

УДК 621.763-233.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗ'ЄМНОГО З'ЄДНАННЯ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ СЕА

А. Ю. ДОВГОПОЛОВ^{1*}, С. С. НЕКРАСОВ¹, Д. О. ЖИГИЛІЙ²

¹ кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

² кафедра загальної механіки та динаміки машин, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

*e-mail: d_a_u_@ukr.net

АНОТАЦІЯ З метою дослідження міцності запропонованого роз'ємного з'єднання з круглою різьбою для деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, було проведено моделювання напружено-деформованого стану з використанням системи скінченно-елементного аналізу LS-DYNA. Моделювання напружено-деформованого стану відбувалося для різьбового з'єднання з круглою різьбою, основними параметрами, що впливають на працездатність, якого вважаються p – крок різьб ($p = 4$ мм), і t – глибина профілю різьби ($t = 1$ мм) (профіль зображено на рис. 2) згідно з ISO 10208 та DIN 20317. Основні параметри різьби, що брали для моделювання, були наближені до параметрів, які має метрична різьба М6 (ГОСТ 24705-81). Гайка з армованих композиційних матеріалів із круглою внутрішньою різьбою та металева вставка із зовнішньою різьбою для проведення моделювання були виконані у вигляді 3D-CAD-моделей у графічному редакторі SOLIDWORKS, для скорочення часу розрахунків із з'єднання був вирізаний окремий сегмент. Створення скінченно-елементної сітки також виконане засобами цього графічного редактора, до складу якого входить модуль COSMOSWORKS, що має вбудований генератор даної сітки. Розмір скінченних елементів гайки з армованого композита вибирали виходячи з того, щоб розрахунок займав прийнятний час. Розмір грані скінченного елемента становив від 0,05 до 0,15 мм. Механічні характеристики армованого композиційного матеріалу отримували експериментальним шляхом та вносили до командного файлу LS-DYNA за допомогою двох ключових слів: *MAT_COMPOSITE_DAMAGE – модель матеріалу тип 22 та *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC – модель матеріалу тип 10. Поєднання цих ключових слів при створенні моделі анізотропного тіла дозволило в повному обсязі задати всі механічні властивості армованого склопластикового матеріалу для моделювання. Одержані в результаті основні показники міцності виявилися на досить високому рівні – максимальна сила, яку витримало з'єднання, згідно з даними моделювання становила $F_{max} = 13,76$ кН. Максимальні напруження та деформації згідно з опрацьованими в постпроцесорі LS-PrePost-2.4 даними моделювання варіюються в досить високих межах, що підверджує гіпотезу адекватної роботи роз'ємного різьбового з'єднання з круглою різьбою в деталях, виготовлених з армованих композитів, через відсутність гострих концентраторів напружень та дає підставу для подальшого проведення експериментального дослідження міцності.

Ключові слова: армовані композиційні матеріали; роз'ємне різьбове з'єднання; моделювання; міцність; кругла різьба; деформації.

