPT=3, (детальніше [93])
$S_C$	Міцність на здвиг в площині 12, (детальніше [93]), ГПа
$X_T$	Міцність при повздовжньому розтягуванні по осі 1, (детальніше [93]), ГПа
$Y_T$	Міцність при поперечному розтягуванні по осі 2, (детальніше [93]), ГПа
$Y_C$	Міцність при поперечному стисканні по осі 2, (детальніше [93]), ГПа
ALPH	Параметр напруження здвиг, (детальніше [93])
$S_N$	Міцність при розтягуванні по нормалі, ГПа
$S_{YZ}$	Міцність при поперечному згині, ГПа
$S_{ZX}$	Міцність при поперечному згині, ГПа

Функцію \*HOURGLASS в цьому випадку 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 використано ключове слово \*MAT\_RIGID – модель матеріалу тип 20. Деталі, що описані цим матеріалом, вважаються абсолютно твердими тілами.

Форму контакту під час моделювання задавали як початковий зсув (тобто зазор та початкове зміщення не враховували), 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 стійке розв'язання контактної задачі.

Модель тертя вважалася такою: було зазначено, що тертя, яке відбувається між елементами з'єднання, – це кулонівське тертя, основний параметр, що потрібен був для моделювання, – це коефіцієнт тертя, який знаходили експериментально за рахунок визначення кута тертя. В нашому випадку ми не враховували різницю між тертям ковзанням і тертям спокою, також немає залежності від швидкості ковзання.

Для кожного з елементів системи моделювання був створений окремий командний файл, з описом усіх ключових слів які задають необхідні параметри. Текст даних командних файлів поданий у додатку А. Далі відбувалося складання об'єктів у цілісну систему. За допомогою ключового слова \*INCLUDE файли об'єктів підключали до єдиного командного файлу. У поданому файлі «2.k» є файлом з інформацією про металеву вставку із зовнішньою різьбою, «3.k» – файлом з інформацією про гайку з АКМ із внутрішньою різьбою. В результаті розрахунку ми повинні отримати тензори напружень в гауссових точках скінченних елементів. Достовірні результати можемо одержати лише шляхом знаходження середніх полів напружень за відповідний проміжок часу. Для цього був створений мовою програмування Intel FORTRAN 10.1 спеціальний модуль пост обробки результатів (додаток В).

Для оброблення файл із моделями, збережений у форматі «.k», переносять у систему скінченно-елементного аналізу LS-DYNA. Для цього вибирають відповідний каталог і відповідно сам файл у ньому. Після цього для запуску розрахунку необхідно натиснути кнопку «Run», і система автоматично проводить розрахунки. Після закінчення розрахунків системою в обраній раніше папці автоматично зберігаються файли з результатами, які налаштовані на роботу в постпроцесорі LS-PrePost-2.4.

Графічні модулі постпроцесора LS-PrePost-2.4 дозволяють нам побудувати графік залежності результуючої сили від переміщення, але в цьому разі графік, одержаний за допомогою зазначених модулів, не відповідає дійсності. Оскільки на початковому етапі моделювання, щоб прискорити час розрахунків, була взята для роботи четверта частина з'єднання, а отже, для повних показників сили потрібно одержані значення збільшити в 4 рази. На рисунку 3.11 показаний графік залежності результуючої сили від переміщення, виконаний у табличному процесорі MS-Excel для роботи з електронними таблицями.

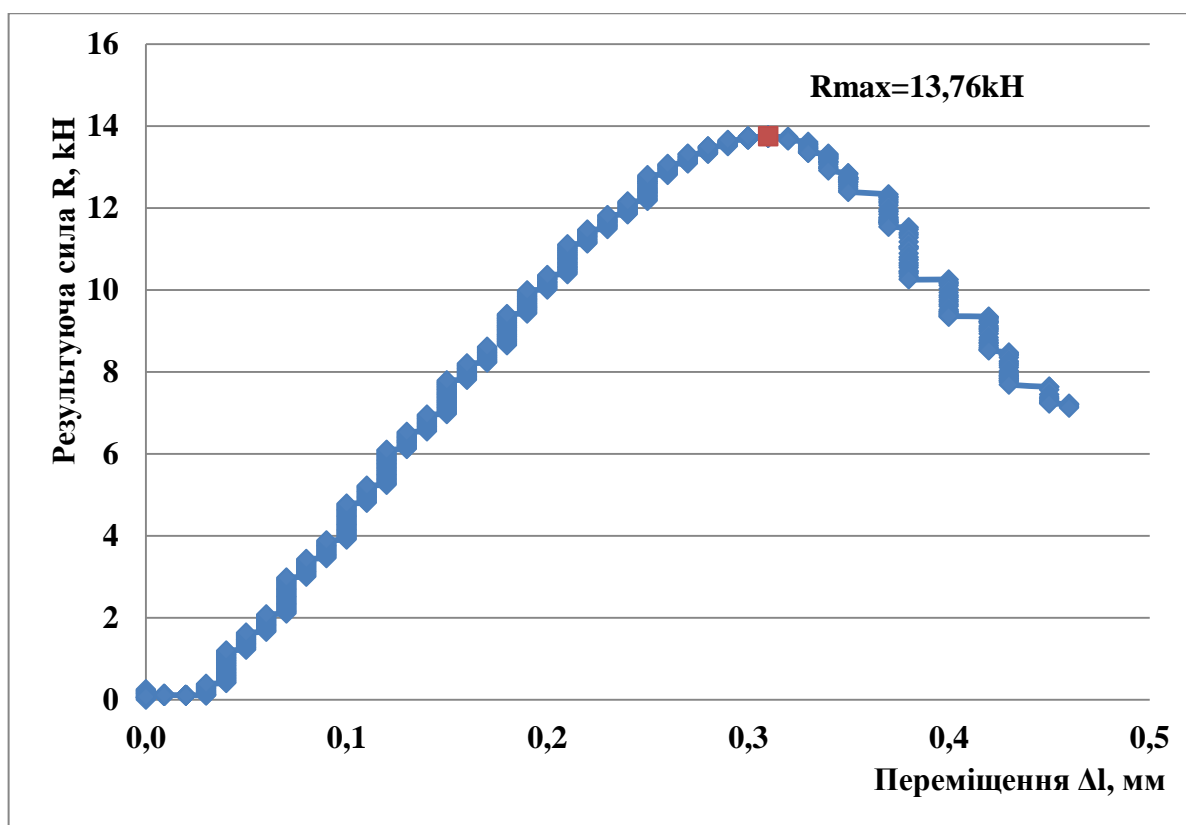


Рисунок 3.11 – Графік залежності результуючої сили від переміщення  
( $p = 4$  мм,  $t = 1$  мм)

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

Після одержання показників міцності за граничною воздією для першого випадку з'єднання з основними параметрами, зазначеними в таблиці 3.2, проведемо моделювання для всіх інших випадків відповідно до даних таблиці. Всі одержані значення сили в процесі моделювання занесені до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення сили, одержані для кожного випадку в процесі моделювання

№	t (глибина профілю різьби)	p (крок різьби)	$R_{сер}$ , кН
1	1	4	13,76
2	1	1	11,12
3	0,5	4	10,00
4	0,5	1	10,32
5	0,75	2,5	14,00

Рисунок 3.12 наглядно ілюструє одержанні в результаті моделювання методом скінченно-елементного аналізу середні значення сили для кожного конкретного випадку.



Рисунок 3.12 – Середні показники сили, одержані в результаті моделювання

На рисунку 3.13 показані показники дотичних напружень між шарового здвигу  $\tau$  для варіанта  $p = 4 \text{ мм}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$  залежно від часу дії навантаження.

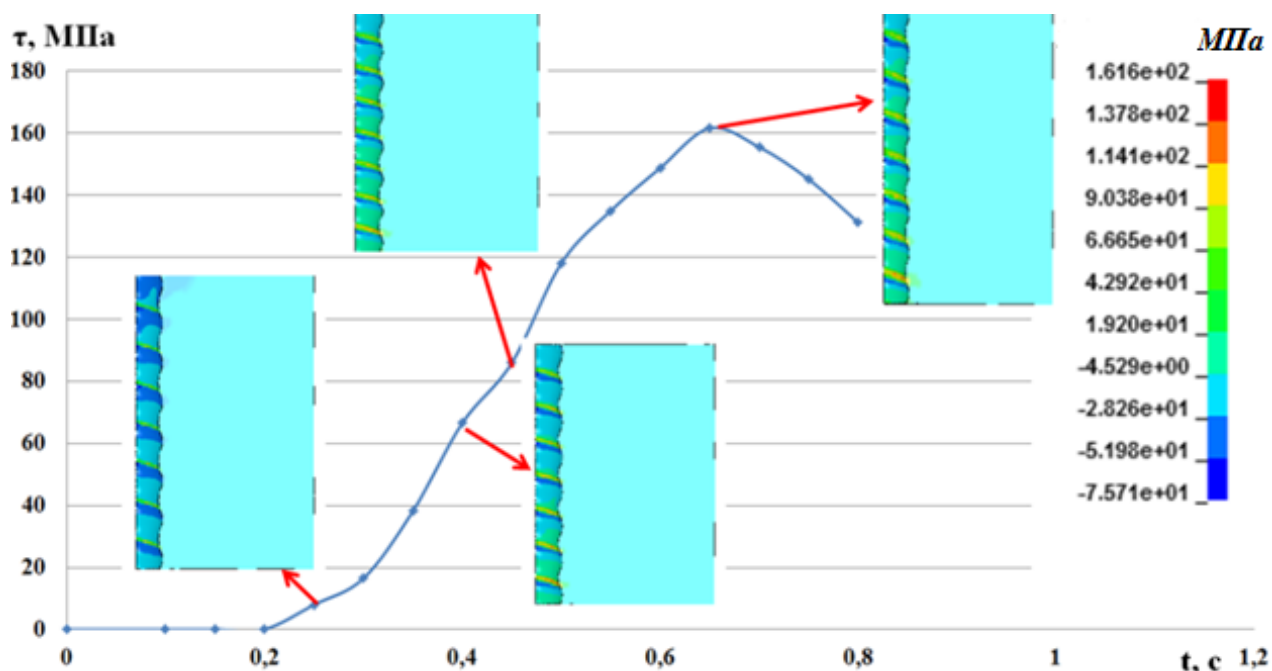


Рисунок 3.13 – Показники дотичних напружень між шарового здвигу в середовищі LS-DYNA ( $p = 4 \text{ мм}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$ )

На рисунку 3.14 показані показники дотичних напружень по осі 3 глобальної системи координат  $\tau_3$  для варіанта  $p = 4 \text{ мм}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$  залежно від часу дії навантаження.



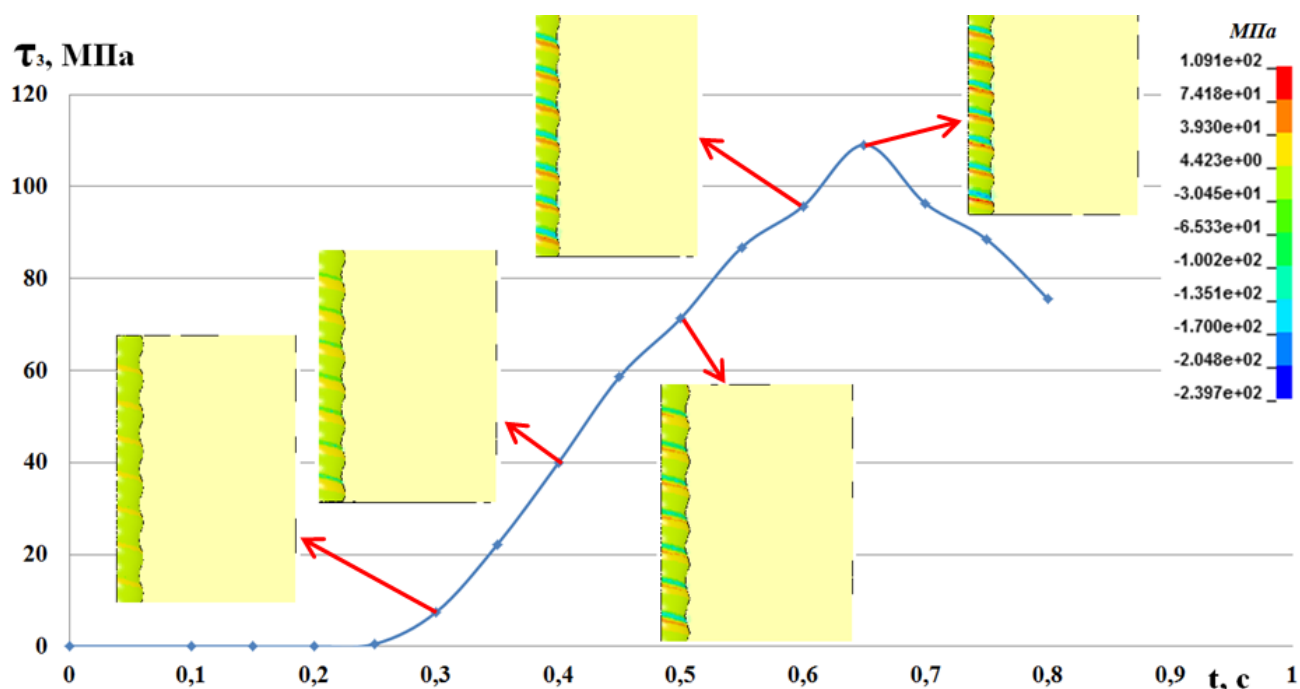


Рисунок 3.14 – Показники дотичних напружень по осі 3 глобальної системи координат  $\tau_3$  в середовищі LS-DYNA ( $p = 4 \text{ мм}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$ )

На рисунку 3.15 показані показники дотичних напружень в координатній площині 12  $\tau_{12}$  для варіанта  $p = 4 \text{ мм}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$  залежно від часу дії навантаження.

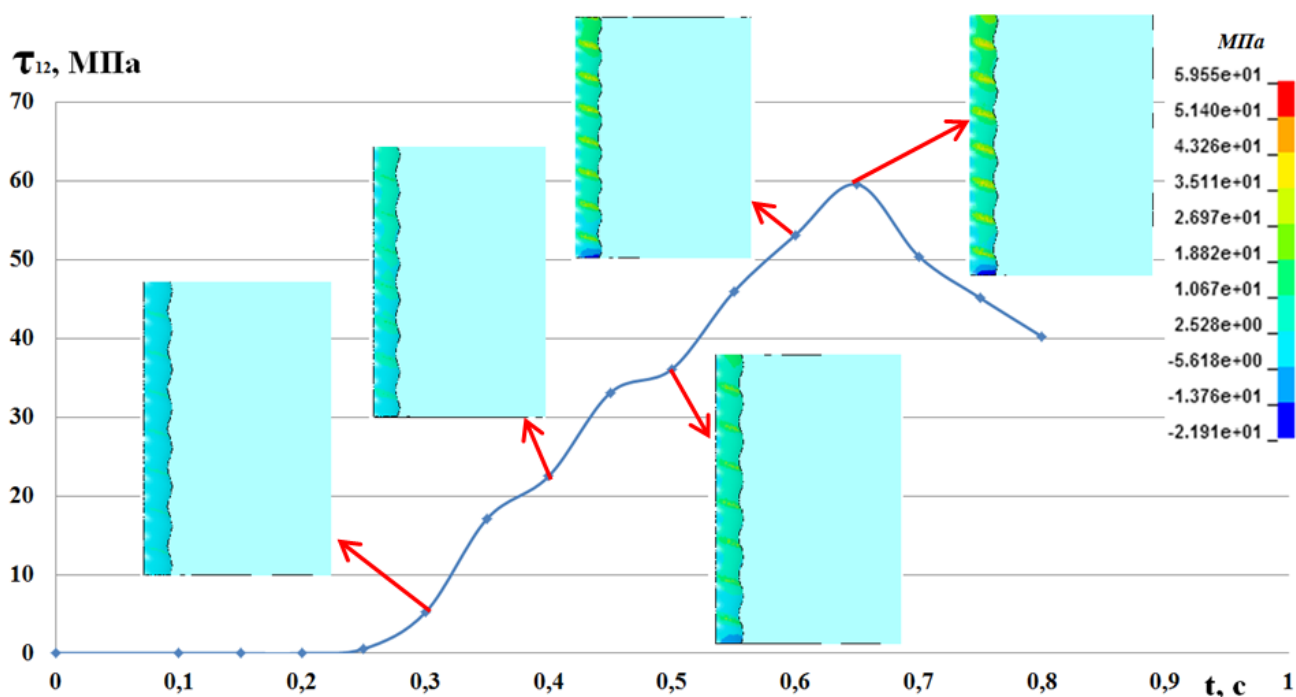


Рисунок 3.15 - Показники дотичних напружень в координатній площині 12  $\tau_{12}$  в середовищі LS-DYNA ( $p = 4 \text{ мм}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$ )

Одержані в результаті моделювання дані показують, що запропоноване гвинтове з'єднання з круглою різьбою, виготовленою в АКМ, має досить хороші показники міцності, а отже, запропонована на початку гіпотеза була підтверджена моделюванням, але для одержання достовірних даних потрібно виконати і натурний експеримент для перевірки адекватності скінченно-елементної моделі.

### **Висновки до розділу 3**

1 Проведений аналіз методів дослідження напружено-деформованого стану основних типів з'єднань деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, на основі якого для моделювання НДС запропонованого з'єднання з круглою різьбою був обраний метод скінченно-елементного аналізу.

2 Отримана система визначальних рівнянь для математичного формулювання моделі напружено-деформованого стану різьбового з'єднання з круглою різьбою, для подальшого її розв'язання методом скінченно-елементного аналізу з інтеграцією за часом явним методом за допомогою пакета LS - DYNA компанії LSTC.

3 Створення математичного опису моделі армованого композиційного матеріалу, дозволило, внести дані про матеріал у систему моделювання, що дало можливість у подальшому визначити основні характеристики міцності з'єднання з круглою різьбою методом скінченно-елементного аналізу.

