Т Е Х Н І Ч Н І Н А У К И

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-286-6-156-165

УДК 621.88

МОДЕЛЮВАННЯ АДГЕЗІЙНО-ПРЕСОВОГО З'ЄДНАННЯ СКЛОПЛАСТИКОВОГО СТЕРЖНЯ ЗІ СТАЛЕВОЮ ОБОЛОНКОЮ

Чудик І.І., Копей Б.В., Копей В.Б., Пронюк І.В.

MODELING OF ADHESIVE-PRESS JOINT OF FIBERGLASS ROD WITH STEEL SHELL

Chudyk I.I., Kopei B.V., Kopei V.B., Proniuk I.V.

Для повноцінного використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) необхідне створення надійних з'єднань ПКМ/метал. Створення таких з'єднань є складною науково-технічною проблемою, ще пов'язано з ортотропною природою ПКМ. Виконано огляд найбільш перспективних методів утворення таких з'єднань (механічних, адгезійних, зварних та інших). Розроблено нову конструкцію адгезійно-пресового з'єднання склопластикового стержня зі сталевою оболонкою, що застосовується в насосних штангах для видобування нафти. З'єднання утворюється шляхом загвинчування непошкодженого стержня без різьби в сталевий ніпель з гвинтовою нарізкою, яка має клиноподібний профіль і наповнена рідким адгезивом. В результаті утворюється пресова посадка, а полімеризація адгезиву забезпечує додаткову міцність за рахунок системи клинів, що утримують стержень під час розтягу. Конструкція об'єднує переваги адгезійних, пресових і різьбових з'єднань. Для дослідження міцності та оптимізації з'єднання розроблено параметричну скінченно-елементну модель з двома кроками симуляції. На першому кроці моделюється утворення посадки з натягом та полімеризація клею і реєструються максимальні еквівалентні напруження в стержні. На другому кроці моделюється осьове деформування з'єднання шляхом поступового переміщення торця стержня на відстань 5 мм. На цьому кроці реєструється момент руйнування, на якому осьові напруження в стержні досягають максимального значення. Отримано залежності максимальних еквівалентних напружень в стержні готового з'єднання та осьового напруження в стержні в момент руйнування від параметрів з'єднання. Залежності можуть бути використані для вибору оптимальних значень параметрів та є основою для виготовлення експериментальних зразків з'єднань. Для допустимого еквівалентного напруження в стержні готового з'єднання 150 МПа оптимальними параметрами є внутрішній радіус ніпеля 10,5 мм, крок клиноподібного адгезиву 33 мм, довжина циліндричної (пресової) частини 13 мм. Це забезпечує міцність з'єднання в межах 430 МПа. Розроблену параметричну скінченно-елементну модель можна використовувати для дослідження міцності та оптимізації з'єднань такого типу.

Ключові слова: *склопластик, штанга насосна, міцність, скінченно-елементний аналіз, оптимізація*

Вступ. Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) широко застосовують в таких галузях нафтогазова, морська, аерокосмічна, транспортна [1]. ПКМ – це армований волокнами пластик (FRP – Fiber Reinforced Plastic), який володіє високою міцністю і малою масою. Як правило застосовують скляні або вуглецеві волокна, а матрицею є епоксидна смола. Проте ПКМ є ортотропним, що є значною проблемою для створення міцного його з'єднання з металевими деталями [2].

Відомі різні методи з'єднання деталей з ПКМ і металевих деталей: механічні з'єднання за допомогою болтів або гвинтів [3]; різьбові вставки, вбудовані в ПКМ, фрикційні затискачі,

що не порушують структуру ПКМ [4]; склеювання за допомогою епоксидної смоли, пуліуретану або акрилу [5]; комбіновані з'єднання (адгезивні і механічні), які вважаються найбільш перспективними [1].