STRAIN-STRESS STATES SIMULATION OF DETACHABLE JOINT FOR REINFORCED COMPOSITES BY FEM

А. DOVGOPOLOV^{1*}, S. NEKRASOV¹, D. ZHYHYLIY²

¹ Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

² Department of General mechanics and dynamics of machines, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT The strain-stress state simulation has been made by FEM (finite element method) simulation software LS-DYNA for strength investigation of proposed rope thread detachable joint for reinforced composites. The stress-strain state simulation occurred for the rope thread detachable joint for reinforced composites. Main affecting working efficiency parameters are p – a screw thread pitch ($p = 4$ mm), and t – a thread depth ($t = 1$ mm, the profile is depicted in Figure 2) according to ISO 10208 and DIN 20317. The main thread parameters for modeling have been approximated to metric thread M6 (GOST 24705-81). The nut made of reinforced composites with inner rope thread and a metal threaded insert for simulation have been presented as the 3D computer-aided engineering models formed in computer program SOLIDWORKS. A separate segment is cut to the calculation time reduce. Also, a finite-element mesh is created by mentioned program: it includes a module of finite-element analysis COSMOSWORKS, which has a built-in finite element mesh generator. The finite element's size of a reinforced composite nut is chosen based on reasonability for calculation time. The edge finite element's size was from 0.05 up to 0.15 mm. The elastic properties of the reinforced composite material have been obtained experimentally and input into the LS-DYNA command file, using the two keywords *MAT_COMPOSITE_DAMAGE – material model type 22 and *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC – material model type 10. A combination of these key data in creating an anisotropic rigid body model has allowed to fully fulfill simulation of all fiber reinforced material's mechanical properties during modeling. The resulting main strength properties are appeared to be high enough - the maximum axial force that the compound withstands according to the simulation has been found equal to 13.76 kN. The maximal stresses and strains according to the postprocessor LS-PrePost-2.4 results vary in rather high limits, which underscore

the hypothesis of rope thread detachable joint's performance adequacy in the reinforced composite parts due to the absence of sharp stress concentrators, and provide the basis for further experimental strength study.

Keywords: reinforced composites; detachable thread joint; simulation; strength; rope thread; strain.

Вступ

Сьогодні композиційні матеріали широко використовують у технологічно передових галузях виробництва, таких як авіаційна, морська й автомобільна промисловість, для яких знижена вага забезпечує високі динамічні характеристики і низьку витрату палива. Складність структур у зазначених сферах виробництва вимагає великої кількості з'єднань. Здебільшого приєднання деталей виготовлених з армованих композиційних матеріалів (АКМ), реалізують шляхом склеювання або зварювання їх одна з одною для створення нероз'ємного з'єднання. Саме тому більшість досліджень проводять для визначення напружено-деформованого стану класичних нероз'ємних з'єднань деталей з АКМ, таких як болтові, заклепкові, клейові, детально результати деяких із них описані в працях [1-3].

Що ж стосується роз'ємних з'єднань деталей, виготовлених з АКМ то найбільш застосовуваними є різьбові з'єднання, які мають свою специфіку виготовлення та застосування, але сама конструкція цього типу з'єднання являється роз'ємною [4].

Цей тип з'єднання деталей, виготовлених з армованих композитів, реалізується або за допомогою виготовлення різьби на поверхнях з'єднуваних деталей, або за допомогою розміщення в деталях з АКМ металевих кріпильних вставок (рис. 1 а, б), в яких уже виконана різьба, через яку й відбувається подальше з'єднання. Конструкція різьби, якщо вона формують на деталі з армованого композита (її діаметр і профіль), відрізняється від конструкції стандартних типів різьб [5], а це, у свою чергу викликає додаткові труднощі під час її виготовлення. Саме тому більшість конструкцій, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, що передбачають сполучення елементів за допомогою різьби, з'єднуються за допомогою металевих елементів з виконаною в них різьбою, які в подальшому заформовуються в цей матеріал.



Рис. 1 – Реалізація різьбового з'єднання в армованому композиті за допомогою вставки:

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

Останніми роками була опублікована велика кількість наукових праць присвячених дослідженню

різьбових вставок, заформованих в АКМ, на міцність. Серед яких у роботі L. Adam [6] проведено експериментально-числове дослідження міцності цих вставок, заформованих у різні типи армованих композиційних матеріалів. Із його дослідження одержана залежність між результатами моделювання та експериментальними даними з точки зору кривих навантажень і прогнозування руйнування.

У науковій праці [7] проведено експериментально-числове дослідження різних типів руйнування склопластику в місцях заформовування вставок залежно від типу використовуваної матриці (епоксидної смоли). Аналогічне дослідження було проведене в роботі [8], але в цьому разі використовували композиційний матеріал, армований вуглцевими волокнами.