4 Моделювання напружено-деформованого стану гвинтового з'єднання з круглою різьбою, виготовленого в АКМ, методом скінченно-елементного аналізу, дозволило одержати основні показники міцності даного з'єднання та підтвердити поставлену на початку гіпотезу, що міцність гвинтового з'єднання при використанні круглого профілю різьби буде значно вищою, ніж у випадках з іншими профілями. Одержані в результаті моделювання сили, які і визначають міцність з'єднання, коливаються в середньому від 10 до 14 кН, що є досить непоганим показником міцності для роз'ємного з'єднання, виконаного в армованому композиті.

## РОЗДІЛ 4

### ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ РОЗ'ЄМНОГО ГВИНТОВОГО З'ЄДНАННЯ З КРУГЛОЮ РІЗЬБОЮ, ФОРМОУТВОРЕНОГО В АРМОВАНОМУ КОМПОЗИЦІЙНОМУ МАТЕРІАЛІ

Останнім часом питанням дослідження міцності конструкцій і з'єднань деталей з армованих композиційних матеріалів в Україні та в усьому світі приділяється досить значна увага. Більшість експериментальних досліджень проводять для визначення напружено-деформованого стану класичних з'єднань деталей з АКМ, таких як болтові, заклепкові, клейові. Детально результати деяких із них описані в працях [94, 95, 96]. Що стосується експериментального дослідження НДС гвинтових з'єднань, то результати – набагато скромніші. Можливо, це пов'язано з тим, що досі не вдавалося отримати гвинтове з'єднання з достатніми показниками міцності. Але дослідження проводять. Наприклад, найновітнішими експериментальними дослідженнями міцності гвинтових з'єднань в армованих композиційних матеріалах є дослідження Richard Zemann [97], який визначав міцність з'єднання, виконаного у вуглепластиковому армованому композиті. Автор досліджував міцність метричних різьб M8x1,25 та M5x0,8 згідно з ISO 724:1993 [91], які нарізували ручним мітчиком в армованому вуглепластиковому матеріалі, після чого проводили дослідження за відповідною методикою з використанням спеціального обладнання (детальніше [97]). Відповідно до поданої праці показники міцності виявилися на невисокому рівні, середній показник для різьби M5x0,8 становить  $R_{\text{ср}} = 4,42$  кН.

Також використання круглої різьби у гвинтовому з'єднанні деталей, виготовлених з АКМ, дозволило одержати досить високі показники міцності цього з'єднання, які були встановлені за рахунок моделювання методом скінченно-елементного аналізу (більш детально описано в пункті 3.4). Але для отримання цілісної картини поведінки напружено-деформованого стану в з'єднанні необхідно провести і практичну перевірку, та отримати експериментальні дані. Адже

будь-яке нове технічне рішення вимагає практичної перевірки, і наш випадок не є винятком. Саме тому і була проведена практична перевірка міцності з'єднання з одержанням основних показників для їх подальшого порівняння з результатами моделювання.

#### 4.1 Практична реалізація дослідження міцності роз'ємного гвинтового з'єднання в деталях з армованого композиційного матеріалу

Практична перевірка міцності з'єднання була проведена виконанням експериментального дослідження з одержанням показника міцності (несучої здатності) для кожного випадку з'єднання з відповідними змінними параметрами. Під час експерименту змінювалися аналогічні параметри, як і при моделюванні, а саме це основні параметри круглої різьби:  $p$  – крок різьби та  $t$  – глибина профілю різьби.

Для реалізації перевірки необхідно було виготовити елемент з'єднання із зовнішньою різьбою. Цю різьбу нарізали на металевих вставках, в яких основні параметри змінювалися також відповідно до даних моделювання. Профіль круглої зовнішньої різьби з основними параметрами показаний на рисунку 4.1.

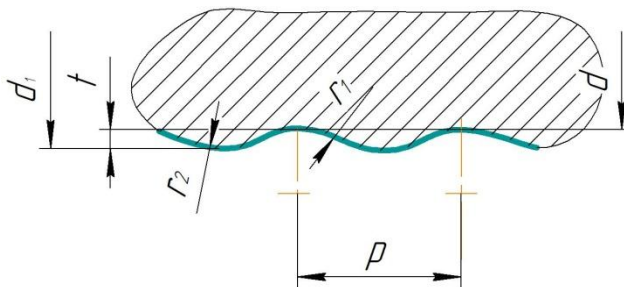


Рисунок 4.1 – Профіль круглої різьби із зазначенням усіх основних параметрів:

$d_1$  – зовнішній діаметр різьби;  $d$  – внутрішній діаметр різьби;  $t$  – глибина профілю;

$p$  – крок різьби;  $r_1$  та  $r_2$  – радіуси западин і виступів різьби

Зазначені для експерименту параметри даних різьб та межі їх варіювання подані в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Параметри, що змінювалися під час експерименту

Параметр, що змінювався	Позначення	Межа варіювання
Глибина профілю різьби	$t$	0,5 – 1,0
Крок різьби	$p$	1,0 – 4,0

Зазначені металеві вставки виготовляли раніше відомим способом [98] з конструкційної сталі, марка сталі «Сталь 45», ескіз цієї вставки поданий на рисунку 4.2 а, фото «вставки круглої різьби» з кроком 4 мм та глибиною профілю 1 мм на рисунку 4.2 б. Перед нарізуванням різьби металеві вставки обробляли на токарному верстаті до діаметру 6,2 мм. Схема формоутворення різьби подана на рисунку 4.3 а, фото цього процесу – на рисунку 4.3 б.

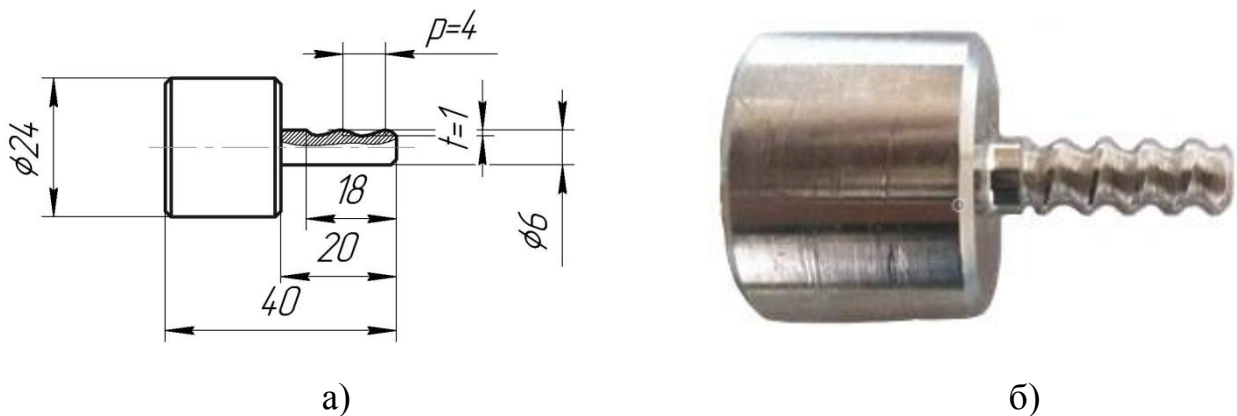


Рисунок 4.2 – Металева вставка круглої зовнішньої різьби: а) ескіз металевої вставки; б) фото вставки [99]

Спрощена кінематика процесу формоутворення гвинтової поверхні механічним обробленням на металевих вставках має такий вигляд: різальному інструменту надають прямолінійного руху вздовж осі заготовки, обертання щодо власної осі та колового руху навколо осі заготовки, узгодженого з прямолінійним рухом різального інструмента вздовж осі заготовки таким чином, що за один коловий рух інструменту надають прямолінійного руху вздовж осі заготовки на величину, що дорівнює кроку  $p$  різьби. Крім того, вісь заготовки розміщують паралельно до осі обертання різального інструмента, за різальний інструмент використовують однозубий різальний інструмент, який формує діаметр  $d_{інстр}$ , що дорівнює сумі внутрішнього діаметра різьби  $d_I$  та глибини профілю різьби  $t$  [99].

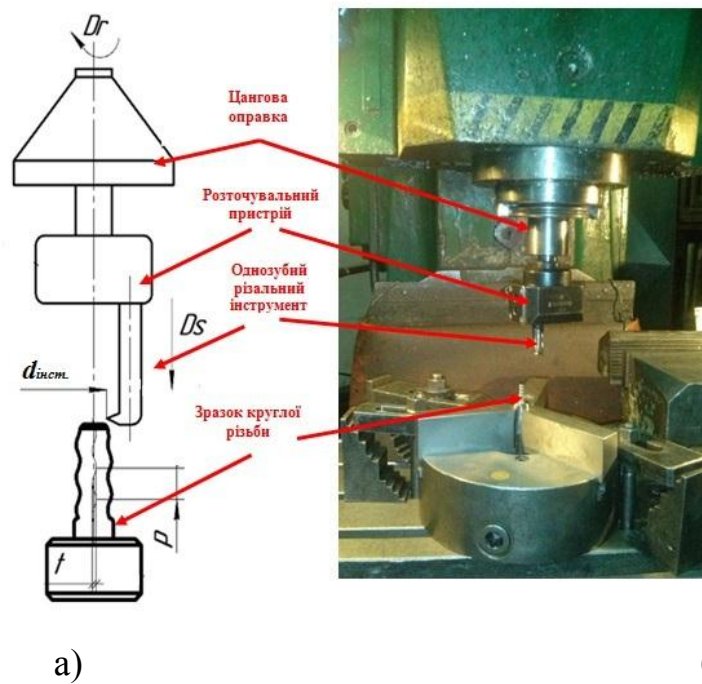


Рисунок 4.3 – Процес формоутворення круглої зовнішньої різьби:

а) спрощена схема формоутворення різьби; б) фото процесу формоутворення різьби [99]

Величина діаметра  $d_{инстр}$  інструмента для оброблення круглої різьби визначається за формулою

$$d_{инстр.} = d_1 + t. \quad (4.1)$$

де  $d_1$  – внутрішній діаметр різьби, мм;

$t$  – глибина профілю різьби, мм.

Спосіб реалізують на трикоординатному верстаті з ЧПК 6P13Ф3, в шпинделі якого встановлюють цангову оправку із закріпленим у ній розточувальним пристроєм та однозубим інструментом (рис. 4.3 б).

Обробляють круглу зовнішню різьбу з однієї установки заготовки, зовнішній діаметр можна не виконувати, але фаску для заходу різьби потрібно виконати. Для цього способу не обов'язковим є виконання канавки для виходу інструмента.

Режими оброблення вибирають згідно з рекомендованими режимами для однозубого інструмента залежно від оброблюваного матеріалу заготовки.

Обробляють різьбу у такій послідовності:

1 На прискореному переміщенні уздовж осі заготовки 1 підводять однозубий інструмент до заготовки у вихідну позицію.

2 Задають інструменту обертання навколо власної осі, яке забезпечує головний рух різання  $D_r$ .

3 Задають інструменту колового руху навколо осі заготовки, узгодженого з прямолінійним рухом  $D_s$ . За один коловий рух інструмент переміщується уздовж осі заготовки на величину кроку  $p$  мм різьби. Діаметр колового руху інструмента дорівнює  $t$  глибині профілю різьби. Інструмент на робочій подачі  $S$  переміщують вздовж осі заготовки на задану глибину  $L$ .

4 Реверсують траєкторію переміщення вздовж осі заготовки і виводять інструмент із різьбової зовнішньої поверхні на прискореній подачі в початкове положення. Діаметр колового руху при виведенні з різьбової зовнішньої поверхні дорівнює глибині профілю різьби  $t$  [99].

На основі формули 4.1 та обравши всі необхідні значення кроку різьби  $p$  і глибини профілю різьби  $t$  було розраховано діаметр інструмента, який потрібно налагоджувати на розточувальному пристрої. Усі подальші розрахунки занесені до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунковий діаметр фрези та обрані значення параметрів

№	$t$	$p$	Діаметр циліндричної поверхні
1	1,0	4,0	5,0
2	1,0	1,0	5,0
3	0,5	4,0	5,5
4	0,5	1,0	5,5
5	0,75	2,5	5,25

Внутрішня кругла різьба з аналогічними параметрами (табл. 4.2) була виготовлена в склопластиковій пластині, армованій у двох взаємно перпендикулярних напрямках, схема армування подана на рисунку 4.4 а, фото самої пластини з розмірами – на рисунку 4.4 б. Технологія оброблення круглої внутрішньої різьби в АКМ детально описана в розділі 2.

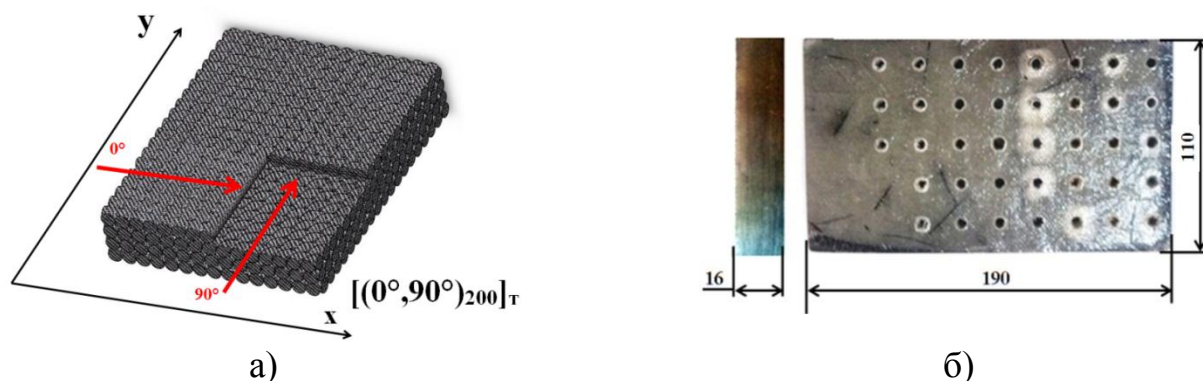


Рисунок 4.4 – Склопластикова пластина: а) схема армування пластини; б) фото пластини

Кругла внутрішня різьба формоутворювалася в 5 отворах для кожного випадку з ідентичними основними параметрами. Перед нарізанням гвинтової поверхні в пластині було просвердлено 40 отворів діаметром 5 мм для формоутворення запропонованої поверхні. Після виконання внутрішньої гвинтової поверхні металеву вставку для кожного конкретного випадку закручували в отвір із відповідною різьбою в пластині.

Далі проводилося експериментальне випробування даного роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою на міцність. Досліджували з використанням універсальної розривної машини Р20 сертифікованої лабораторії Сумського державного університету. Фото проведення експериментального дослідження наведене на рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – Фото проведення експериментального дослідження міцності роз'ємного гвинтового з'єднання з круглою різьбою [100]



У результаті проведених досліджень одержані значення руйнуючої сили для кожного випадку, ці значення та середнє значення сили занесені до таблиці 4.3.

Середнє значення сили  $R_{сер}^{exp}$  для кожного випадку розраховували за формулою

$$R_{сер}^{exp} = \frac{R_1^{exp} + R_2^{exp} + R_3^{exp} + R_4^{exp} + R_5^{exp}}{5}. \quad (4.1)$$

Таблиця 4.3 – Значення сили, одержані для кожного випадку в процесі експерименту [100]

№	$R_1^{exp}$ , кН	$R_2^{exp}$ , кН	$R_3^{exp}$ , кН	$R_4^{exp}$ , кН	$R_5^{exp}$ , кН	$R_{сер}^{exp}$ , кН
1	14,4	14,0	13,5	13,5	13,7	13,82
2	13,0	12,0	11,7	12,0	13,0	12,34
3	9,2	9,0	11,0	10,4	10,2	9,96
4	12,2	12,5	12,6	12,2	8,0	11,5
5	15,0	14,6	13,0	12,4	13,7	13,74

На рисунку 4.6 наведена діаграма, яка наглядно ілюструє середнє значення сили для кожного конкретного випадку, номери стовпців діаграми відповідають номеру випадку з таблиці 4.2.



Рисунок 4.6 – Середні значення сили для кожного випадку

Згідно з одержаними експериментальними даними ілюстрованими на рисунку 4.6, ми бачимо що найбільше значення сили, а отже, і найкращі показники міцності одержано для першого випадку, в якому основні параметри різьби мають такі значення:  $p = 4$  мм,  $t = 1$  мм.

## 4.2 Перевірка адекватності результатів експериментального дослідження

Згідно з пунктом 4.1, для одержання показників міцності основні параметри запропонованого з'єднання для проведення дослідження вибирали за конкретною схемою, що підходить для повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання. У нашому випадку побудова матриці повного факторного експерименту була реалізована на двох рівнях за двома факторами. Таким чином була реалізована матриця типу  $2^2$  [101]. У таблиці 4.4 подане кодування факторів, які в нашому випадку змінювалися.

Таблиця 4.4 – Кодування факторів

Фактор, що змінюється:	Позначення	Межа варіювання	Кодове позначення	Нижній рівень	Верхній рівень	Нульовий рівень
Глибина профілю різьби	t	0,5-1,0	$x_1$	0,5	1,0	0,75
Крок різьби	p	1,0-4,0	$x_2$	1,0	4,0	2,5

Умова, яка обов'язково виконувалася в процесі реалізації зазначеного експерименту:

$$0,5 \leq x_1 \leq 1,0;$$

$$1,0 \leq x_2 \leq 4,0.$$

Матриця планування експерименту типу  $2^2$  подана в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Матриця планування експерименту типу  $2^2$

№ експерименту	$x_1$	$x_2$	t	p
1	+	+	1,0	4,0
2	+	-	1,0	1,0
3	-	+	0,5	4,0
4	-	-	0,5	1,0
5	0	0	0,75	2,5

Усі подальші розрахунки проводили згідно з методикою описаною для перевірки адекватності результатів експерименту в [101].