Міцність болтових з'єднань ПКМ досліджена в [3]. Такі з'єднання утворюють значну концентрацію напружень в ПКМ. Недоліки механічних методів описані в [1]. З'єднання металевих деталей з деталями, які виготовлені з ПКМ (склопластик, вуглепластик), повинні бути виготовлені з врахуванням ортотропії механічних характеристик останніх. Зокрема класична різьба, нарізана на склопластиковому стержні, буде володіти низькою міцністю внаслідок пошкодження волокон матеріалу. У зв'язку з цим поширення набули з'єднання, які не пошкоджують структуру ПКМ.

Існують ефективні методи з'єднань ПКМ/метал, що доведено експериментально та шляхом чисельного моделювання [6]. Термомеханічні методи з'єднання передбачають створення макромеханічного зв'язку і високої термопластичної деформації поверхонь [1]. Ґрунтовний аналіз таких методів з'єднання виконано в [1]. З'єднання ПКМ/метал нерідко може потребувати спеціальної обробки поверхні [6]. Зокрема в праці [7] аналізуються параметри плазмового електролітичного оксидування поверхні для оптимізації адгезії алюміній-ПКМ. В праці [8] запропоновано для створення міцних з'єднань ПКМ/метал використовувати іскрове плазмове спікання. Перспективними є методи зварювання тертям [9, 10]. В праці [11] досліджено механічні характеристики таких з'єднань. Ультразвукове зварювання алюмінію та ПКМ досліджено в [12].

Проте конструктивні особливості деяких з'єднань можуть не дозволяти застосувати описані методи. Для з'єднання сталевого ніпеля і стержня (тіла) склопластикових насосних штанг [13] застосовують адгезійні [5] та пресові з'єднання [14]. Відомі також інші типи з'єднань, які аналізуються в [14]. Адгезійне з'єднання [5] утворюється шляхом виготовлення вздовж отвору сталевого ніпеля клиноподібних виточок та їхнього наступного заповнення клеєм. Пресове з'єднання [14, 15] утворюється шляхом радіального обтискання сталевого ніпеля штампами з утворенням натягу між ніпелем і тілом.

Метою роботи є розроблення ефективної конструкції з'єднання склопластикового стержня зі сталевою оболонкою, дослідження шляхом скінченно-елементного моделювання характеристик його міцності та оптимізація конструкції.

Виклад основного матеріалу дослідження. Авторами запропоновано об'єднати переваги адгезійних і пресових з'єднань в адгезійно-пресовому з'єднанні (рис. 1), до якого не застосовують операцію обтискання штампами.

Технологія запропонованого адгезійно-пресового з'єднання така:

1. В циліндричному сталевому ніпелі виготовляється гвинтова канавка з клиноподібним профілем.

2. Діаметр отвору ніпеля дещо менший діаметра стержня з ПКМ.

3. Отвір заливається клеєм.

4. Стержень з зусиллям загвинчується в ніпель (можливо з попереднім нагрівом деталей). Залишки клею виходять через гвинтовий зазор.

5. Клей полімеризується.

Переваги з'єднання наступні:

1. Міцність забезпечується одночасно адгезійними клинами і посадкою з натягом.

2. Проста технологія. Немає потреби обтискати ніпель і утворювати в ньому концентратори напружень.

Задачі, які потрібно розв'язати за допомогою скінченно-елементного аналізу(FEA):

1. Створити параметричну осесиметричну FEA-модель з'єднання.

2. Оптимізувати (за критерієм максимального зусилля руйнування) довжину з'єднання та параметрів a, b, c, D, p. Ці параметри можуть бути змінними вздовж з'єднання.

Початковими даними цих задач є:

1. Механічні характеристики ортотропного тіла штанги (разом з границями міцності на розрив і кручення), та залежності їх від температури.

2. Механічні характеристики клею.

3. Коефіцієнти термічного розширення матеріалів (якщо виконується нагрів чи охолодження деталей).

З метою розв'язування першої задачі розроблено параметричну осесиметричну скінченно-елементну модель в Abaqus/CAE 6.14-5 (макрос мовою Python) [16]. Модель дозволяє в автоматичному режимі досліджувати вплив параметрів з'єднання на напруження під час його формування і під час його руйнування.