Що ж стосується дослідження міцності різьбового з'єднання зі спеціальним профілем, в якому різьбова поверхня формують на деталях з АКМ, на сьогоднішні вони залишаються мало дослідженими. У свою чергу, згідно з роботою В. Г. Комарова [9] різьбове з'єднання з різьбою, що має круглий профіль, формований на поверхнях деталей з армованих композитів, повинне мати досить непогані показники міцності. Цей профіль за рахунок конструктивних особливостей, а саме відсутності гострих концентраторів напружень через відповідну форму, якнайкраще підходить для реалізації роз'ємного різьбового з'єднання в деталях із наведених матеріалів.

На основі вищезазначеного твердження було вирішено провести моделювання напружено-деформованого стану роз'ємного різьбового з'єднання з різьбою що має круглий профіль, методом скінченно-елементного аналізу для перевірки гіпотези високих показників міцності цього з'єднання.

Мета роботи

Моделювання з використанням системи скінченно-елементного аналізу LS-DYNA напружено-деформованого стану роз'ємного різьбового з'єднання з різьбою круглого профілю в деталях виготовлених з армованих композиційних матеріалів.

Викладення основного матеріалу

Моделювання напружено-деформованого стану методом скінченно-елементного аналізу (СЕА) відбувалося для різьбового з'єднання з круглою різьбою, основними параметрами, що впливають на працездатність, якого вважаються p – крок різьби, і t – глибина профілю, (профіль зображено на рис. 2) згідно з ISO 10208 [10] та DIN 20317 [11]. Також на

рисунку 2 показані зовнішній D і внутрішній D_1 діаметри різьби та R_1 і R_2 – радіуси вершин і западин профілю відповідно.

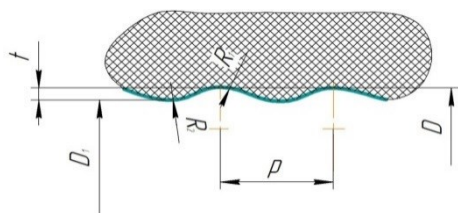


Рис. 2 – Основні параметри круглої внутрішньої різьби

Основні параметри різьби, які брали для моделювання були наближені до параметрів, що має метрична різьба М6 (ГОСТ 24705-81) [12]. Цей вибір зумовлений можливістю подальшого виготовлення зазначеної різьби, з використанням існуючого обладнання й технологічного оснащення, наявного на базі лабораторії кафедри Технології машинобудування верстатів та інструментів Сумського державного університету. Адже в результаті планується одержати практичні показники міцності з'єднання для підтвердження даних моделювання.

Моделювання напружено-деформованого стану в системі скінченно-елементного аналізу LS-DYNA буде наведене для варіанта круглої різьби з параметрами $p = 4$ мм та $t = 1$ мм. Гайка з АКМ з круглою внутрішньою різьбою та металева вставка із зовнішньою різьбою для проведення моделювання були виконані у вигляді 3D-CAD-моделей у графічному редакторі SOLIDWORKS, для скорочення часу розрахунків із з'єднання був вирізаний окремий сегмент, з яким і будуть проводитися всі подальші операції (рис. 3). Відповідно до рекомендацій, зазначених у роботі Д. В. Криворучка [13], для отримання достовірних даних моделювання методом скінченно-елементного аналізу між зовнішньою та внутрішньою різьбовими поверхнями з'єднання був заданий гарантований зазор 0,05 мм (рис. 3).