Розраховували коефіцієнти рівняння регресії, а також перевіряли відтворюваність дослідів. При однаковій кількості паралельних дослідів та при

кожному поєднанні рівнів факторів відтворюваність процесу перевіряється за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{s_{u_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^n s_u^2} \leq G_{(0,05; f_n; f_u)}, \quad (4.2)$$

де  $s_u^2$  – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $u$ -му поєднанні дослідів, розраховується за формулою (4.3);  $p = 1, 2, \dots, m$  – кількість паралельних дослідів;  $s_{u_{\max}}^2$  – найбільша з дисперсій у рядках плану;  $G_{(0,05; f_n; f_u)}$  – табличне значення критерію Кохрена при 5 % рівні значущості;  $f_n = n$  – число незалежних оцінок дисперсії;  $f_u = m-1$  – число ступенів вільності кожної оцінки.

$$s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - \bar{y}_u)^2}{m-1}. \quad (4.3)$$

Процес вважається відтворюваним, якщо виконується нерівність (4.2). При цьому дисперсію відтворюваності (похибку дослідів) визначаємо за формулою

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n}, \quad (4.4)$$

Якщо рівняння (4.4) не виконується, то потрібно вжити заходи щодо уточнення вимірів у досліді з максимальною дисперсією.

У нашому випадку величину  $y_u$  визначали по п'ять разів. Тому значення оцінок дисперсії в кожній точці можна розрахувати за формулою

$$s_u^2 = \frac{\Delta^2}{2}, \quad (4.5)$$

де  $\Delta$  – різниця між паралельними дослідями.

Отже,  $s_1^2 = 0,08$ ,  $s_2^2 = 0,50$ ,  $s_3^2 = 0,02$ ,  $s_4^2 = 0,045$ ,  $s_5^2 = 0,08$ ,

$$G = 0,6896 \leq 0,8772.$$

Процес відтворюється, оскільки виконується нерівність (4.2), за цих умов дисперсія відтворюваності (похибка досліду)  $s_y^2 = 0,145$ .

Рівняння регресії матиме такий вигляд:

$$y = R = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot p + b_{12} \cdot t \cdot p + b_3 \cdot t^2. \quad (4.6)$$

Визначення коефіцієнтів рівняння (4.6) виконано методом найменших квадратів за рахунок мінімізації функціонала

$$\Phi = \sum_{u=1}^n (R(b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_3)) \rightarrow \min. \quad (4.7)$$

Розв'язавши рівняння (4.7), одержимо залежність для F, значення коефіцієнтів для нашого випадку будуть такими:  $b_0 = -2,49$ ,  $b_1 = 43,68$ ,  $b_2 = -1,52$ ,  $b_{12} = 2,0$ ,  $b_3 = -29,34$ .

Згідно із значеннями, які ми одержали, рівняння для перевірки адекватності моделі для нашого випадку матиме такий вигляд:

$$y = R = -2,49 + 43,68 \cdot t - 1,52 \cdot p + 2,0 \cdot t \cdot p - 29,34 \cdot t^2. \quad (4.8)$$

Перевірку адекватності лінійної моделі виконуємо за допомогою критерію Фішера. Модель адекватна, якщо виконується нерівність

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}, \quad (4.9)$$

де  $s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1}$ ;  $y_u$  – розрахункове значення відклику на  $u$ -му досліді;

$F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}$  – критерій Фішера при 5 % рівні значущості;  $f_{ad} = n - k - 1$  – число ступенів вільності дисперсії адекватності;  $f_y$  – число ступенів вільності дисперсії відтворення.

Перевірку адекватності виконуємо таким чином: згідно з одержаним рівнянням (4.7) отримуємо розрахункові значення  $y_u$ . Всі подальші розрахунки заносимо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Перевірка адекватності моделі

Дослід	$\bar{y}_u = R_{\text{сер.експ.}}$	$y_u = R_{\text{сер.розр.}}$	$(\bar{y}_u - y_u)^2$
1	13,82	13,82	$7,9 \cdot 10^{-8}$
2	12,34	12,34	$1,2 \cdot 10^{-8}$
3	9,84	9,96	$4,0 \cdot 10^{-8}$
4	11,50	11,50	$1,5 \cdot 10^{-7}$
5	13,74	13,74	$9,6 \cdot 10^{-7}$

Критерій Фішера набуває значення при  $s_{ad}^2 = 6,2 \cdot 10^{-7}$ ,  
 $F = \frac{6,2 \cdot 10^{-7}}{0,145} = 4,29 \cdot 10^{-6} \leq 6,6079$ , модель є адекватною.

Похибка одержаних значень для визначення допустимої сили для даного з'єднання сягає менше ніж 1 %.

На рисунку 4.7 наведений графік функції (4.8) що залежить від  $p$  – кроку різьби та  $t$  – глибини профілю різьби, а також на цьому графіку показані граничні точки, в межах яких змінюється подана функція. Графік виконаний у середовищі програмного продукту MatLab для демонстрації поверхні всіх допустимих значень одержаної функції.

Для одержання значення основних параметрів, за яких показники міцності будуть найвищими, необхідно знайти екстремуми функції (4.8). Провівши відповідні розрахунки, були визначені екстремуми функції. Відповідно до розрахунків максимальні показники міцності будуть для гвинтового з'єднання з такими основними параметрами: значення кроку різьби –  $p = 4$  мм, а значення глибини профілю різьби –  $t = 0,9$  мм [100].

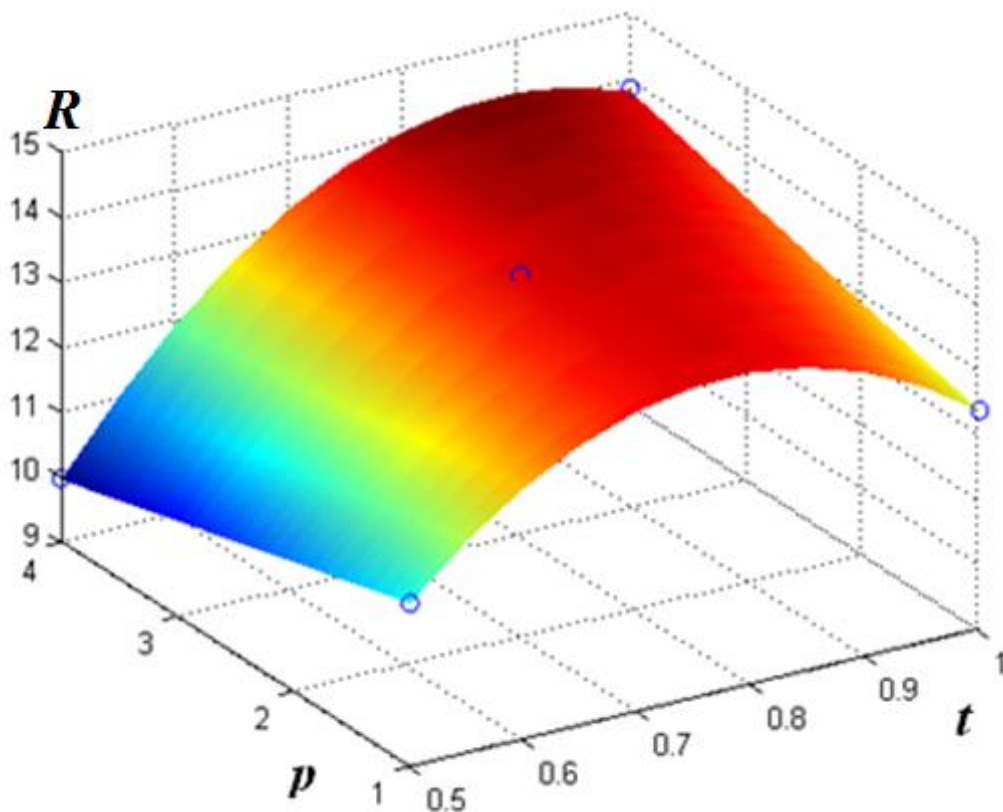


Рисунок 4.7 – Графік функції в середовищі програмного продукту MatLab [100]

## Висновки до розділу 4

1 Практична перевірка міцності гвинтового з'єднання з круглою різьбою деталей, виготовлених з АКМ, підтвердила одержані в результаті моделювання високі показники міцності для даного типу з'єднань. Практичні значення сили, які були визначені в процесі експериментального дослідження, коливаються в середньому від 10 до 14 кН, що є досить непоганим показником міцності для гвинтового з'єднання, виконаного в армованому композиті.

2 Перевірка адекватності результатів експериментального дослідження показала, що одержана в результаті дослідження модель є адекватною відповідно до всіх параметрів. Похибка одержаних значень допустимої сили для цього з'єднання з різними основними параметрами сягає менше 1 %. Відповідно до проведених розрахунків на основі одержання екстремумів функції залежності основних параметрів круглої різьби одне від одного, максимальні показники міцності будуть для гвинтового з'єднання з такими основними параметрами: значення кроку різьби –  $p = 4 \text{ мм}$ , а значення глибини профілю різьби –  $t = 0,9 \text{ мм}$ .

## РОЗДІЛ 5

**РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ  
РОЗ'ЄМНОГО ГВИНТОВОГО З'ЄДНАННЯ З КРУГЛОЮ РІЗЬБОЮ В  
ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**5.1 Вплив пружних характеристик армованого композиційного матеріалу на міцність гвинтового з'єднання з круглою різьбою**

Згідно з розрахунковими залежностями С. М. Верещаки для односпрямованого ортотропного матеріалу найбільший вплив на пружні характеристики армованого композиту має параметр  $\psi_I$  – відносна площа арматури в площині перерізу в поздовжньому напрямку, методика визначення якого за ASTM D3171–15 [102].

На основі адекватності запропонованої імітаційної моделі було вирішено провести дослідження впливу відносної площі арматури в площині перерізу в поздовжньому напрямку  $\psi_I$  на несучу здатність гвинтового з'єднання з круглою різьбою. Для цього основні параметри запропонованого з'єднання для проведення дослідження вибирали за конкретною схемою, яка підходить для повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання. У нашому випадку побудова матриці повного факторного експерименту була реалізована на двох рівнях за двома факторами. Таким чином була реалізована матриця типу  $2^3$ . У зазначеному дослідженні глибина профілю різьби  $t$  змінювалася в межах  $0,5 \leq t \leq 1,0$ , крок різьби  $p$  – у межах  $1,0 \leq p \leq 4,0$ , а параметр  $\psi_I$  – в межах  $0,1 \leq \psi_I \leq 0,7$ . Далі на підставі розрахункових залежностей С. М. Верещаки [90] були одержані пружні характеристики для відповідного значення відносної площі арматури в площині перерізу в поздовжньому напрямку  $\psi_I$ , наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Пружні характеристики армованого матеріалу при зміні параметра  $\psi_I$

$\psi_I = 0,1$			$\psi_I = 0,4$			$\psi_I = 0,7$		
$E_1 = E_x,$ 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

## Продовження таблиці 5.1

$v_{21} = v_{yx}$	$v_{31} = v_{zx}$	$v_{32} = v_{zy}$	$v_{21} = v_{yx}$	$v_{31} = v_{zx}$	$v_{32} = v_{zy}$	$v_{21} = v_{yx}$	$v_{31} = v_{zx}$	$v_{32} = v_{zy}$
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

Моделювання відбувалося методом скінченно-елементного аналізу з використанням імітаційної моделі, розробленої в роботі, зі зміною основних параметрів відповідно до плану експерименту (табл. 5.2), в результаті були одержані значення максимальної сили для кожного конкретного випадку, занесені до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – План матриця експерименту

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	t	p	$\psi_1$	$R_{\max}$ , 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 подана у вигляді формули (5.1), коефіцієнти якого одержані методом найменших квадратів за рахунок мінімізації функціонала:

$$R_{\max} = 4,54tp\psi_1 - 89,74t^2 - 0,77tp - 15,38t\psi_1 - 3,8p\psi_1 + 138,44t + 1,09p + 26,53\psi_1 - 42,78. \quad (5.1)$$

Для одержання значення основних геометричних параметрів та пружних характеристик, за яких показники міцності будуть найвищими, необхідно знайти екстремуми функції (5.1). Провівши відповідні розрахунки, були визначені екстремуми функції. Відповідно до розрахунків максимальні показники міцності будуть для гвинтового з'єднання з такими основними геометричними параметрами:



значення кроку різьби –  $p = 4 \text{ мм}$ , а значення глибини профілю різьби –  $t = 0,8 \text{ мм}$ , значення відносної площі арматури в площині перерізу в поздовжньому напрямку  $\psi_1 = 0,7$  [102].

На рисунку 5.1 наведені графіки функції (5.1) залежності максимальної несучої здатності з'єднання від основних геометричних параметрів круглої різьби  $p$  – кроку різьби, та  $t$  – глибини профілю різьби і від значення відносної площі арматури в площині перерізу в поздовжньому напрямку  $\psi_1$  (що максимально впливає на показники пружних характеристик армованого матеріалу). Графіки виконані у середовищі програмного продукту MatLab для демонстрації всіх допустимих значень одержаної функції.

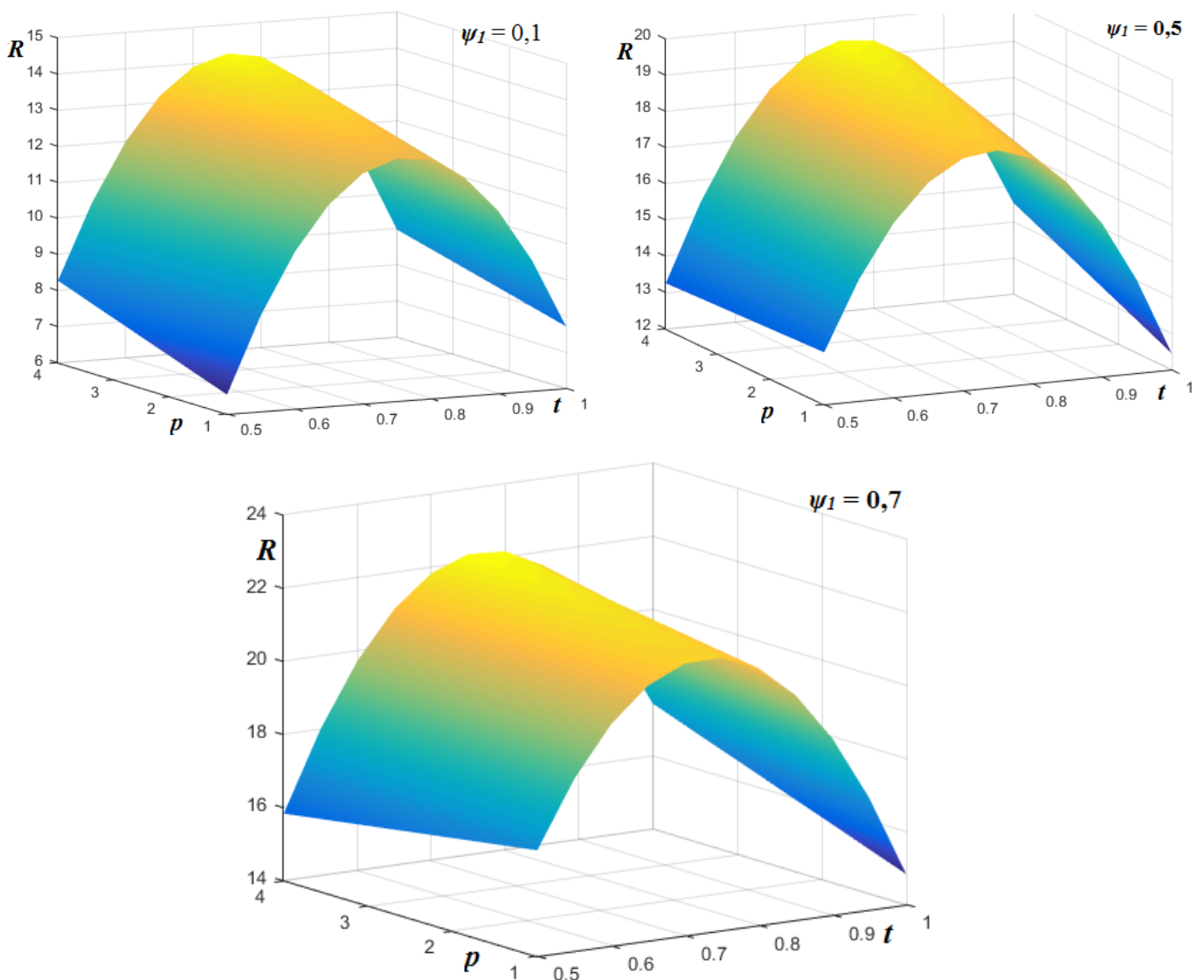


Рисунок 5.1 – Графіки залежності максимальної сили (несучої здатності з'єднання) від основних геометричних параметрів ( $p$ ,  $t$ ) та від показника відносної площі арматури в площині перерізу в поздовжньому напрямку ( $\psi_1$ )

## 5.2 Оцінювання похибки прямих вимірювань на основі розрахунку вибіркового стандартного відхилення даних експерименту

Проведемо оцінювання похибки прямих вимірювань на основі розрахунку вибіркового стандартного відхилення даних експерименту. Через малу кількість випробувань беремо медіану (напівсуму середніх членів варіаційного ряду результатів  $n$  вимірювань із парною кількістю членів), а не середнє арифметичне:

$$\bar{R} = \frac{R_{\text{mod}} + R_{\text{екс}}}{2} = \frac{13,7 + 13,82}{2} = 13,76 \text{ кН}. \quad (5.2)$$

Середнє квадратичне відхилення вибірки – мірило розпорошення випадкової величини вимірювання, що визначається за формулою (5.3) і дорівнює згідно з розрахунками  $\sigma_F = 0,349$  кН:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=6} (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} = 0,349 \text{ кН}. \quad (5.3)$$

Перейдемо від вибірки до генеральної сукупності за допомогою модифікованого симетричного  $t$ -розподілу. Для випадку нормального розподілу випадкової величини вона достовірна, якщо виконується нерівність

$$-\frac{h(P; f)}{\sqrt{n}} < \mu_F - \bar{R} < \frac{h(P; f)}{\sqrt{n}}, \quad (5.4)$$

де  $h$  – коефіцієнт Стьюдента;

$P$  – ймовірність реалізації;

$f = n - 1$  - кількість ступенів вільності;

$\mu_F$  – середнє значення генеральної сукупності.