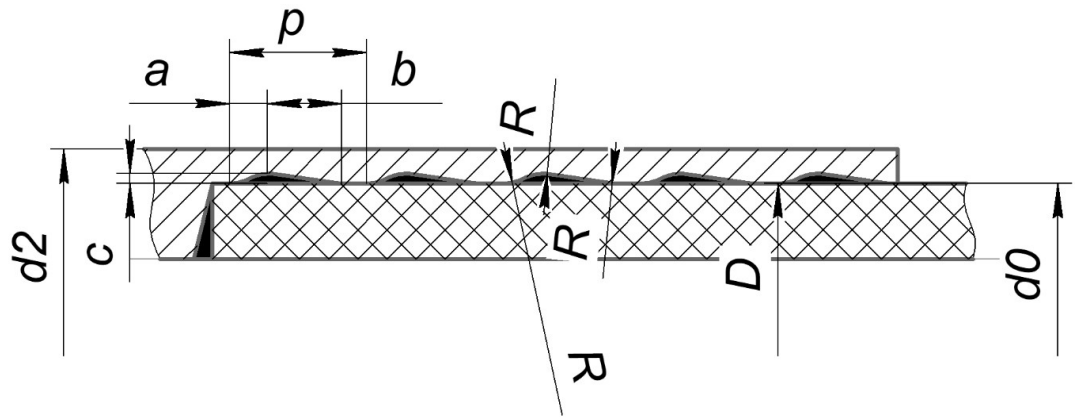


Рис. 1. Креслення з’єднання

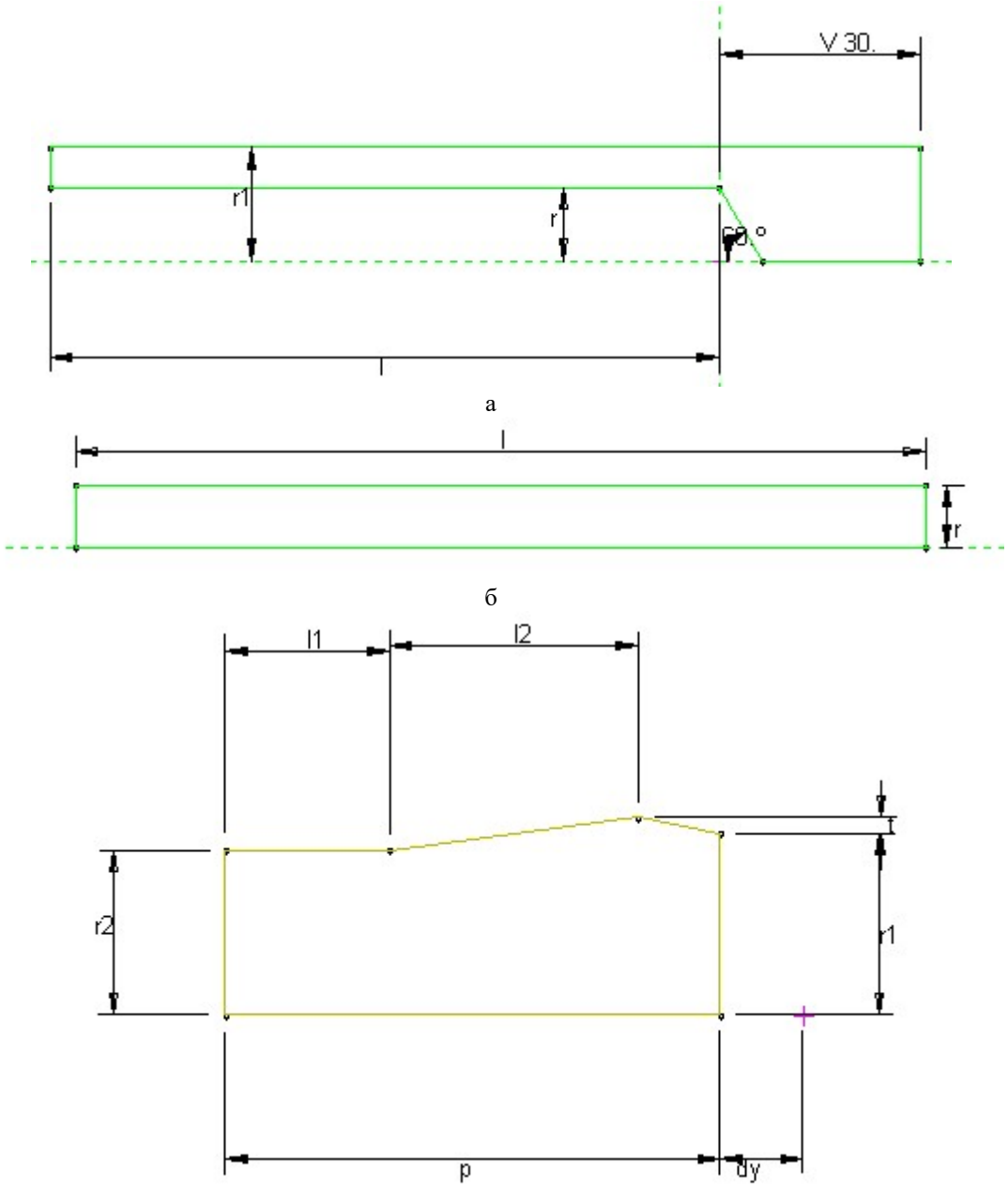


Рис. 2. Параметричні ескізи:
а – ніпеля, б – тіла, в – виточки в ніпелі під адгезійні клини



Рис. 3. Осесиметрична модель з’єднання

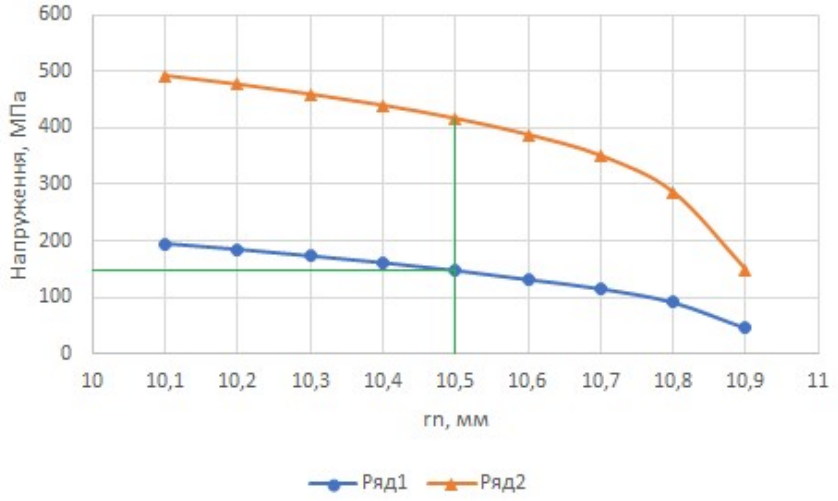


Рис. 4. Максимальні еквівалентні напруження σ_e в тілі готового з’єднання (Ряд1) та осьове напруження σ_o в тілі в момент руйнування (Ряд2) в залежності від радіуса отвору ніпеля *rn*

На першому кроці моделюється утворення посадки з натягом та полімеризація клею (шляхом зміни характеристик пластичності). На цьому кроці визначаються максимальні еквівалентні напруження в тілі. Щоб уникнути пошкодження тіла вони не повинні перевищувати допустиме значення. На другому кроці моделюється осьове деформування з’єднання шляхом поступового переміщення торця тіла штанги на відстань 5 мм. На цьому кроці визначається інкремент часу, на якому осьові напруження в тілі досягають максимального значення. Цей інкремент відповідає моменту руйнування з’єднання.