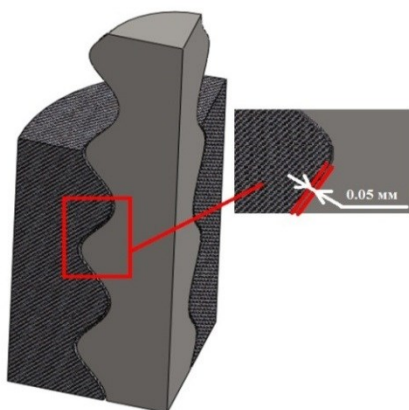


Рис. 3 – 3D-CAD-модель з'єднання в графічному редакторі SOLIDWORKS

Створення скінченно-елементної сітки виконане засобами SOLIDWORKS, до складу якого входить модуль скінченно-елементного аналізу COSMOSWORKS, що має вбудований генератор представленої сітки. У нашому випадку використовували тетраедричні скінченні елементи (СЕ) з 10 вузлами. Розмір скінчених 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 різьбових поверхонь розміри СЕ були зроблені меншими для отримання 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 4 подана СЕ сітка елементів запропонованого з'єднання.

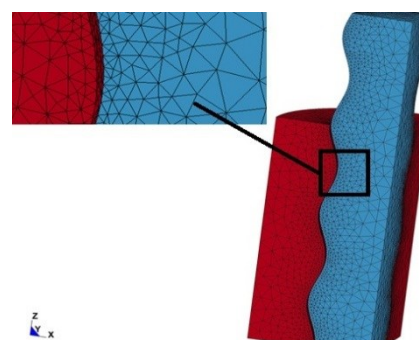


Рис. 4 – Скінченно-елементна сітка складових системи моделювання

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 з файлу середовища COSMOSWORKS.

Механічні граничні умови задавали жорстким закріпленням декількох границь гайки з АКМ. У цьому разі гайку жорстко закріплювали по зовнішній діаметральній поверхні (рис. 5). Для вставки задавали обмеження переміщення вздовж осей X та Y . Початкові умови для вставки задавали поступальним переміщенням її вздовж осі Z , механічні навантаження – переміщенням вставки згідно зі схемою закріплення вздовж її осі з відповідною швидкістю.

Під час моделювання всі механічні характеристики армованого композиційного матеріалу (тобто створення моделі матеріалу) задавали як для лінійного пружного ортотропного тіла, отримання всіх фізико-механічних характеристик та їх математичне формулювання описано в роботі С. М. Верещаки [14]. Ці механічні характеристики були отримані шляхом дослідження

зразків з армованого склопластикового матеріалу на розтягування та стискання. Що ж стосується внесення механічних характеристик запропонованої моделі матеріалу до командного файлу LS-DYNA, було використано два ключових слова для опису моделі матеріалу. Це *MAT_COMPOSITE_DAMAGE – модель матеріалу тип 22, та *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC – модель матеріалу тип 10. Поєднання цих ключових слів при створенні моделі анізотропного тіла дозволило в повному обсязі задати всі механічні властивості армованого склопластикового матеріалу, для моделювання. У табл. 1 наведено опис моделей матеріалу в командному файлі LS-DYNA.

Таблиця 1 – Опис моделей матеріалу в командному файлі LS-DYNA

*MAT COMPOSITE DAMAGE									
MID	RO	E _A	E _B	E _C	PRBA	PRCA	PRCB	G _{AB}	-
22	20*E ⁶	26,9	26,9	11,4	0,10	0,18	0,18	4,34	-
G _{BC}	G _{CA}	K _{init}	AOPT	MACF	-	-	-	-	-
2,7	2,7	0	2,0	1,0	-	-	-	-	-
X _p	Y _p	Z _p	A ₁	A ₂	A ₃	-	-	-	-
0	0	0	1,0	0	0	-	-	-	-
V ₁	V ₂	V ₃	D ₁	D ₂	D ₃	BETA	-	-	-
0	0	0	0	1,0	0	0	-	-	-
S _C	X _T	Y _T	Y _C	ALPH	S _N	S _{VZ}	S _{ZX}	-	-
50	200	200	180	0	16	30	30	-	-
*MAT ORTHOTROPIC ELASTIC									
MID	RO	E _A	E _B	E _C	PRBA	PRCA	PRCB	G _{AB}	-
10	2,0*E ⁻⁶	26,9	26,9	11,4	0,10	0,18	0,18	4,34	-
-	G _{BC}	G _{CA}	AOPT	G	SIGF	-	-	-	-
-	2,7	2,7	2,0	300	1,0	-	-	-	-
-	X _p	Y _p	Z _p	A ₁	A ₂	A ₃	MACF	-	-
-	0	0	0	1,0	0	0	1	-	-
-	V ₁	V ₂	V ₃	D ₁	D ₂	D ₃	BETA	REF	-
-	0	0	0	0	1,0	0	0	0	-