Стандартне відхилення середнього значення визначають за формулою

$$\sigma_{\bar{R}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,349}{\sqrt{6}} = 0,142 \text{ кН}. \quad (5.5)$$

Тоді довірчий інтервал для медіани вибірки розраховують за формулою

$$(\bar{R} - t(0,95; 5) \times \sigma_{\bar{R}}; \bar{R} + t(0,95; 5) \times \sigma_{\bar{R}}) = (13,385; 14,135). \quad (5.6)$$

Довірчий інтервал для середнього значення генеральної сукупності становитиме згідно з розрахунками

$$\left( \bar{R} - \frac{t(0,95; 5)}{\sqrt{6}}; \bar{R} + \frac{t(0,95; 5)}{\sqrt{6}} \right) = \left( 13,76 - \frac{2,57}{\sqrt{6}}; 13,76 + \frac{2,57}{\sqrt{6}} \right) = (12,711; 14,809). \quad (5.7)$$

На підставі проведених розрахунків оцінювання похибки значення сили, одержане за скінченно-елементною моделлю, перебуває в межах довірчого інтервалу для середнього значення генеральної сукупності.

### **5.3 Методика підбору основних елементів системи різання для виготовлення круглої внутрішньої різьби запропонованою технологією**

Розроблена в роботі технологія обробки гвинтової поверхні круглого профілю в армованому композиційному матеріалі дозволила провести дослідження міцності запропонованого з'єднання за рахунок його виготовлення та подальшого дослідження. Ще один плюс даної технології - це її універсальність, можливість застосування для виготовлення круглої різьби з будь-якими основними параметрами за рахунок використання в процесі обробки фрезерного верстата з ЧПК, а також можливість виготовлення як круглої зовнішньої, так і внутрішньої різьби (технології виготовлення описані в 2-му та 4-му розділах). За рахунок використання розточувального пристрою, на якому налаштовується діаметр інструменту (формула обчислення (2.1)) в процесі формоутворення різанням різьби круглого профілю, цю технологію можна застосовувати для виготовлення різьби будь-якого зовнішнього діаметра як внутрішньої, так і зовнішньої. Для реалізації процесу формоутворення внутрішньої круглої різьби, запропонованою технологією потрібно додержуватися рекомендацій, наведених нижче.

1 Визначитися з основними параметрами круглої внутрішньої різьби, такими як крок  $p$  та глибина профілю  $t$ , а також зовнішній  $D$  та внутрішній  $D_I$  діаметри,  $L$  – довжина (рис. 5.2).

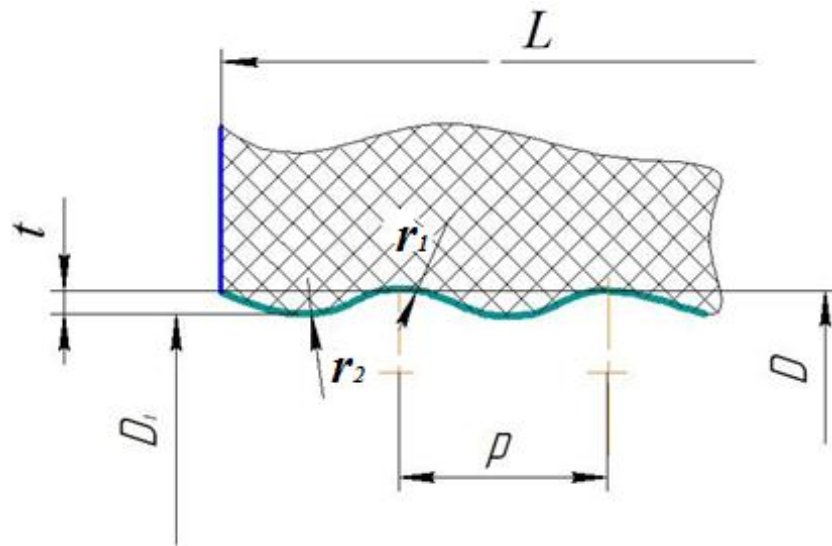


Рисунок 5.2 – Основні параметри круглої внутрішньої різьби

2 Розрахувати діаметр інструмента, який потрібно налаштувати на розточувальному пристрої: за формулою (2.1) для внутрішніх різьбових поверхонь, за формулою (4.1) - для зовнішніх відповідно.

3 Виготовити однозубий інструмент методом ручного заточування згідно з ескізом, поданим на рисунку 5.3.

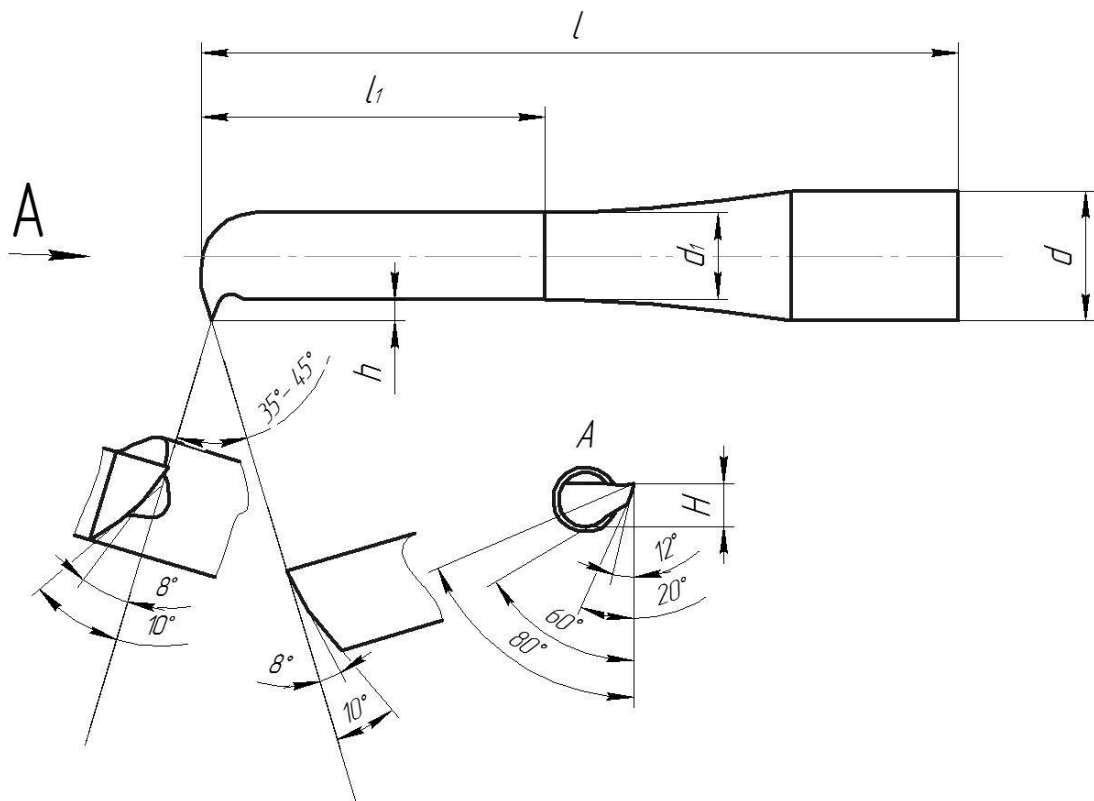


Рисунок 5.3 – Ескіз для виготовлення однозубого інструмента методом ручного заточування

Розміри інструмента подані на рисунку 5.3, розраховують так:  $d_1$  – діаметр робочої частини інструмента - розраховується за формулою

$$d_1 = D_1 - 1,2t \quad (5.8)$$

де  $D_1$  – внутрішній діаметр різьби, який обирають на початку виготовлення;

$t$  – глибина профілю різьби, яку задають також на початку виготовлення;

– довжину робочої частини інструмента  $l_1$  – за формулою

$$l_1 = L - p, \quad (5.9)$$

де,  $L$  – довжина різьби, яку планується нарізувати;

$p$  – величина кроку різьби.

Величина зовнішнього діаметра інструмента дорівнює значенню  $d = d_2$ , а його довжина  $l = 1,5l_1$ . Що стосується висоти різального клина  $h$ , то його значення повинно бути  $h = 1,2t$ , щоб виключити контакт діаметра робочої частини інструмента  $d_1$ , з оброблюваною поверхнею. Висота робочої частини інструмента  $H$ , дорівнює значенню  $H = 0,6d_1$ .

Як інструментальний матеріал потрібно використовувати особливо малозернистий твердий сплав будь-яких модифікацій та фірм виробників, режими різання назначають рекомендовані виробником та коригують у процесі роботи. Для особливо малозернистого твердого сплаву K55SF (виробник фірма Guhring (Німеччина)) режими різання при оброблюванні склопластикового армованого матеріалу вибирають згідно з даними виробника.

4 Установити інструмент у розточувальний пристрій, задати на ньому діаметр формотворної точки (діаметр колового руху), розрахований за формулою (2.1).

5 Закріпити деталь з армованого композиційного матеріалу на стіл фрезерного верстата з ЧПК.

6 Прив'язати систему координат деталі відносно системи координат верстата.

7 Внести основні параметри різьби такі як крок  $p$  і глибину профілю  $t$  різьби, а також значення подачі та частоти обертання до керуючої програми верстата.

8 Провести оброблення круглої різьбової поверхні за один прохід.

## 5.4 Практичні рекомендації запропонованого способу з'єднання деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів

На сьогодні ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус» займається виготовленням пристроїв для заточування леза ножа (рис. 5.4).

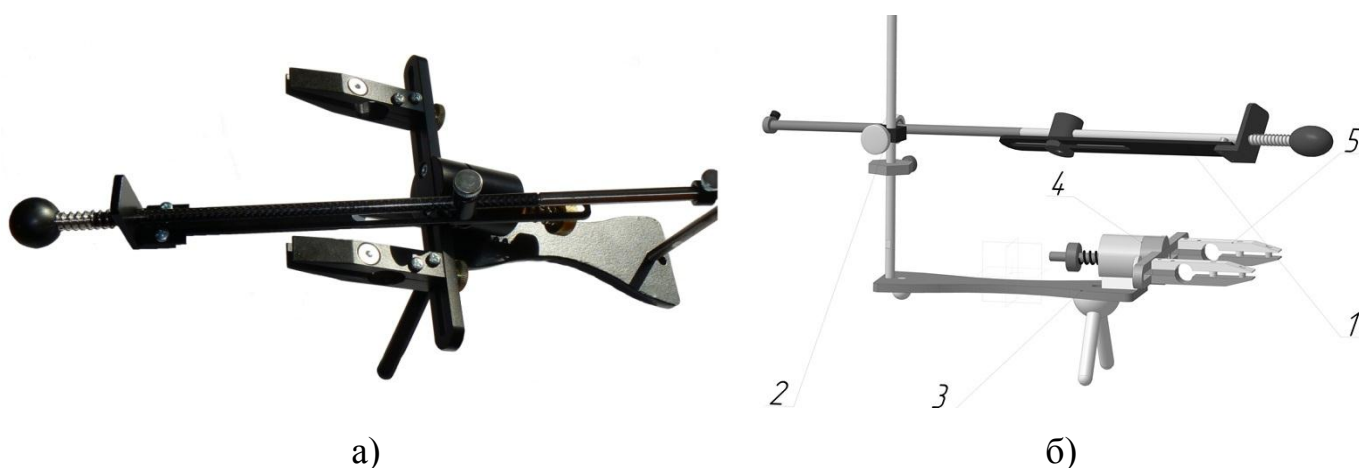


Рисунок 5.4 – Пристрій для заточування леза ножа: а) загальний вигляд пристрою; б) модель, яка зображує основні механізми пристрою;

1 – механізм закріплення абразивного елемента; 2 – механізм регулювання кута заточування; 3 – підставка; 4 – поворотний механізм; 5 – механізм закріплення ножа

Тенденція, що спостерігається в більшості виробників даних пристроїв, пов'язана зі зменшенням ваги цих пристроїв. Один із основних робочих елементів цього пристрою, який потребує зменшення ваги, - це механізм для закріплення абразивного елемента, адже саме він виконує основну роботу із заточування леза.

Деталь, яка має найбільшу масу в даному механізмі, - це шток, виготовлений з нержавіючої сталі марки 12X18H10T (рис. 5.5), маса якого 50 % від загальної маси механізму.

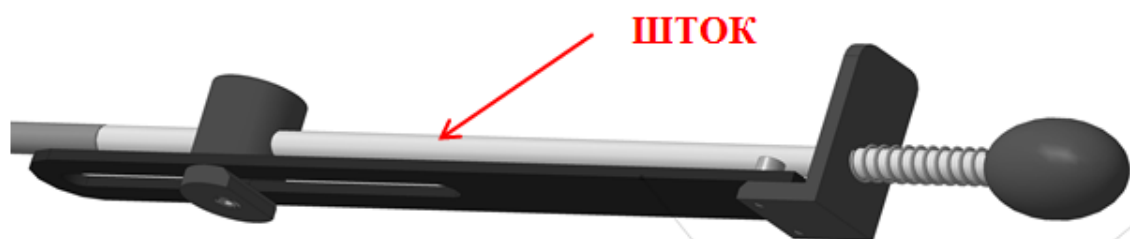


Рисунок 5.5 – Механізм кріплення абразивного елемента

Для зниження маси даного елемента пристрою було запропоновано використовувати за шток стрижень, виготовлений з армованого композиційного матеріалу. В процесі реалізації задуманого виникла проблема - з'єднання металевого штока механізму регулювання кута заточування із штоком з армованого композита механізму кріплення абразивного елемента. Оскільки класична метрична різьба виготовлена у вуглепластиковому стрижні, виявилася не працездатною. А виготовити різьбу іншого профілю не дозволяли виробничі можливості підприємства, гвинтову поверхню спеціального профілю можна було б виготовити методом формування, але стрижні з армованого композита не виготовляли на підприємстві, а були придбані уже в готовому вигляді (рис. 5.6).



Рисунок 5.6 – Стрижень, виготовлений з армованого композиційного матеріалу

На основі непрацездатності метричної різьби в даному випадку та за рахунок усіх вищеперелічених аспектів було вирішено виготовляти круглу різьбу для з'єднання двох елементів запропонованою технологією механічного оброблення описаною в роботі.

Виготовлення круглої внутрішньої різьби у стрижні механізму кріплення абразивного елемента та зовнішньої в металевому штоку механізму регулювання кута заточування (технологією оброблення круглих зовнішніх різьб, описаною в пункті 4.1) дозволило отримати працездатне гвинтове з'єднання даних елементів пристрою заточування ножа (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Гвинтове з'єднання даних елементів пристрою заточування ножа

Гвинтове з'єднання двох елементів пристрою за допомогою круглої різьби дозволило зменшити загальну вагу механізму закріплення абразивного елемента на половину, про що свідчать дані таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Вага механізму кріплення абразивного елемента в залежності від матеріалу штока

Матеріал штока	Загальна вага механізму, г
12X18H10T	226
Армований композит	112

Використання як шток стрижень з армованого композиційного матеріалу та його з'єднання за рахунок круглої різьби металевим штоком механізму регулювання кута заточування, дозволило реалізувати зменшення ваги пристрою для заточування леза ножа, що призвело до значного зростання інтересу продукції ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус» і як наслідок збільшення продажу їх товару.

Акт впровадження у виробництво даного типу з'єднання та технології формоутворення гвинтової поверхні в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, на підприємстві ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус» поданий у додатку Г.

Значного поширення в Україні та в усьому світі набули такі літальні апарати, як квадрокоптери (дрони) та безпілотники. На сьогодні ці апарати використовують майже в усіх сферах людського життя, починаючи від можливості зняти якесь цікаве відео і закінчуючи допомогою військовим із розвідувальними даними.

В основному всі елементи даних апаратів виготовляють з армованих композиційних матеріалів, оскільки їх використання знижує вагу та забезпечує високі динамічні характеристики апаратів. На рисунку 5.8 показане фото важкого квадрокоптера моделі FPV X525, який виготовляє державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».





Рисунок 5.8 – Важкий FPV X525–квадрокоптер

У процесі виготовлення та складання даного пристрою на підприємстві виробнику виникла проблема із з'єднанням складових частин квадрокоптера одна за одною. Нині для цього використовують різного роду хомути, муфти, перехідники, в результаті чого утворюються досить складні та громіздкі, високофункціональні з'єднання, що значно підвищує ціну виготовлених пристроїв, у сучасних реаліях це неприпустимо. Найкраще це спостерігається на приєднанні променів дрона, на яких розміщені двигуни і повітряні гвинти, до корпусу квадрокоптера (рис. 5.9).



Рисунок 5.9 – Приєднання променів квадрокоптера до його корпусу

Із рисунка бачимо, що промені виконанні у вигляді стрижнів, виготовлених з армованого композиційного матеріалу, корпус - також з армованого композита, а отже, замість високо функціональних з'єднань за допомогою хомутів та муфт можна застосувати гвинтове з'єднання з різьбою круглого профілю, формоутвореною як у корпусі квадрокоптера, так і на його променях. Ця ідея була позитивно схвалена керівництвом державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», що дало можливість авторам разом із працівниками підприємства створити роз'ємне гвинтове з'єднання корпусу дрона з його променями за рахунок формоутворення круглої різьби на їх поверхнях.

Застосування цього типу з'єднання при сполученні деталей квадрокоптера між собою значно спростило конструкцію описаних апаратів, здешевило їх виготовлення і зробило ці апарати більш доступними.

Акт впровадження у виробництво даного типу з'єднання та технології формоутворення гвинтової поверхні в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, на державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» наведений у додатку Г.

### **Висновки до розділу 5**

1 На підставі адекватності імітаційної моделі проведено дослідження впливу основних геометричних параметрів круглої різьби та пружних характеристик армованого композита, через параметр  $\psi_1$  – відносний об'ємний вміст арматури шару в поздовжньому напрямку на значення максимальної сили, яке витримає з'єднання (його несучої здатності). Внаслідок цього отримали, що максимальні показники міцності будуть для гвинтового з'єднання з такими основними геометричними параметрами: значення кроку -  $p = 4 \text{ мм}$ , а значення глибини профілю різьби -  $t = 0,8 \text{ мм}$ , значення відносного об'ємного вмісту арматури шару в поздовжньому напрямку -  $\psi_1 = 0,7$ .