Нижче перелічено параметри початкового варіанта з’єднання. На рис. 2 показано ці ж параметри, але без останнього символу: *n* – ніпель, *b* – тіло, *a* – адгезив. Параметри з’єднання:

– внутрішній радіус ніпеля *rn*=10,5 мм;
– зовнішній радіус ніпеля *r1n*=17 мм;
– глибина отвору ніпеля *ln*=100 мм;
– радіус тіла *rb*=11 мм;
– довжина тіла *lb*=*ln*+50 мм;
– нижній радіус адгезиву *r1a*=*rn* ;
– верхній радіус адгезиву *r2a*=*r1a* ;
– глибина адгезиву *ta*=1 мм;
– крок адгезиву *pa*=30 мм;
– довжина циліндричної (пресової) частини *l1a*=10 мм;
– довжина робочої сторони адгезиву *l2a*=15 мм.

Властивості матеріалів. Модуль пружності сталевого ніпеля *E*=210000 МПа, коефіцієнт Пуассона μ=0.28, границя пружності σ_y=400 МПа, границя міцності σ_u=600 МПа.

Модулі пружності склопластикового тіла (ортотропний): E_1=0,1e5 МПа (радіальний напрямок), E_2=0,5e5 МПа (осьовий напрямок), E_3=0,1e5 МПа. Коефіцієнти Пуассона μ_{12}=0,22, μ_{13}=0,22, μ_{23}=0,22. Модулі зсуву G_{12}=0,04e5 МПа, G_{13}=0,04e5 МПа, G_{23}=0,2e5 МПа.

Адгезив (ізотропний): *E*=5000 МПа, μ =0.22, σ_y=20 МПа, σ_u=80 МПа.

Під час проектування з’єднання потрібно також враховувати різні значення коефіцієнта температурної деформації ПКМ і металу, а також вплив середовища на характеристики міцності з'єднання.

Розглядається контактна статична задача з нелінійними моделями матеріалів (рис. 3). Коефіцієнт тертя поверхонь деталей рівний 0,1.

З метою розв’язування другої задачі виконано дослідження впливу параметра *rn* на максимальні еквівалентні напруження σ_e за критерієм Мізеса-Губера в тілі готового з’єднання та осьове напруження σ_o в тілі в момент руйнування (рис. 4). Залежності можуть бути використані для вибору оптимального значення *rn*.