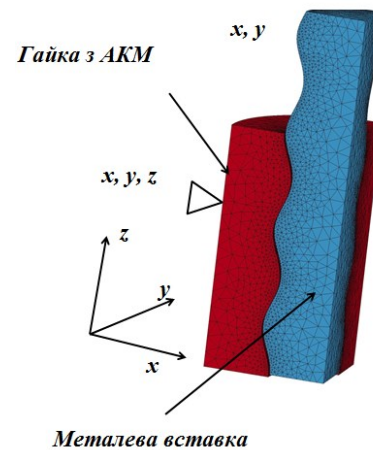


Рис. 5 – Розрахункова схема та граничні умови моделі НДС з'єднання з армованих композиційних матеріалів

Функцію *HOURLGLASS використовували для процедури пригнічення безенергетичних форм деформацій елементів, з метою перевизначення значень за замовчуванням.

Що ж до моделі матеріалу вставки із зовнішньою круглою різьбою, то для неї було використано ключове слово *MAT_RIGID – модель матеріалу тип 20. Деталі, описані цим матеріалом, вважаються абсолютно твердими тілами.

Форму контакту під час виконання моделювання задавали такою: початковий зсув (тобто зазор та початкове зміщення не враховуються), контакт без поділу (ковзання допускається). Контакт задавали між двома формоутвореними різьбовими поверхнями за допомогою ключового слова *CONTROL_CONTACT, тип контакту визначався модулем *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID. За допомогою цього алгоритму можна одержати стійке розв'язання контактної задачі, перевагою якого є можливість створення узагальненої залежності $\mu_a = \mu_a(v, p)$, де p – контактний тиск шляхом створення таблиці відповідної функції у карті *DEFINE_TABLE і посилання на неї в параметрі FD при FS = 2. Що в нашому випадку й було зроблено.

Модель тертя вважали для моделювання такою: було зазначено, що тертя, яке відбувається між елементами з'єднання, – це кулонівське тертя. Основний параметр, потрібний для моделювання – це коефіцієнт тертя, який визначали експериментально за рахунок визначення кута тертя, в даному разі 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. Далі складали об'єкти в цілісну систему. За допомогою ключового слова *INCLUDE файли об'єктів підключали до єдиного командного файлу. В

наведеному файлі «2.k» є файлом з інформацією про металеву вставку із зовнішньою різьбою, «3.k» є файлом з інформацією про гайку з АКМ із внутрішньою різьбою. В результаті розрахунку ми повинні отримати тензори напружень у гаусових точках скінчених 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.

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

Для зазначеного на початку розрахунків варіанта з основними параметрами різьби $p = 4 \text{ мм}$ $t = 1 \text{ мм}$ маємо такі показники максимальних напружень та деформацій, показані на рисунку 6.