2 Проведене оцінювання похибки прямих вимірювань на основі розрахунку вибіркового стандартного відхилення даних експерименту показало, що значення сили, одержане за скінченно-елементною моделлю перебуває в межах довірчого інтервалу для середнього значення генеральної сукупності.

3 На підставі створеної технології оброблення різанням круглої гвинтової поверхні в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, одержано методику підбору основних елементів системи різання для виготовлення даної поверхні запропонованою технологією.

4 Подане гвинтове з'єднання для деталей, виготовлених з АКМ та технологія його отримання 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 сполученні деталей квадрокоптерів одна з одною, виробником яких є державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» (м. Дніпро).

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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

1 Розглянута детальна класифікація з'єднань деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів (АКМ), з якої бачимо, що найбільш застосованими для даного типу матеріалів є нероз'ємні з'єднання, для яких і проводять усі дослідження, пов'язані з одержанням основних показників міцності та критеріїв працездатності даних 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, у результаті якого визначені основні показники міцності цього з'єднання за граничною воздією, що виявилися на досить високому рівні. Згідно з результатами моделювання показник максимальної сили, яку витримує з'єднання, становив  $R_{\max} = 13,76$  кН. Значення максимальних напружень та деформацій згідно з опрацьованими в постпроцесорі LS-PrePost-2.4 даними варіюються в межах, що підтверджує зазначену на початку гіпотезу та дає підставу для подальшого проведення експериментального дослідження міцності.

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

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

5 Експериментально визначені параметри, що забезпечують максимальну міцність різьби із 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 -  $p = 4 \text{ мм}$ , а 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. Розроблено практичні рекомендації застосування цього роз'ємного гвинтового з'єднання в різного роду конструкціях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів. Запропоноване роз'ємне з'єднання та 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

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.
2. Довгополов А. Ю. Роз'ємні з'єднання деталей, виготовлених з вуглепластику / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Сучасні технології в машинобудуванні = Modern technologies in mechanical engineering : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 11. – С. 102–109.
3. Messler R. W. Joining composite materials and structures: Some thought-provoking possibilities / R. W. Messler // Journal of Thermoplastic Composite Materials.- 2004. – Vol. 17 (1). – P. 51–75
4. Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel / K. W. Jung, Y. Kawahito, M. Takahashi, S. Katayama // Materials & Design, 2013. – Vol. 47. – P. 179–188.
5. Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength / J. V. Esteves, S. M. Goushegir, J. F. Dos Santos at al. // Materials & Design.- 2015. – Vol. 66. – P. 437–445.
6. Lambiase F. Joinability of different thermoplastic polymers with aluminium AA6082 sheets by mechanical clinching / Francesco Lambiase // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2015. – Vol. 80. – P. 9–12.
7. Goushegir S. M. Friction spot joining of aluminum AA2024 / carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance / S. M Goushegir, J. F. Dos Santos, S. T. Amancio-Filho // Materials & Design.- 2014. – Vol. 54. – P. 196– 06.
8. Johnson T. History of composites. The evolution of lightweight composite materials [Electronic resource] T. Johnson – Access mode : <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm> (22.05.2014).
9. Proctor B. A. Composite materials [Electronic resource] B. A. Proctor – Access mode : <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspirational/resources/4.3.1.pd> (15.04.2014).

10. Pramanik A. Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites / A. Pramanik // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.- 2014. – Vol. 86. – P. 44–61.

11. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта; под ред. Б. Э. Геллера. – Москва: Машиностроение, 1988.- Кн. 2

12. Niu M. C. Composite Airframe structures / M. C. Niu. – Hong Kong: Conmilit Press Ltd, 1992. – 686 p.

13. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Колесник и др. – Сумы : Университетская книга, 2013. – 272 с.

14. Буланов И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

15. Колганов И. М. Технологичность авиационных конструкции, пути повышения / И. М. Колганов, П. В. Дубровский, А. Н. Архипов. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 143 с.

16. Joining by forming a review on joint mechanisms, applications and future trends / P. Groche, S. Wohletz, M. Brenneis, C. Pabst // *Resch Journal of Materials Processing Technology*. - 2014. – Vol. 214 (10). – P. 1972–1994.

17. Grant L. D. R. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry / L. D. R. Grant, R. D. Adams, L. F. da Silva // *International journal of adhesion and adhesives*. - 2009. – Vol. 29(4). – P. 405–413.

18. Belingardi G. Stress flow in thin-walled box beams obtained by adhesive bonding joining technology / G. Belingardi, G. Chiandussi // *International journal of adhesion and adhesives*. - 2004. – Vol. 24 (5). – P. 423–439.

19. Goglio L. Design of adhesive joints based on peak elastic stresses / L. Goglio, M. Rossetto, E. Dragoni // *International journal of adhesion and adhesives*. - 2008. – Vol. 28 (8). – P. 427–435.

20. Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints / A. B. De Morais, A. B. Pereira, J. P. Teixeira, N. C. Cavaleiro // *International journal of adhesion and adhesives*. -2007. – Vol. 27 (8). – P. 679–686.
21. Lovelace A. M. Composites enter the mainstream of aerospace vehicle design (Composite materials in aerospace vehicle design, discussing mechanical behavior, applications and characteristics) / A. M. Lovelace, S. W. Tsai // *Astronautics and Aeronautics*. - 1970. – Vol. 8. – P. 56–61.
22. Rudawska A. Adhesive joint strength of hybrid assemblies: Titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites – Experimental and numerical verification / A. Rudawska // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. - 2010. – Vol. 30 (7). – P. 574–582.
23. Failure of carbon composite to aluminium joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding / J. H. Kweon, J. W. Jung, T. H. Kim at al. // *Composite structures*. - 2006. – Vol. 75 (1–4). – P. 192–198.
24. Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium–composite material bonding / J. M. Arenas, C. Alía, J. J. Narbón at al. // *Composites Part B: Engineering*. - 2013. – Vol. 44 (1). – P. 417–423.
25. Huang Z. Adhesive - embossing hybrid joining process to fiber-reinforced thermosetting plastic and metallic thin sheets / Z. Huang, S. Sugiyama, J. Yanagimoto // *Procedia Engineering*. - 2014. – Vol. 81. – P. 2123–2128.
26. Möller F. Novel method for joining CFRP to aluminium / F. Möller, C. Thomy, F. Vollertsen // *Physics Procedia*. - 2010. – Vol. 5. – P. 37–45.
27. Joining and repair of a carbon fibre-reinforced thermoplastic / P. Davies, W. J. Cantwell, P. Y. Jar at al. // *Composites*. - 1991. – Vol. 22 (6). – P. 425–431.
28. Wise R. New technique for joining dissimilar materials / Richard Wise // *Welding Review International*. - 1993. – Vol. 2. – P. 40–42.
29. Assuncao D. E. Conduction mode: broadening the range of applications for laser welding / D. E. Assuncao, S. Ganguly, D. Yapp, S. W. Williams, – 2012.



30. Katayama S. Latest progress in performance and understanding of laser welding / S. Katayama, Y. Kawahito, M. Mizutani // *Physics Procedia*. - 2012. – Vol. 39. – P. 8–16.
31. Pickin C. G. Joining of lightweight sandwich sheets to aluminium using self-pierce riveting / C. G. Pickin, K. Young, I. Tuersley // *Materials & design*. - 2007. – Vol. 28 (8). – P. 2361–2365.
32. Hoang N. H. Self-piercing riveting connections using aluminium rivets / N. H. Hoang, R. Porcaro, M. Langseth, A. G. Hanssen // *International Journal of Solids and Structures*. - 2010. – Vol. 47 (3–4). – P. 427–439.
33. The effect of the riveting process and aging on the mechanical behaviour of an aluminium self-piercing riveted connection / N. H. Hoang, R. Porcaro, M. Langseth, A. G. Hanssen // *European Journal of Mechanics-A/Solids* . - 2011. – Vol. 30 (5). – P. 619–630.
34. Mori K. Assessing the suitability of materials for self-piercing riveting (SPR) / K. Mori // *In Self-Piercing Riveting*. - 2014. – Vol. 1. – P. 111–123.
35. He X. Self-pierce riveting for sheet materials: state of the art / X. He, I. Pearson, K. Young // *Journal of materials processing technology*. - 2008. – Vol. 199 (1 – 3). – P. 27–36.
36. of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets / C. J. Lee, J. Y. Kim, S. K. Lee, et al. // *Materials & Design*. - 2010. – Vol. 31 (4). – P. 1854–1861.
37. Oudjene M. On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method / M. Oudjene, L. Ben-Ayed // *Engineering Structures*. - 2008. – Vol. 30 (6). – P. 1782–1788.
38. Shape optimization of clinching tools using the response surface methodology with Moving Least-Square approximation / M. Oudjene, L. Ben-Ayed, A. Delameziere, J. L. Batoz // *Journal of materials processing technology*. - 2009. – Vol. 209 (1). – P. 289–296.

39. Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials—Al6061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel, and carbon fiber reinforced plastic / C. J. Lee, J. M. Lee, H. Y. Ryu, et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2014. – Vol. 214 (10). – P. 2169–2178.

40. Догматырский Б. А. Болтовые и заклепочные соединения конструкций из стеклопластиков / Б. А. Догматырский, О. Н. Сироткин, А. И. Ярковец. – Москва : МАИ, 1972. – 100 с.

41. Сироткин О. С. Проектирование и технология соединений элементов конструкций из композиционных материалов / О. С. Сироткин // *Пластические массы*. - 1976. – Вып. 3. – С. 57–61.

42. Сироткин О. С. Экспериментальное исследование упругих и прочностных характеристик соединения углепластиков в свободном и стесненном состоянии / О. С. Сироткин, С. Ф. Растринин, В. А. Козлов // *Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов* : сб. науч. тр. Москва: ЦАГИ, 1979. – Вып. VII. – С. 65–77.

43. Карпов Я. С. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов / Я. С. Карпов, С. П. Кривенда, В. И. Рябков. – Харьков : ХАИ, 1997. – 128 с.

44. Воробей В. В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В. В. Воробей, О. С. Сироткин. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 168 с.

45. Семин М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность / М. И. Семин, Д. В. Стреляев. – Москва: Изд-во МГТУ «ЛИАТМЭС», 1996. – 294 с.

46. Sen F. Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints / F. Sen, K. Aldas // *Cankaya University Journal of Science and Engineering (CUJSE)*. - 2011. – Vol. 8 (1). – P. 1–13.

47. Комаров Г. В. Соединения деталей из полимерных материалов: ученик / В. Г. Комаров. – Санкт-Петербург : Профессия, 2006. – 592 с.

48. А. с. 1692856 А1 СССР, МКИ В 29 С 65/00. Способ неразъемного таврового соединения деталей / В. А. Дунь, В. М. Школьников (СССР). – № 4495299/05–26 ; заявл. 01.08.88 ; опубл. 23.11.91, Бюл. № 43.

49. Росато Д. В. Намотка стеклонитью : развитие метода, производство, области применения и конструирование : пер. с англ. / Д. В. Росато, К. С. Грове. – Москва : Машиностроение, 1969. – 312 с.

50. Martinsen K. Joining of dissimilar materials / К. Martinsen, S. J. Hu, В. E. Carlson // CIRP Annals. - 2015. – Vol. 64 (2). – P. 679–699.

51. А. с. 770819 А1 СССР, МКИ В 29 С 27/00. Способ соединения стеклопластиковых деталей / Ю. И. Еловков, Г. Г. Квачадзе, Е. А. Пиличев, В. Ф. Попов, Г. Б. Шайкин, Б. С. Шкляревский, М. В. Шмелев и И. А. Яковлев (СССР). – № 2715803/23-05 ; заявл. 01.02.80 ; опубл. 15.10.80, Бюл. № 38.

52. Композиционные материалы: Справочник / под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – Москва : Машиностроение, 1990. – 512 с.

53. Композиционные материалы: справочник / под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев : Наук. думка, 1985. – 592 с.

54. Берг Ч. В. Механические испытания композитов / Ч. В. Берг // Композиционные материалы. – Москва: Машиностроение, 1978. – Т. 8 . – С. 81–97.

55. ISO 1886–90 Reinforcement fibres – Sampling plans applicable to received batches, Edition : 3, Publication date : 1990-12.

56. ISO 6272-2:2011 Paints and varnishes - Rapid-deformation (impact resistance) tests – Part 2: Falling-weight test, small-area indenter.

57. Сайт компанії виробника епоксидних смол «Spolchemie» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.spolchemie.cz/en/homepage> (27.01.2019).

58. ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

59. ASTM D3039 / D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

60. ASTM D6641 / D6641M-16e1, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

61. Тарнопольский Ю. М. Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю. М. Тарнопольский, Т. Я. Кинцис. – Москва : Химия, 1981. – 270 с.

62. Baker A. A. Composite Materials for Aircraft Structures / A. A. Baker. – Eurospan, 2004. – 400 p.

63. Некрасов С. С. Способы обработки круглой резьбы / С. С. Некрасов, Д. В. Криворучко, А. А. Нешта // Оборудование и инструмент для профессионалов: металлообработка. - 2013. – № 4. – С. 86–88.

64. Ершов Е. М. Изготовление резьб на деталях из стеклопластика / Е. М. Ершов, А. П. Мордвин. – Москва : Машиностроение, 1969. – 128 с.

65. Пат. 103734. UA Україна, МПК (2006.01) B23C 3/32. Спосіб обробки круглої внутрішньої різьби / С. С. Некрасов, Д. В. Криворучко, А. О. Нешта (Україна) ; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № а201214037 ; заявл. 10.12.2012 ; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.

66. Довгополов А. Ю. Технологія обробки гвинтової поверхні роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 42 (1214). – С. 38–42.

67. Рих К. Новый виток развития обработки композитов / К. Рих // METALWORKING WORLD. Деловой и технический журнал от SANDVIK COROMANT. - 2010. – № 1. – С. 12–13.

68. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов / Д. А. Рычков, В. А. Скрипняк, А. С. Янюшкин, Д. В. Лобанов // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. - 2014. - № 2 (63). – С. 6–13.

69. Сайт заводу виробника металоріжучого інструменту «Sandvik Coromant» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.sandvik.coromant.com/ru/products/composite-solutions> (20.01.2018).

70. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами / Д. А. Рычков, В. А. Скрипняк, А. С. Янюшкин, Д. В. Лобанов // Системы. Методы. Технологии. - 2014. - № 2 (22). – С. 42–46.

71. Буланов И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 518 с.

72. Сайт компанії виробника металоріжучого інструменту «Guhring» [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу : <http://guhring-tools.ru/doc/guhring-tehnicheskaya-chast-2011-page7.html> (18.05.2018).

73. Ванин Г. А. Механика композиционных материалов / Г. А. Ванин. – Киев : Наукова думка, 1985. – 302 с.

74. Семин М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность / М. И. Семин, Д. В. Стреляев. – Москва : Изд-во МГАТУ «ЛАТМЭС», 1996. – 294 с.

75. Семин М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из полимерных материалов на прочность и долговечность / М. И. Семин. – Москва : МАДИ, 2016. – 92 с.

76. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – Москва : Мир, 1975. – 541 с.

77. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин: прочность, устойчивость, колебания / С. А. Амбарцумян. – Москва : Наука, 1987. – 360 с.

78. Образцов И. Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов / И. Ф. Образцов, В. В. Васильев, В. А. Бунаков. – Москва : Высшая школа, 1985. – 392 с.

79. Chang F. K. Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-Out Mode Failure / F. K. Chang, K. Y. Chang // J. of Composite Materials. - 1987. - 21, - P. 809–833.

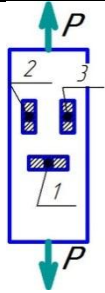
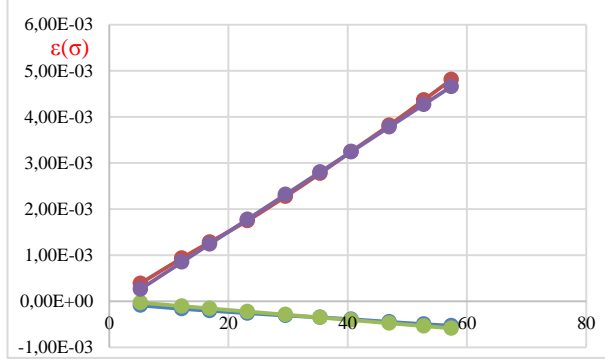
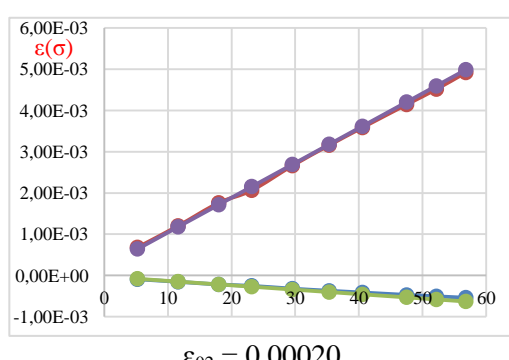
80. Chang F. K. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration / F. K. Chang, K. Y. Chang // of Composite Materials. - 1987. – 21. - P. 834–855.

81. Hahn H. T. Nonlinear Elastic Behavior of Unidirectional Composite Laminate / H. T. Hahn, S. W. Tsai // *J. of Composite Materials*. – 1973. – 7. - P. 102–110
82. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites / Z. Hashin. – *J. Applied Mechanics*. – 1980. – 47. - P. 329–334
83. Залога В. А. Имитационная модель прямоугольного свободного резания / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик // *Вестник СумГУ*. - 2005. – № 11. – С. 113–122.
84. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances / U. Heisel, D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak // *Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*. - 2007. – P. 141 – 148.
85. Алфутов Н. А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н. А. Алфутов, П. А. Зиновьев, Б. Г. Попов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 264 с.
86. Болотин В. В. Механика многослойных конструкций / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. – Москва : Машиностроение, 1980. – 375 с.
87. Ванин Г. А. Микромеханика композиционных материалов / Г. А. Ванин. – Киев : Наук. думка, 1971. – 304 с.
88. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. – Москва : Машиностроение, 1988. – 272 с.
89. Верещака С. М. Упругие постоянные и обобщенные характеристики жесткости материала слоистой структуры / С. М. Верещака // *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»* : сб. науч. тр. Темат. вып.: Динамика и прочность машин. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – № 36. – С. 29–40.
90. Верещака С. М. Механіка композиційних матеріалів : навчальний посібник / С. М. Верещака. – Суми : Вид-во СумДУ, 2013. – 160 с.
91. ISO 724:1993 ISO general-purpose metric screw threads – Basic dimensions. Edition : 2. Publication date : 1993-10.
92. Криворучко Д. В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів : навчальний посібник / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, В. Г. Корбач. – Суми : Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.