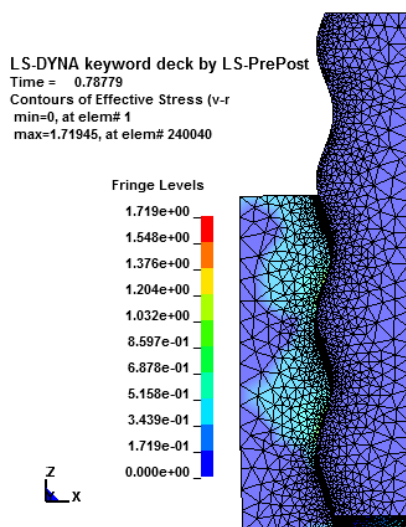


Рис. 6 – Показники максимальних напружень та деформацій у середовищі LS-DYNA

Графічні модулі постпроцесора LS-PrePost-2.4 дозволяють нам побудувати графік залежності результуючої сили від часу, але в цьому разі графік, одержаний за допомогою даних модулів, не є повністю правильним. Оскільки на початковому етапі моделювання була взята для роботи четверта частина з'єднання, для прискорення часу розрахунків, а отже, для повних показників сили потрібно одержати значення збільшити в 4 рази. На рисунку 7 показаний графік залежності результуючої сили від часу, виконаний у табличному процесорі MS-Excel для роботи з електронними таблицями.

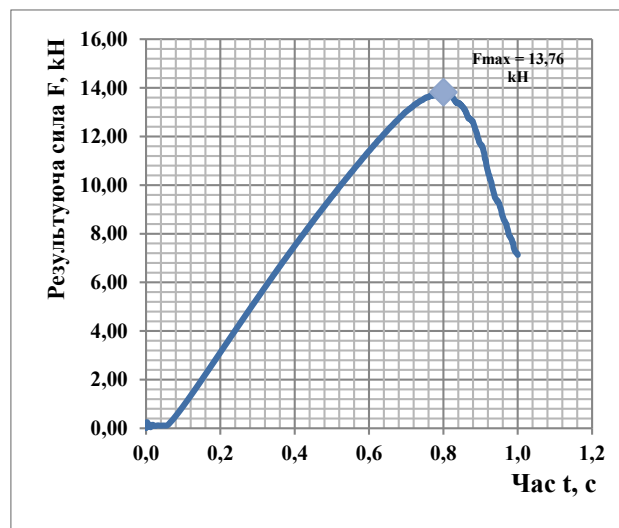


Рис. 7 – Графік залежності результуючої сили від часу

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

Висновки

Унаслідок проведеного моделювання напружено-деформованого стану методом скінченно-елементного аналізу в системі LS-DYNA, роз'ємного різьбового з'єднання з круглою різьбою, в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, було отримано основні показники міцності даного з'єднання, що виявилися на досить високому рівні. Згідно з результатами моделювання показник максимальної сили, яку витримує з'єднання становив $F_{max} = 13,76 \text{ кН}$. Значення максимальних напружень та деформацій згідно з опрацьованими в постпроцесорі LS-PrePost-2.4 даними варіюються в досить високих межах, що підтверджує зазначену на початку гіпотезу та дає підставу для подальшого проведення експериментального дослідження міцності.

Список літератури

1. Schürmann, H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff Verbunden / H. Schürmann // Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Ausgabe. – 2007. – № 2. – 672 p. – doi:10.1007/978-3-540-72190-1.
2. Marannano, G. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints / G. Marannano, B. Zuccarello // Compos. B. Eng. – 2015 – № 71. – P. 28-39. – doi:10.1016/j.compositesb.2014.11.025.

3. 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, H. A. Yang // *Compos. Sci. Technol.* – 2003. – № 63 (1). – P. 33-40. –doi: 10.1177/0021998316636458.
4. Sen, F. Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints / F. Sen, A. Kemal // *Cankaya University Journal of Science and Engineering (CUJSE)*. – 2011. – Vol. 8. – № 1. – P. 1-13.
5. Воробей, В. В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В. В. Воробей, О. С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
6. Adam, L. Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates. / L. Adam, C. Buvet, B. Castanié, A. Daidié, E. Bonhomme // *Compos. Struct.* – 2012. – № 94(10). – P. 18-32. – doi: 10.1016/j.compstruct.2012.05.008.
7. Catalanotti, G. Experimental and numerical study of fastener pull-through failure in GFRP laminates / G. Catalanotti, P. P. Camanho, P. Ghys, A. T. Marquez // *Compos. Struct.* – 2011. – № 94(1). – P. 28-38. –doi: 10.1016/j.compstruct.2011.06.021.
8. Elder, D. J. Fastener pull-through in a carbon fibre epoxy composite joint / D. J. Elder, A. H. Verdaasdonk, R. S. Thomson // *Compos. Struct.* – 2008. – № 86. – P. 1-3. –doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.041.
9. Комаров Г. В. Соединения деталей из полимерных материалов / Г. В. Комаров. – Санкт-Петербург : Изд-во Профессия, 2006. – 592 с.
10. ISO 10208. Rock drilling equipment left-hand rope threads (1991).
11. DIN 20317. Rock drilling – Round thread connections for percussive drilling equipment – Dimensions, design (2014).
12. ГОСТ 24705–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры.
13. Криворучко, Д. В. Основи 3D-модельювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів : навчальний посібник / Д. В. Криворучко, В. О. Залого, В. Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.
14. 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.
2. Marannano, G., Zuccarello, B. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints. *Compos. B Eng.*, 2015, **71**, 28-39, doi:10.1016/j.compositesb.2014.11.025.
3. Rhee, K. Y., Yang, H. A. A study on the peel and shear strength of aluminum/CFRP composites surface-treated by plasma and ion assisted reaction method. *Compos. Sci Technol.*, 2003, **63**(1), 33-40, doi:10.1177/0021998316636458.
4. Sen, F., Kemal A. Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints. *Cankaya University Journal of Science and Engineering (CUJSE)*, 2011, **1**, 1-13.
5. Vorobey, V. V. Sirotkin, O. S. Construction joints in composite materials Mashebuilding, 1985, 168.
6. Adam, L., Buvet, C., Castanié, B., Daidié, A., Bonhomme, E. Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates. *Compos. Struct.*, 2012, **94** (10), 18-32, doi:10.1016/j.compstruct.2012.05.008.
7. Catalanotti, G., Camanho, P. P., Ghys, P., Marquez, A. T. Experimental and numerical study of fastener pull-through failure in GFRP laminates. *Compos. Struct.*, 2011, **94**(1), 28-38, doi:10.1016/j.compstruct.2011.06.021.
8. Elder, D. J., Verdaasdonk, A. H., Thomson R. S. Fastener pull-through in a carbon fibre epoxy composite joint. *Compos. Struct.*, 2008, **86**, 1-3, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.041.
9. Komarov, G. V. Soyedineniya detaley iz polimernykh materialov. St. Petersburg, 2006, 592.
10. ISO 10208. Rock drilling equipment, left-hand rope threads (1991).
11. DIN 20317. Rock drilling – Round thread connections for percussive drilling equipment – Dimensions, design (2014).
12. GOST 24705–81 Osnovnyie normy vzaimozamenyaemosti. Rezba metriceskaya. Osnovnyie razmeryi [Basic standards of interchangeability. Metric thread. Main dimensions].
13. Krivoruchko, D. V., Zaloga, V. A., Korbach, V. G. Osnovi 3D-modelyuvannya protsesiv mehanichnoyi obrobki metodom skinchenih elementiv : navchalnyi posibnik [Fundamentals of 3D modeling of machining processes by the finite element method: tutorial], Sumi, Vid-vo SumDU, 2010, 208.
14. Vereschaka, S. M. Uprugie postoyannye i obobshchennye harakteristiki zhestkosti materiala sloistoy strukturyi, *Vestnik Nats. tehn. un-ta "KhPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyip. : Dinamika i prochnost mashin [Bulletin of the National tech un "KhPI": Dynamics and strength of machines]*, 2008, **36**, 29-40.

Bibliography (transliterated)

1. Schürmann, H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff Verbunden. *Springer-Verlag*, **2**, 2007, 672, doi:10.1007/978-3-540-72190-1.