93. Hallquist J. O. LS-DYNA. Theory Manual LSTC / J. O. Hallquist. - Livermore, CA, USA, 2006.
94. Schürmann H. Konstruieren mit Faser – KunststoffVerbunden / H. Schürmann. – Berlin : Springer, 2005. – 672 p.
95. Marannano G. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints / G. Marannano, B. Zuccarello // Composites Part B: Engineering. - 2015. – Vol. 71. – P. 28–39.
96. Rhee K. Y. A study on the peel and shear strength of aluminum/CFRP composites surface-treated by plasma and ion assisted reaction method / K. Y. Rhee, J. H. Yang // Composites science and technology. - 2003. – Vol. 63 (1). – P. 33–40.
97. Zemann R. Manufacturing of threads direct into a carbon fibre reinforced polymer / R. Zemann // Materials Today: Proceedings. - 2016. – Vol. 3 (4). – P. 1226–1229.
98. Пат. 115892 У Україна, МПК (2006.01) B23B 1/00. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби / С. С. Некрасов, А. Ю. Довгополов (Україна) ; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201612668 ; заявл. 12.12.2016 ; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.
99. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби з великим кроком / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, С. О. Чигрин, І. В. Калюжний // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 2 (82). – С. 166–173.
100. 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.
101. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1971. – 280 с.
102. ASTM D3171-15, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

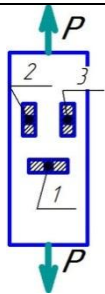
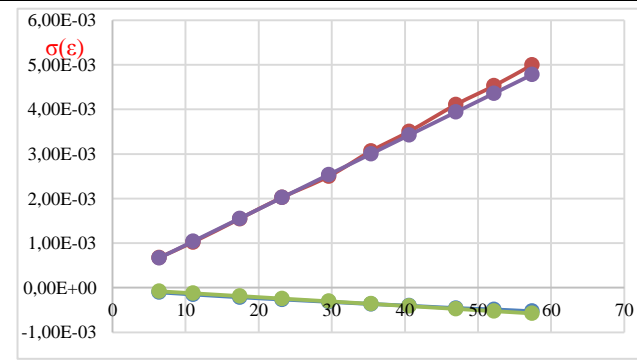
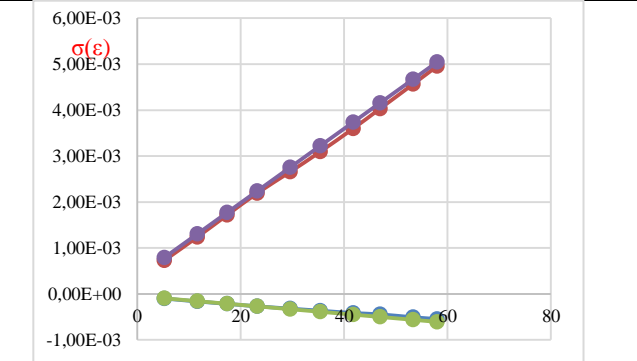
## ДОДАТОК А

## Результати експерименту з одержання пружних характеристик АКМ

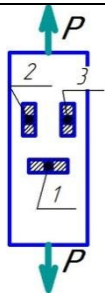
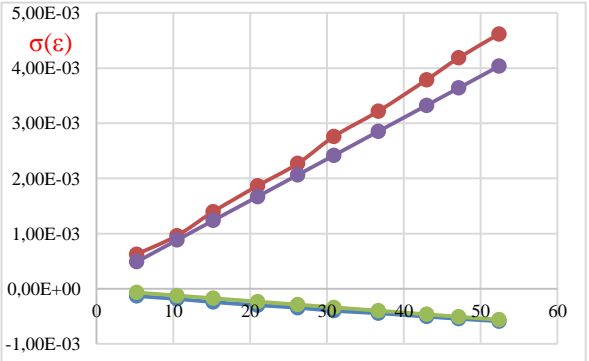
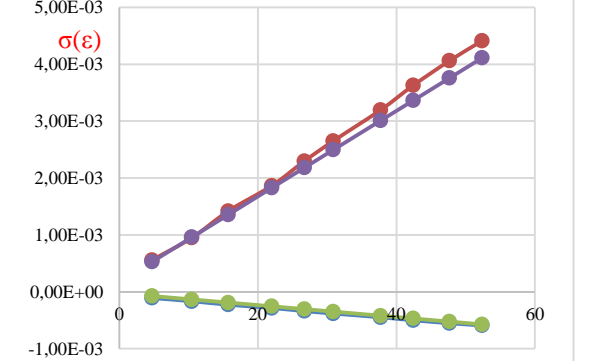
 Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами				Параметри дослідного зразка № 1					
				Ширина b, мм		Товщина h, мм		Площа A, мм	
1,15		15,00		17,25					
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 Р – 0,5 сертифікованої лабораторії Сумського державного університету									
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10 мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°									
Показники безпосереднього вимірювання			Експериментальні значення					Теоретичні значення	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>	μ	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>
0	-2101	-1522	-1861	-	-	-	-	-	-
9	-2146	-1340	-1665	12,17	-1,65E-04	9,34E-04	1,77E-01	-1,07E-04	8,47E-04
21	-2182	-1097	-1370	16,81	-2,06E-04	1,28E-03	1,61E-01	-1,57E-04	1,24E-03
29	-2202	-944	-1186	23,18	-2,59E-04	1,75E-03	1,48E-01	-2,24E-04	1,78E-03
40	-2228	-729	-942	29,56	-3,10E-04	2,27E-03	1,37E-01	-2,92E-04	2,31E-03
51	-2253	-488	-669	35,36	-3,51E-04	2,77E-03	1,27E-01	-3,54E-04	2,80E-03
61	-2273	-256	-409	40,57	-3,92E-04	3,25E-03	1,21E-01	-4,10E-04	3,24E-03
70	-2293	-35	-165	46,95	-4,49E-04	3,81E-03	1,18E-01	-4,78E-04	3,78E-03
81	-2321	232	125	52,75	-4,98E-04	4,36E-03	1,14E-01	-5,39E-04	4,27E-03
91	-2345	490	405	57,39	-5,32E-04	4,81E-03	1,11E-01	-5,89E-04	4,66E-03
99	-2362	698	631	5,21	-9,18E-05	3,86E-04	2,38E-01	-3,30E-05	2,61E-04
0	-2089	-1489	-1832	-	-	-	-	-	-
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	-2107	-1509	-1826	-	-	-	-	-	-
9	-2152	-1207	-1462	11,59	-1,53E-04	1,20E-03	1,27E-01	-1,49E-04	1,18E-03
20	-2182	-971	-1187	17,97	-2,18E-04	1,76E-03	1,24E-01	-2,17E-04	1,71E-03
31	-2214	-712	-898	23,18	-2,53E-04	2,07E-03	1,22E-01	-2,72E-04	2,15E-03
40	-2231	-569	-741	29,56	-3,20E-04	2,66E-03	1,20E-01	-3,40E-04	2,69E-03
51	-2264	-281	-442	35,36	-3,71E-04	3,16E-03	1,17E-01	-4,02E-04	3,18E-03
61	-2289	-59	-178	40,57	-4,14E-04	3,59E-03	1,15E-01	-4,58E-04	3,62E-03
70	-2310	141	42	47,53	-4,71E-04	4,15E-03	1,14E-01	-5,32E-04	4,21E-03
82	-2338	403	328	52,17	-5,06E-04	4,52E-03	1,12E-01	-5,81E-04	4,60E-03
90	-2355	575	517	56,81	-5,41E-04	4,92E-03	1,10E-01	-6,30E-04	4,99E-03
98	-2372	765	724	-	-	-	-	-	-
Результати оброблення вимірювання за методом найменших квадратів									
E = 11870,62 МПа					μ = 0,12				
 ε <sub>01</sub> = -0,00018					 ε <sub>02</sub> = 0,00020				



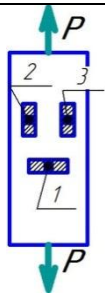
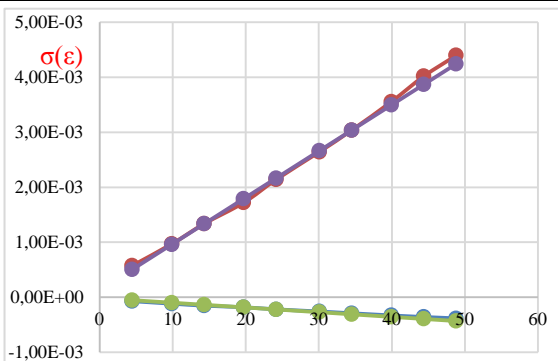
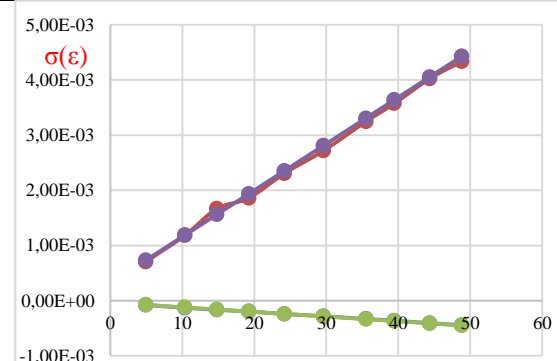
## Продовження додатка А

 Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами				Параметри дослідного зразка №2						
				Ширина b, мм		Товщина h, мм			Площа A, мм	
1,16		16,60			18,92					
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 P – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету										
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°										
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення		
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>	μ	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>	
0	-1740	-2390	-1164	-	-	-	-	-	-	
11	-1791	-2064	-826	5,81	-1,02E-04	6,64E-04	1,54E-01	-1,08E-04	7,86E-04	
19	-1814	-1901	-651	10,04	-1,48E-04	1,00E-03	1,48E-01	-1,59E-04	1,16E-03	
30	-1845	-1650	-388	15,85	-2,10E-04	1,52E-03	1,39E-01	-2,29E-04	1,68E-03	
40	-1869	-1418	-149	21,13	-2,58E-04	1,99E-03	1,30E-01	-2,93E-04	2,14E-03	
51	-1895	-1191	85	26,94	-3,10E-04	2,45E-03	1,27E-01	-3,64E-04	2,66E-03	
61	-1919	-915	366	32,23	-3,58E-04	3,01E-03	1,19E-01	-4,28E-04	3,13E-03	
70	-1938	-701	583	36,99	-3,96E-04	3,44E-03	1,15E-01	-4,86E-04	3,55E-03	
81	-1964	-408	879	42,80	-4,48E-04	4,03E-03	1,11E-01	-5,56E-04	4,06E-03	
90	-1979	-203	1089	47,55	-4,78E-04	4,44E-03	1,08E-01	-6,14E-04	4,48E-03	
99	-1999	27	1318	52,31	-5,18E-04	4,90E-03	1,06E-01	-6,71E-04	4,90E-03	
0	-1739	-2308	-1040	-	-	-	-	-	-	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>	μ	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>	
0	-1746	-2326	-1063	-	-	-	-	-	-	
9	-1795	-1974	-704	4,75	-1,10E-04	8,76E-04	4,755866	-9,48E-05	6,92E-04	
20	-1826	-1728	-451	10,56	-1,72E-04	1,38E-03	10,56859	-1,65E-04	1,21E-03	
30	-1852	-1492	-215	15,85	-2,24E-04	1,85E-03	15,85289	-2,29E-04	1,68E-03	
40	-1878	-1259	18	21,13	-2,76E-04	2,31E-03	21,13718	-2,93E-04	2,14E-03	
51	-1903	-1033	247	26,94	-3,26E-04	2,77E-03	26,9499	-3,64E-04	2,66E-03	
61	-1925	-816	458	32,23	-3,70E-04	3,20E-03	32,2342	-4,28E-04	3,13E-03	
72	-1950	-576	712	38,04	-4,20E-04	3,69E-03	38,04692	-4,98E-04	3,64E-03	
81	-1964	-367	930	42,80	-4,48E-04	4,12E-03	42,80279	-5,56E-04	4,06E-03	
92	-1995	-108	1 192	48,61	-5,10E-04	4,64E-03	48,61551	-6,26E-04	4,58E-03	
100	-2014	84	1 384	-	-	-	-	-	-	
Результати оброблення вимірювання за методом найменших квадратів										
E = 11 294,39 МПа					μ = 0,13					
 ε <sub>01</sub> = 0,00015					 ε <sub>02</sub> = 0,00036					

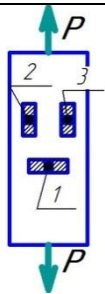
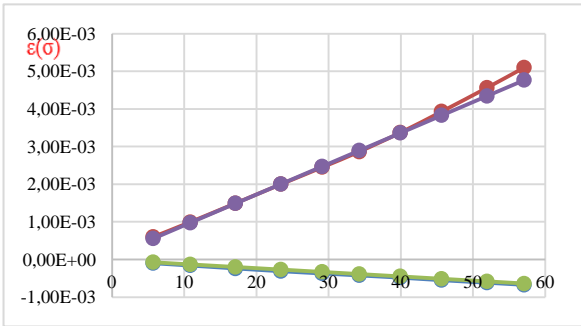
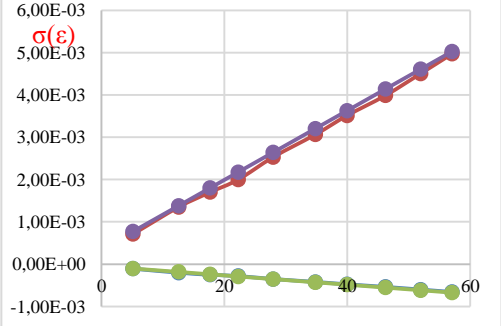
## Продовження додатка А

 Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами				Параметри дослідного зразка №3					
				Ширина b, мм		Товщина h, мм		Площа A, мм	
				1,15		16,60		19,09	
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 P – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету									
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°									
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	-291	-77	-557	-	-	-	-	-	-
9	-325	202	-273	5,23	-1,33E-04	6,26E-04	2,12E-01	-6,80E-05	4,89E-04
20	-347	393	-76	10,47	-1,84E-04	9,63E-04	1,91E-01	-1,23E-04	8,83E-04
29	-365	569	107	15,19	-2,41E-04	1,40E-03	1,72E-01	-1,72E-04	1,24E-03
40	-379	746	307	20,95	-2,98E-04	1,87E-03	1,60E-01	-2,32E-04	1,67E-03
49	-398	949	515	26,19	-3,43E-04	2,27E-03	1,51E-01	-2,87E-04	2,06E-03
61	-417	1193	763	30,90	-4,00E-04	2,76E-03	1,45E-01	-3,37E-04	2,42E-03
70	-433	1386	958	36,66	-4,43E-04	3,22E-03	1,38E-01	-3,97E-04	2,85E-03
81	-452	1639	1211	42,95	-5,04E-04	3,79E-03	1,33E-01	-4,63E-04	3,32E-03
90	-466	1867	1436	47,14	-5,45E-04	4,19E-03	1,30E-01	-5,07E-04	3,64E-03
99	-478	2054	1620	52,38	-5,88E-04	4,62E-03	1,27E-01	-5,61E-04	4,03E-03
0	-266	56	-401	-	-	-	-	-	-
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	-539	-242	40	-	-	-	-	-	-
9	-592	144	202	4,71	-1,08E-04	5,59E-04	1,93E-01	-7,34E-05	5,27E-04
20	-620	350	380	10,47	-1,65E-04	9,51E-04	1,74E-01	-1,34E-04	9,61E-04
30	-650	592	598	15,71	-2,26E-04	1,42E-03	1,59E-01	-1,89E-04	1,35E-03
42	-678	819	807	22,00	-2,84E-04	1,86E-03	1,52E-01	-2,54E-04	1,83E-03
51	-705	1039	1012	26,71	-3,39E-04	2,30E-03	1,47E-01	-3,04E-04	2,18E-03
59	-726	1218	1181	30,90	-3,81E-04	2,65E-03	1,44E-01	-3,47E-04	2,50E-03
72	-758	1491	1440	37,71	-4,47E-04	3,20E-03	1,40E-01	-4,19E-04	3,01E-03
81	-784	1709	1646	42,43	-5,00E-04	3,63E-03	1,38E-01	-4,68E-04	3,36E-03
91	-809	1929	1851	47,66	-5,51E-04	4,06E-03	1,36E-01	-5,23E-04	3,76E-03
100	-829	2111	2012	-	-	-	-	-	-
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів									
E=13229,25 МПа					μ=0,13				
 $\epsilon_{01} = 9,47E-05$					 $\epsilon_{02} = 0,00017$				

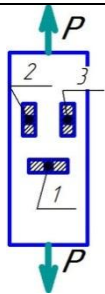
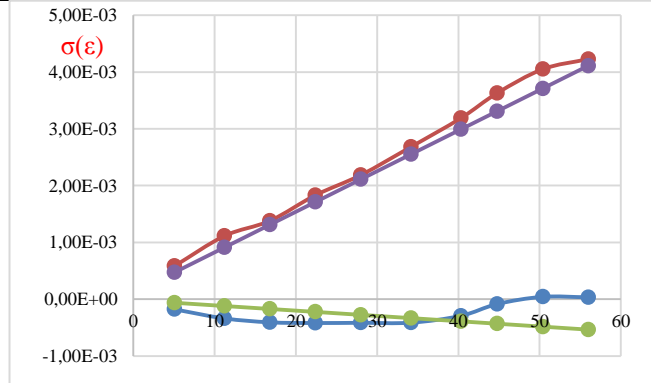
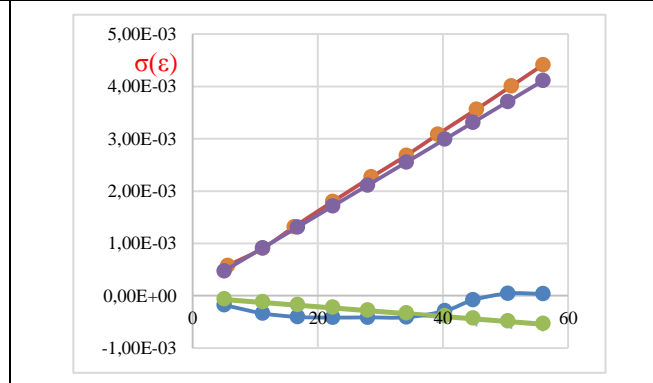
## Продовження додатка А

 Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами				Параметри дослідного зразка №4					
				Ширина b, мм		Товщина h, мм		Площа A, мм	
1,20		16,90		20,28		Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 Р – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету			
				Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°					
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>	μ	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>
0	-291	-77	-557	-	-	-	-	-	-
9	-325	202	-273	4,43	-6,94E-05	5,74E-04	1,21E-01	-5,12E-05	5,05E-04
20	-347	393	-76	9,86	-1,14E-04	9,70E-04	1,18E-01	-9,75E-05	9,62E-04
29	-365	569	107	14,29	-1,51E-04	1,34E-03	1,13E-01	-1,35E-04	1,34E-03
40	-379	746	307	19,72	-1,80E-04	1,72E-03	1,04E-01	-1,82E-04	1,79E-03
49	-398	949	515	24,16	-2,18E-04	2,14E-03	1,02E-01	-2,19E-04	2,16E-03
61	-417	1193	763	30,07	-2,57E-04	2,64E-03	9,73E-02	-2,70E-04	2,66E-03
70	-433	1386	958	34,51	-2,90E-04	3,04E-03	9,54E-02	-3,08E-04	3,04E-03
81	-452	1639	1211	39,94	-3,28E-04	3,55E-03	9,24E-02	-3,54E-04	3,49E-03
90	-466	1867	1436	44,37	-3,57E-04	4,02E-03	8,89E-02	-3,92E-04	3,87E-03
99	-478	2054	1620	48,81	-3,81E-04	4,39E-03	8,68E-02	-4,30E-04	4,24E-03
0	-266	56	-401	-	-	-	-	-	-
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>	μ	ε <sub>попер</sub>	ε <sub>прод</sub>
0	-260	-96	-470	-	-	-	-	-	-
10	-298	288	-162	4,93	-7,75E-05	7,06E-04	1,10E-01	-7,41E-05	7,32E-04
21	-323	519	75	10,35	-1,29E-04	1,18E-03	1,09E-01	-1,20E-04	1,19E-03
30	-341	703	364	14,79	-1,65E-04	1,67E-03	9,92E-02	-1,58E-04	1,56E-03
39	-356	846	412	19,23	-1,96E-04	1,86E-03	1,05E-01	-1,96E-04	1,93E-03
49	-378	1062	631	24,16	-2,41E-04	2,30E-03	1,04E-01	-2,38E-04	2,35E-03
60	-397	1262	834	29,58	-2,79E-04	2,72E-03	1,03E-01	-2,84E-04	2,81E-03
72	-422	1522	1092	35,50	-3,30E-04	3,24E-03	1,02E-01	-3,35E-04	3,30E-03
80	-437	1681	1255	39,44	-3,61E-04	3,57E-03	1,01E-01	-3,69E-04	3,64E-03
90	-459	1901	1476	44,37	-4,06E-04	4,02E-03	1,01E-01	-4,11E-04	4,05E-03
99	-477	2010	1674	-	-	-	-	-	-
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів									
E = 11882,77 МПа					μ = 0,10				
 $\epsilon_{01} = 0,00013$					 $\epsilon_{02} = 0,00030$				

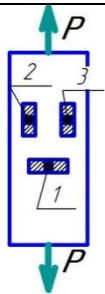
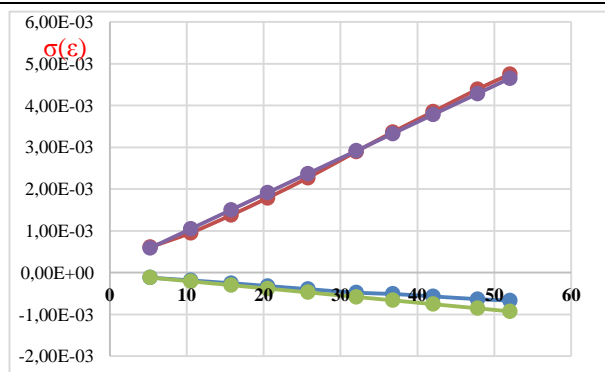
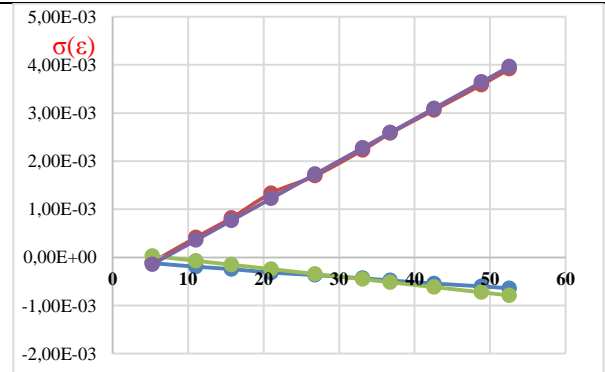
## Продовження додатка А

 Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами				Параметри дослідного зразка №5					
				Ширина b, мм		Товщина h, мм		Площа A, мм	
				1,16		15,10		17,52	
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 P – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету									
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СІТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°									
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	-126	219	230	-	-	-	-	-	-
10	-175	472	565	5,70	-1,00E-04	6,00E-04	1,67E-01	-7,44E-05	5,55E-04
19	-205	673	751	10,84	-1,61E-04	9,95E-04	1,62E-01	-1,31E-04	9,76E-04
30	-243	929	986	17,12	-2,39E-04	1,50E-03	1,60E-01	-2,00E-04	1,49E-03
41	-279	1187	1222	23,40	-3,12E-04	2,00E-03	1,56E-01	-2,69E-04	2,00E-03
51	-308	1419	1432	29,11	-3,71E-04	2,45E-03	1,52E-01	-3,31E-04	2,47E-03
60	-334	1634	1624	34,25	-4,24E-04	2,87E-03	1,48E-01	-3,88E-04	2,89E-03
70	-363	1896	1859	39,96	-4,83E-04	3,37E-03	1,43E-01	-4,50E-04	3,36E-03
80	-396	2185	2118	45,67	-5,51E-04	3,93E-03	1,40E-01	-5,13E-04	3,83E-03
91	-429	2511	2412	51,95	-6,18E-04	4,56E-03	1,35E-01	-5,82E-04	4,34E-03
100	-456	2788	2660	57,09	-6,73E-04	5,10E-03	1,32E-01	-6,38E-04	4,76E-03
0	-125	324	360	-	-	-	-	-	-
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	-121	303	268	-	-	-	-	-	-
9	-174	617	650	5,13	-1,08E-04	7,10E-04	1,52E-01	-1,03E-04	7,72E-04
22	-220	939	954	12,55	-2,02E-04	1,35E-03	1,50E-01	-1,85E-04	1,38E-03
31	-244	1115	1123	17,69	-2,51E-04	1,70E-03	1,48E-01	-2,41E-04	1,80E-03
39	-259	1265	1265	22,26	-2,82E-04	2,00E-03	1,41E-01	-2,91E-04	2,18E-03
49	-294	1533	1519	27,97	-3,53E-04	2,53E-03	1,39E-01	-3,54E-04	2,64E-03
61	-327	1802	1773	34,82	-4,20E-04	3,06E-03	1,37E-01	-4,29E-04	3,20E-03
70	-355	2027	1985	39,96	-4,77E-04	3,51E-03	1,36E-01	-4,86E-04	3,62E-03
81	-385	2269	2212	46,24	-5,39E-04	3,99E-03	1,35E-01	-5,54E-04	4,14E-03
91	-416	2531	2455	51,95	-6,02E-04	4,50E-03	1,34E-01	-6,17E-04	4,61E-03
100	-444	2771	2676	-	-	-	-	-	-
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів									
E = 12207,42 МПа					μ = 0,13				
 ε <sub>01</sub> = 8,75E-05					 ε <sub>02</sub> = 0,00035				

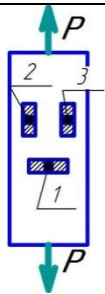
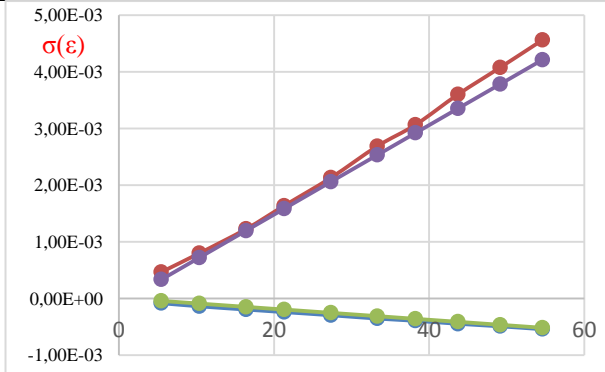
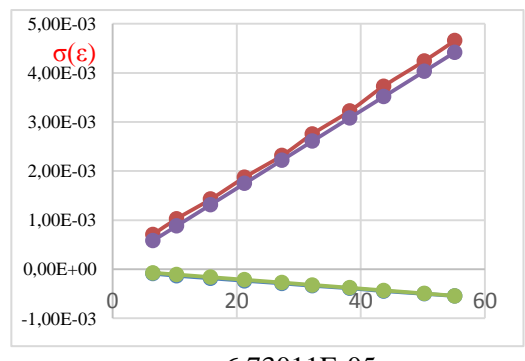
## Продовження додатка А

 <p>Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами</p>				Параметри дослідного зразка №6					
				Ширина b, мм		Товщина h, мм		Площа A, мм	
				1,16		16,40		17,86	
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 Р – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету									
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°									
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	7141	-517	-684	-	-	-	-	-	-
9	7054	-255	-374	5,03	-1,77E-04	5,83E-04	3,04E-01	-6,14E-05	4,72E-04
20	6976	86	-195	11,19	-3,37E-04	1,11E-03	3,02E-01	-1,19E-04	9,12E-04
30	6942	126	26	16,79	-4,06E-04	1,38E-03	2,94E-01	-1,70E-04	1,31E-03
40	6936	344	250	22,39	-4,18E-04	1,83E-03	2,28E-01	-2,22E-04	1,71E-03
50	6938	517	425	27,98	-4,14E-04	2,19E-03	1,89E-01	-2,74E-04	2,11E-03
61	6939	760	667	34,14	-4,12E-04	2,68E-03	1,54E-01	-3,32E-04	2,55E-03
72	6998	1012	912	40,30	-2,92E-04	3,19E-03	9,15E-02	-3,89E-04	2,99E-03
80	7100	1231	1126	44,78	-8,36E-05	3,63E-03	2,30E-02	-4,30E-04	3,31E-03
90	7162	1441	1328	50,38	4,28E-05	4,05E-03	-1,06E-02	-4,82E-04	3,71E-03
100	7158	1383	1560	55,97	3,47E-05	4,23E-03	-8,20E-03	-5,34E-04	4,11E-03
0	8180	-392	-558	-	-	-	-	-	-
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	8162	-410	-576	-	-	-	-	-	-
10	8020	-139	-284	5,59	-2,90E-04	5,74E-04	5,04E-01	-8,93E-05	6,87E-04
20	7943	19	-119	11,19	-4,47E-04	9,04E-04	4,94E-01	-1,41E-04	1,09E-03
29	7814	217	88	16,23	-7,10E-04	1,32E-03	5,39E-01	-1,88E-04	1,45E-03
40	7705	450	327	22,39	-9,32E-04	1,80E-03	5,18E-01	-2,45E-04	1,89E-03
51	7576	678	558	28,54	-1,20E-03	2,27E-03	5,27E-01	-3,02E-04	2,33E-03
61	7494	880	761	34,14	-1,36E-03	2,68E-03	5,09E-01	-3,54E-04	2,73E-03
70	7429	1079	960	39,18	-1,50E-03	3,09E-03	4,85E-01	-4,01E-04	3,09E-03
81	7351	1313	1193	45,34	-1,65E-03	3,56E-03	4,64E-01	-4,58E-04	3,52E-03
91	7285	1533	1411	50,94	-1,79E-03	4,01E-03	4,46E-01	-5,10E-04	3,92E-03
100	7261	1734	1606	-	-	-	-	-	-
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів									
E = 1404,99 МПа					μ = 0,14				
 <p>ε<sub>01</sub> = 0,00011</p>					 <p>ε<sub>02</sub> = 0,00036</p>				

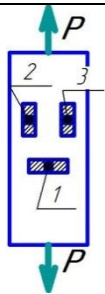
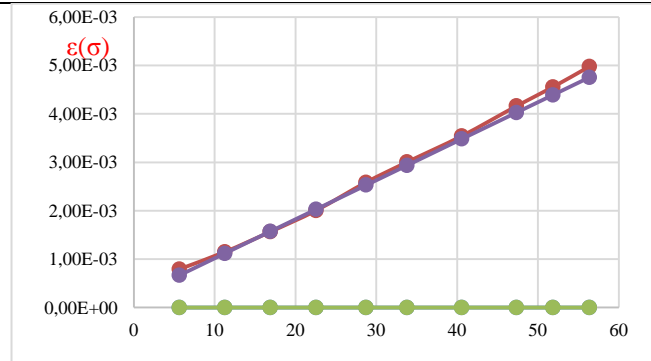
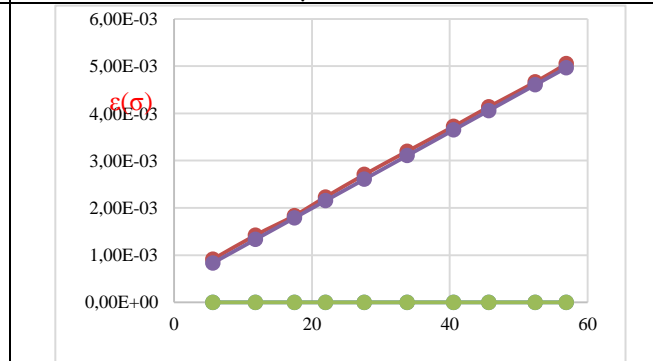
## Продовження додатка А

 Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами				Параметри дослідного зразка №7					
				Ширина b, мм		Товщина h, мм		Площа A, мм	
				1,16		16,40		19,02	
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 Р – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету									
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°									
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	-470	-474	486	-	-	-	-	-	-
10	-528	-193	803	5,25	-1,18E-04	6,10E-04	1,94E-01	-1,18E-04	5,90E-04
20	-561	-33	978	10,51	-1,86E-04	9,52E-04	1,95E-01	-2,09E-04	1,05E-03
30	-594	164	1197	15,76	-2,53E-04	1,38E-03	1,84E-01	-2,99E-04	1,50E-03
39	-627	356	1408	20,50	-3,20E-04	1,79E-03	1,79E-01	-3,81E-04	1,91E-03
49	-663	583	1654	25,75	-3,94E-04	2,27E-03	1,73E-01	-4,72E-04	2,37E-03
61	-705	884	1970	32,06	-4,79E-04	2,90E-03	1,65E-01	-5,81E-04	2,92E-03
70	-720	1108	2203	36,79	-5,10E-04	3,36E-03	1,52E-01	-6,63E-04	3,33E-03
80	-749	1345	2443	42,05	-5,69E-04	3,85E-03	1,48E-01	-7,54E-04	3,78E-03
91	-781	1610	2708	47,83	-6,34E-04	4,39E-03	1,44E-01	-8,54E-04	4,29E-03
99	-798	1789	2877	52,03	-6,69E-04	4,75E-03	1,41E-01	-9,27E-04	4,65E-03
0	-495	-350	577	-	-	-	-	-	-
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>
0	-497	373	551	-	-	-	-	-	-
10	-555	-66	891	5,25	-1,18E-04	-1,01E-04	-1,17E+00	2,87E-05	-1,44E-04
21	-592	175	1155	11,03	-1,94E-04	4,14E-04	4,68E-01	-7,14E-05	3,58E-04
30	-616	366	1364	15,76	-2,43E-04	8,22E-04	2,95E-01	-1,53E-04	7,69E-04
40	-652	606	1626	21,02	-3,16E-04	1,33E-03	2,37E-01	-2,44E-04	1,23E-03
51	-677	776	1809	26,80	-3,67E-04	1,69E-03	2,17E-01	-3,44E-04	1,73E-03
63	-710	1032	2080	33,11	-4,35E-04	2,23E-03	1,95E-01	-4,53E-04	2,27E-03
70	-732	1197	2256	36,79	-4,79E-04	2,58E-03	1,86E-01	-5,17E-04	2,59E-03
81	-763	1428	2498	42,57	-5,43E-04	3,06E-03	1,77E-01	-6,17E-04	3,10E-03
93	-792	1679	2762	48,88	-6,02E-04	3,59E-03	1,68E-01	-7,26E-04	3,64E-03
100	-812	1840	2924	-	-	-	-	-	-
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів									
E = 11520,78 МПа					M = 0,19				
 ε <sub>01</sub> = 0,00013					 ε <sub>02</sub> = 0,0006				