Відомості про авторів (About authors)

Довгополов Андрій Юрійович – аспірант, Сумський державний університет, кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів (ТМВІ), м. Суми, Україна; e-mail: d_a_y_@ukr.net

Andriy Dovgopolog – postgraduate, Sumy State University, Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: d_a_y_@ukr.net.

Некрасов Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів (ТМВІ), м. Суми, Україна; e-mail: nekrasovss@gmail.com.

Sergiy Nekrasov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: nekrasovss@gmail.com.

Жигилій Дмитро Олексійович – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри загальної механіки та динаміки машин (ЗМ і ДМ), м. Суми, Україна; e-mail: zhigiliy.d@gmail.com.

Dmytro Zhyhlyii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Department of General Mechanics and Dynamics of Machines, Sumy, Ukraine; e-mail: zhigiliy.d@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Довгополов, А. Ю. Моделирование напряженно-деформированного stanu роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів методом СЕА / **А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Д. О. Жигилій** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 10-16. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

Please cite this article as:

Dovgoplov, A., Nekrasov, S., Zhyhylii, D. Strain-stress states simulation of detachable joint for reinforced composites by FEM / *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 10-16, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Довгополов, А. Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния разъемного соединения в деталях из армированных композиционных материалов методом КЭА / **А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Д. О. Жигилій** // *Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 10-16. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

АННОТАЦІЯ С целью исследования прочности предложенного разъемного соединения с круглой резьбой для деталей, изготовленных из армированных композиционных материалов, было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния с использованием системы конечно-элементного анализа LS-DYNA. Моделирование напряженно-деформированного состояния происходило для резьбового соединения с круглой резьбой, основными параметрами, влияющими на работоспособность которого, считаются p – шаг резьбы ($p = 4$ мм) и t – глубина профиля резьбы ($t = 1$ мм), (профиль изображен на рис. 2) согласно ISO 10208 и DIN 20317. Основные параметры резьбы, использованные для моделирования, были приближены к параметрам, которые имеет метрическая резьба М6 (ГОСТ 24705-80). Гайка из армированных композиционных материалов с круглой внутренней резьбой и металлическая вставка с наружной резьбой для проведения моделирования были выполнены в виде 3D-CAD-моделей в графическом редакторе SOLIDWORKS, для сокращения времени расчетов с соединения был вырезан отдельный сегмент. Создание конечно-элементной сетки также выполнено средствами данного графического редактора: в состав которого входит модуль COSMOSWORKS, имеющий встроенный генератор данной сетки. Размер конечных элементов гайки с армированного композита выбирали исходя из того, чтобы расчет занимал приемлемое время. Размер грани конечного элемента составил от 0,05 до 0,15 мм. Механические характеристики армированного композиционного материала были получены экспериментальным путем и вносили их в командный файл LS-DYNA с помощью двух ключевых слов: *MAT_COMPOSITE_DAMAGE – модель материала, тип 22, и *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC – модель материала, тип 10. Сочетание данных ключевых слов при создании модели анизотропного тела позволило в полном объеме задать все механические свойства армированного стеклопластикового материала для моделирования. Полученные в результате основные показатели прочности оказались на достаточно высоком уровне – максимальная сила, которую выдержало соединение по данным моделирования составила $F_{max} = 13,76$ кН. Максимальные напряжения и деформации согласно обработанных в постпроцессоре LS-PrePost-2.4 данных моделирования варьируют в достаточно высоких рамках, что подтверждает гипотезу адекватной работы резьбового соединения с круглой резьбой в деталях, изготовленных из армированных композитов за отсутствия острых концентраторов напряжений, и дает основание для дальнейшего проведения экспериментального исследования прочности.

Ключевые слова: армированные композиционные материалы; разъемное резьбовое соединение; моделирование; прочность; круглая резьба; деформации.

Надійшла (received) 04.02.2019