## Продовження додатка А

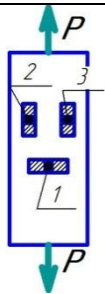
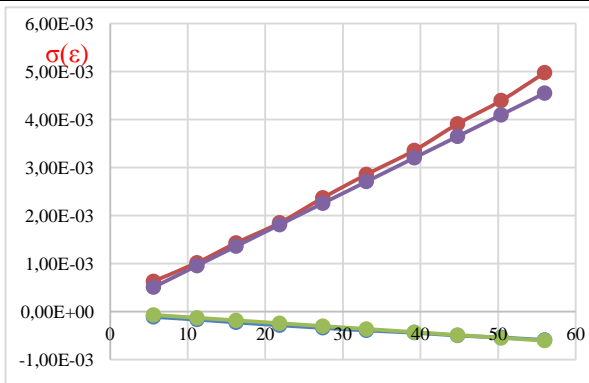
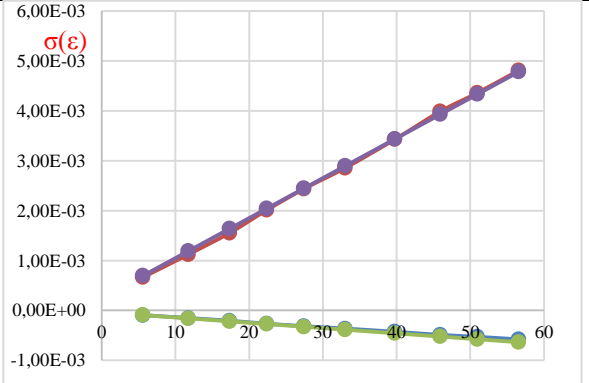
 <p>Скіз зразка із закріпленими тензорезисторами</p>				Параметри дослідного зразка №8						
				Ширина b, мм		Товщина h, мм			Площа A, мм	
1,13		16,20			18,31					
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 Р – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету										
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°										
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення		
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	
0	91	-743	610	-	-	-	-	-	-	
10	51	-520	846	5,46	-8,16E-05	4,68E-04	1,74E-01	-4,11E-05	3,36E-04	
19	24	-356	1009	10,37	-1,37E-04	8,02E-04	1,70E-01	-8,86E-05	7,24E-04	
30	-4	-146	1217	16,38	-1,94E-04	1,23E-03	1,58E-01	-1,47E-04	1,20E-03	
39	-26	57	1417	21,30	-2,39E-04	1,64E-03	1,46E-01	-1,94E-04	1,59E-03	
50	-53	302	1655	27,31	-2,94E-04	2,13E-03	1,38E-01	-2,52E-04	2,06E-03	
61	-82	581	1924	33,32	-3,53E-04	2,69E-03	1,31E-01	-3,10E-04	2,53E-03	
70	-101	769	2105	38,23	-3,92E-04	3,07E-03	1,28E-01	-3,58E-04	2,92E-03	
80	-127	1033	2365	43,70	-4,45E-04	3,60E-03	1,23E-01	-4,10E-04	3,35E-03	
90	-149	1268	2598	49,16	-4,90E-04	4,08E-03	1,20E-01	-4,63E-04	3,78E-03	
100	-174	1502	2840	54,62	-5,41E-04	4,56E-03	1,18E-01	-5,16E-04	4,22E-03	
0	84	-639	731	-	-	-	-	-	-	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	
0	83	-659	711	-	-	-	-	-	-	
12	47	-405	969	6,55	-8,98E-05	7,11E-04	1,26E-01	-7,15E-05	5,85E-04	
19	26	-247	1124	10,37	-1,33E-04	1,03E-03	1,29E-01	-1,08E-04	8,86E-04	
29	1	-51	1319	15,84	-1,84E-04	1,43E-03	1,28E-01	-1,61E-04	1,32E-03	
39	-24	168	1536	21,30	-2,35E-04	1,87E-03	1,25E-01	-2,14E-04	1,75E-03	
50	-50	387	1752	27,31	-2,88E-04	2,32E-03	1,24E-01	-2,72E-04	2,22E-03	
59	-74	604	1965	32,22	-3,37E-04	2,76E-03	1,22E-01	-3,19E-04	2,61E-03	
70	-99	837	2192	38,23	-3,88E-04	3,23E-03	1,20E-01	-3,77E-04	3,08E-03	
80	-127	1087	2437	43,70	-4,45E-04	3,73E-03	1,19E-01	-4,30E-04	3,52E-03	
92	-154	1343	2686	50,25	-5,00E-04	4,25E-03	1,18E-01	-4,93E-04	4,03E-03	
101	-176	1547	2886	-	-	-	-	-	-	
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів										
E=12672,66 МПа					μ=0,12					
 <p>ε<sub>01</sub> = -9,5E-05</p>					 <p>ε<sub>02</sub> = 6,73011E-05</p>					

## Продовження додатка А

 <p>Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами</p>				Параметри дослідного зразка №9						
				Ширина b, мм		Товщина h, мм			Площа A, мм	
				1,13		15,70			17,74	
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 Р – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету										
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°										
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення		
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	
0	0	114	-198	-	-	-	-	-	-	
10	0	485	207	5,63	0,00E+00	7,92E-04	0	0	6,65E-04	
20	0	667	376	11,27	0,00E+00	1,15E-03	0	0	1,12E-03	
30	0	876	575	16,90	0,00E+00	1,57E-03	0	0	1,57E-03	
40	0	1096	785	22,54	0,00E+00	2,00E-03	0	0	2,03E-03	
51	0	1388	1064	28,74	0,00E+00	2,59E-03	0	0	2,53E-03	
60	0	1598	1264	33,81	0,00E+00	3,00E-03	0	0	2,94E-03	
72	0	1870	1520	40,58	0,00E+00	3,54E-03	0	0	3,48E-03	
84	0	2181	1815	47,34	0,00E+00	4,16E-03	0	0	4,03E-03	
92	0	2380	2002	51,85	0,00E+00	4,56E-03	0	0	4,39E-03	
100	0	2595	2202	56,36	0,00E+00	4,98E-03	0	0	4,75E-03	
0	0	238	-48	-	-	-	-	-	-	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	
0	0	186	-130	-	-	-	-	-	-	
10	0	559	252	5,63	0,00E+00	9,13E-04	0	0	8,34E-04	
21	0	819	492	11,83	0,00E+00	1,42E-03	0	0	1,33E-03	
31	0	1028	689	17,47	0,00E+00	1,84E-03	0	0	1,79E-03	
39	0	1224	878	21,98	0,00E+00	2,23E-03	0	0	2,15E-03	
49	0	1462	1106	27,61	0,00E+00	2,71E-03	0	0	2,61E-03	
60	0	1708	1342	33,81	0,00E+00	3,20E-03	0	0	3,11E-03	
72	0	1972	1597	40,58	0,00E+00	3,73E-03	0	0	3,65E-03	
81	0	2178	1796	45,65	0,00E+00	4,14E-03	0	0	4,06E-03	
93	0	2440	2049	52,42	0,00E+00	4,66E-03	0	0	4,60E-03	
101	0	2634	2234	-	-	-	-	-	-	
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів										
E=12405,71 МПа					μ=0,00					
 <p>ε<sub>01</sub> = 0,00021</p>					 <p>ε<sub>02</sub> = 0,00037</p>					



## Продовження додатка А

 <p>Ескіз зразка із закріпленими тензорезисторами</p>				Параметри дослідного зразка №10						
				Ширина b, мм		Товщина h, мм			Площа A, мм	
				1,13		15,80			17,85	
Обладнання для зовнішнього навантаження: розривна машина моделі 2007 Р – 0,5, сертифікованої лабораторії Сумського державного університету										
Обладнання для одержання даних: система тензометрична СПТ – 3; тензодатчики R = 100 Ом, δ = 10мм, коефіцієнт тензочутливості K = 2,04·10 <sup>-6</sup> ; схема тензометрування: чверть моста; температура: t = 18°										
Показники безпосереднього вимірювання				Експериментальні значення				Теоретичні значення		
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	
0	-510	1985	-19	-	-	-	-	-	-	
10	-564	2279	308	5,60	-1,10E-04	6,33E-04	1,74E-01	-6,76E-05	5,09E-04	
20	-591	2461	505	11,20	-1,65E-04	1,02E-03	1,62E-01	-1,27E-04	9,58E-04	
29	-620	2655	714	16,24	-2,24E-04	1,43E-03	1,57E-01	-1,81E-04	1,36E-03	
39	-649	2851	928	21,84	-2,84E-04	1,85E-03	1,53E-01	-2,41E-04	1,81E-03	
49	-676	3098	1194	27,44	-3,39E-04	2,37E-03	1,43E-01	-3,01E-04	2,26E-03	
59	-702	3328	1440	33,04	-3,92E-04	2,86E-03	1,37E-01	-3,60E-04	2,71E-03	
70	-725	3567	1692	39,20	-4,39E-04	3,36E-03	1,31E-01	-4,26E-04	3,20E-03	
80	-754	3831	1971	44,80	-4,98E-04	3,91E-03	1,27E-01	-4,86E-04	3,65E-03	
90	-774	4061	2216	50,40	-5,39E-04	4,40E-03	1,22E-01	-5,45E-04	4,10E-03	
100	-799	4337	2507	56,00	-5,90E-04	4,98E-03	1,18E-01	-6,05E-04	4,55E-03	
0	-517	2088	103	-	-	-	-	-	-	
P, кгс	1	2	3	σ, МПа	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	μ	ε <sub>попер.</sub>	ε <sub>прод.</sub>	
0	-521	2071	83	-	-	-	-	-	-	
10	-567	2381	427	5,60	-9,38E-05	6,67E-04	1,41E-01	-9,27E-05	6,97E-04	
21	-595	2596	659	11,76	-1,51E-04	1,12E-03	1,34E-01	-1,58E-04	1,19E-03	
31	-622	2800	879	17,36	-2,06E-04	1,56E-03	1,32E-01	-2,18E-04	1,64E-03	
40	-651	3016	1112	22,40	-2,65E-04	2,01E-03	1,32E-01	-2,72E-04	2,04E-03	
49	-675	3217	1328	27,44	-3,14E-04	2,44E-03	1,29E-01	-3,26E-04	2,45E-03	
59	-699	3417	1539	33,04	-3,63E-04	2,86E-03	1,27E-01	-3,85E-04	2,90E-03	
71	-730	3690	1826	39,76	-4,26E-04	3,43E-03	1,24E-01	-4,57E-04	3,44E-03	
82	-761	3957	2108	45,92	-4,90E-04	3,99E-03	1,23E-01	-5,23E-04	3,93E-03	
91	-780	4134	2296	50,96	-5,28E-04	4,36E-03	1,21E-01	-5,76E-04	4,33E-03	
101	-805	4350	2522	-	-	-	-	-	-	
Результати обробки вимірювання за методом найменших квадратів										
E=12472,78 МПа					μ=0,13					
 <p>ε<sub>01</sub> = 5,96E-05</p>					 <p>ε<sub>02</sub> = 0,00024</p>					

## ДОДАТОК Б

Текст керуючої програми мовою програмування Python для одержання списку елементів моделі з файлу середовища COSMOSWORKS

```

fname = raw_input('Enter the file name: ')
try:
    fhand=open(fname)
except:
    print 'File cannot be opened:', fname
    exit()
fout=open('output.k', 'w')
count=0
a=0
for line in fhand:
    count=count+1
    if line.startswith(' 2412') :
        a=count
        d=a+1
        g=a+2
        h=a+3
    for line in fhand:
        count=count+1
        if line==' -1':
            break
        if count==d:
            c=line
            d=d+3
            fout.write('\n ')
            fout.write(c[3:10])
            fout.write(' 2')
            fout.write('\n ')
        if count==g:
            e=line
            g=g+3
            fout.write(e[3:10])
            fout.write(e[12:20])
            fout.write(e[22:30])
            fout.write(e[32:40])
            fout.write(e[42:50])
            fout.write(e[52:60])
            fout.write(e[62:70])
        if count==h:
            f=line
            h=h+3
            fout.write(f[2:10])
            fout.write(f[12:20])
            fout.write(e[72:80])
fout.close()
print 'Line Count:', count

```

## ДОДАТОК В

## Командний файл LS-DYNA

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PREPOST 2.4
$# Created on Apr-04-2018 (09:16:35)
*KEYWORD MEMORY=100000000
*TITLE
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost *C
*CONTROL_ACCURACY
$#   osu       inn       pidosu
      1         1         0
*CONTROL_ENERGY
$#   hgen      rwen      slnten      rylene
      2         1         2         1
*CONTROL_OUTPUT
$#   npopt     neecho     nrefup     iaccop     opifs     ipnint     ikedit
iflush
      0         1         0         0         0.000         0         2000         0
$#   iprtf     ierode     tet10     msgmax     ipcurv
      0         0         2         50         0
*CONTROL_TERMINATION
$#   endtim     endcyc     dtmin     endeng     endmas
      1.000000     0         0.000     0.000     0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#   dtinit     tssfacc     isdo     tslimt     dt2ms     lctm     erode     mslst
      0.000     0.900000     1         0.000     1.6000E-5     0         0         0
$#   dt2msf     dt2mslc     imsc1
      0.000         0         0
*DATABASE_NODFOR
$#   dt       binary     lcur     ioopt
      0.001000     1         0         1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#   dt       lcdt     beam     npltc     psetid
      0.100000     0         0         50         0
$#   ioopt
      0
*DATABASE_FORMAT
$#   iform     ibinary
      0         0
*SET_PART_LIST
$#   sid       da1       da2       da3       da4
      1         0.000     0.000     0.000     0.000
$#   pid1     pid2     pid3     pid4     pid5     pid6     pid7
pid8
      1         0         0         0         0         0         0         0
*CONSTRAINED_GLOBAL
$#   tc       rc       dir       x       y       z
      1         2         1         0.000     0.000     0.000
      2         1         2         0.000     0.000     0.000
*DAMPING_GLOBAL
      0 200.00000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
*INCLUDE
$# filename
2.K
*INCLUDE
$# filename
3.K
*END

```

## ДОДАТОК Г

Акти впровадження, ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус», державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Акт впровадження в учбовий процес СумДУ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**



Перший проректор,  
проректор з навчальної роботи  
В.Д. Карпуша  
2019 р.

**АКТ**

14 березня 2019 р.

м. Суми

Про впровадження  
результатів дисертаційної роботи  
Довгополова А.Ю. у навчальний процес.

Складений комісією у складі:

Голова комісії – зав. кафедри технології машинобудування верстатів та інструментів, д-р. техн. наук В.О. Залого,  
– доцент кафедри технології машинобудування верстатів та інструментів, канд. техн. наук А.В. Євтухов,  
– ст. викладач кафедри технології машинобудування верстатів та інструментів, канд. техн. наук І.М. Дегтярьов,

Встановлено, що в процесі підготовки дисертаційної роботи викладачем-стажистом кафедри технології машинобудування верстатів та інструментів Довгополовим А.Ю. на тему «Забезпечення міцності роз'ємного гвинтового з'єднання формоутвореного в армованому композиційному матеріалі» (науковий керівник – к.т.н., доцент. Некрасов С. С.) у навчальний процес впроваджено наступне:

- результати досліджень використовуються викладачами кафедри при викладанні для студентів спеціальності «Галузеве машинобудування» курсу «Теорія різання».
- розроблене здобувачем нормативно – методичне забезпечення та технологічне оснащення використовується студентами спеціальності «Галузеве машинобудування» при підготовці курсових та випускних робіт.

Голова комісії

Члени комісії:

В.О. Залого

А.В. Євтухов

І.М. Дегтярьов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник Генерального  
 конструктора – Генерального директора з  
 системного проектування  
 ДП «КБ «Південне»



О.П. Кушнар'ов

«04» лютого 2019 р.

## АКТ

впровадження матеріалів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня  
 кандидата технічних наук  
 випускника аспірантури Сумського державного університету,  
 Довгополова Андрія Юрійовича

04.02. 2019 р.

м. Дніпро

Даним актом засвідчується, що матеріали дисертаційної роботи Довгополова Андрія Юрійовича на тему: «Забезпечення міцності роз'ємного гвинтового з'єднання формоутвореного в армованому композиційному матеріалі» впроваджені на державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» і використовуються для проектування, розрахунку та виготовлення профільної продукції підприємства.

Отримані наукові результати та засновані на них технічні рішення дозволили розширити використання роз'ємних з'єднань деталей, виконаних з армованих композиційних матеріалів.

Провідний конструктор

О. О. Шахматов

Виконавець

А.Ю. Довгополов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Науково-виробнича  
компанія «Папірус»

В.В. Лупирь

«19» березня 2019 р.



АКТ

впровадження матеріалів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

випускника аспірантури Сумського державного університету,

Довгополова Андрія Юрійовича

19.03.2019 р.

м. Суми

Даним актом засвідчується, що матеріали дисертаційної роботи Довгополова Андрія Юрійовича на тему: «Забезпечення міцності роз'ємного гвинтового з'єднання формоутвореного в армованому композиційному матеріалі» впроваджені на ТОВ «Науково-виробнича компанія «Папірус» і використовуються для проектування, розрахунку та виготовлення профільної продукції підприємства.

Отримані наукові результати та засновані на них технічні рішення дозволили розширити використання роз'ємних з'єднань деталей, виконаних з армованих композиційних матеріалів.

Провідний конструктор

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'O. I. Lupir'.

О. І. Лупирь

Виконавець

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'A. Yu. Dovgopolo'.

А.Ю. Довгополов

## ДОДАТОК Д

## Список публікацій за темою дисертації

*Статті у фахових виданнях України:*

1. Довгополов А. Ю. Утворення роз'ємних з'єднань деталей із вуглепластику / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 3. – С. 11-15.
2. Довгополов А. Ю. Роз'ємні з'єднання деталей, виготовлених із вуглепластику / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – Вип. 11. – С. 102-109.
3. Довгополов А. Ю. Дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком у деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – № 16 (1292). – С. 22-26.
4. Довгополов А. Ю. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби з великим кроком / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, С. О. Чигрин, І. В. Калюжний // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 2 (82). – С. 166-173.
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 «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХП», 2019. – № 5 (1330). – С. 10-17.

*Статті у зарубіжних виданнях:*

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

*Тези доповідей:*

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: матеріали IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. – 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. – Чернігів, 2017, Т. 1. – С. 157.

6. Довгополов А. Ю. Технологія обробки круглої зовнішньої різьби / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Є. А. Агеєва // Сучасні технології у промисловому виробництві : науково-технічна конференція – 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 в 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 в 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 у 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:*

2. 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.