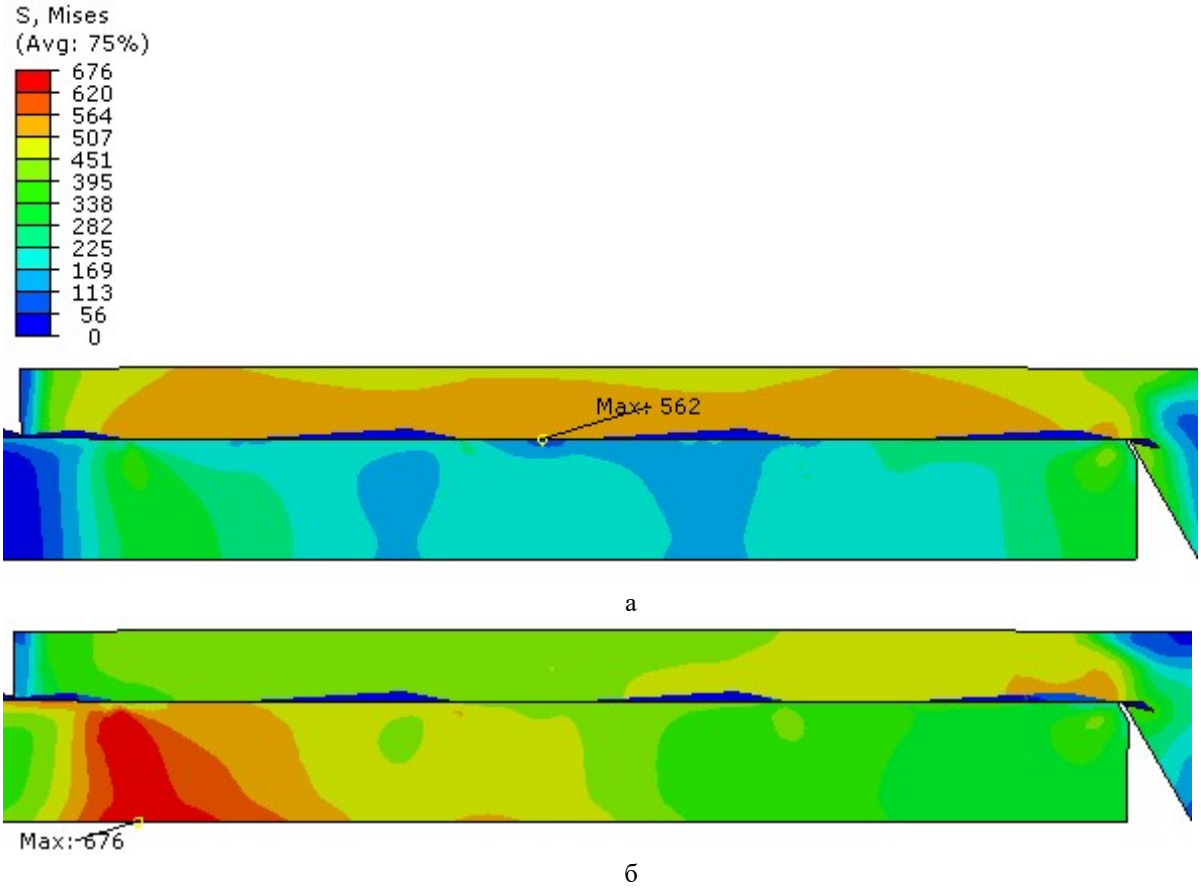


Рис. 5. Еквівалентні напруження (МПа) в готовому з'єднанні (а) та еквівалентні напруження в момент руйнування (б) для *rn*=10.5 мм

На рисунку 4 зеленою лінією показано приклад визначення оптимального радіуса отвору ніпеля *rn* в залежності від максимального допустимого еквівалентного напруження в тілі готового з'єднання [σ_e]. Для [σ_e]=150 МПа отримуємо *rn*=10,5 мм та σ_o=410 МПа.

На рисунку 5а показано еквівалентні напруження в готовому з'єднанні. Максимальне значення спостерігається на поверхні тіла в центральній частині з'єднання між клинами.

На рисунку 5б показано еквівалентні напруження в момент руйнування. Максимальне значення спостерігається на осі тіла в лівій частині з'єднання. Помітна значна нерівномірність напружень вздовж з'єднання. Однією з цілей оптимізації конструкції є зменшення такої концентрації напружень.

Досліджено вплив параметра *x2* на міцність з'єднання. Параметр *x2* впливає на крок канавок (*pa*=30+*x2*, *l1a*=10+*x2*). Зі збільшенням *x2* напруження σ_e зменшуються, а міцність з'єднання (σ_o) зростає (рис. 6). Це можна пояснити збільшенням площі контакту в зонах натягу. Оптимальним значенням є *x2*=3 мм.

Досліджено також вплив параметра *x3* на міцність з'єднання. Параметр *x3* впливає довжину робочої сторони адгезиву (*l2a=x3*). Якщо *x3*=10 мм, то обидві сторони адгезиву мають однакову довжину. Обидві залежності (рис. 7) мають яскраво виражений мінімум в точці *x3*=14 мм. Вплив *x3* на напруження не значний.

Досліджено вплив параметра *x4* на міцність з'єднання. Параметр *x4* впливає на довжину циліндричної (пресової) частини та довжину робочої сторони адгезиву (l1a=10-*x4*, l2a=15+*x4*). Зі збільшенням *x4* напруження σ_e збільшуються, а міцність з'єднання (σ_o) зменшується (рис. 8). Це можна пояснити зменшенням площі контакту в зонах натягу. Проте зменшення міцності з'єднання незначне. Оптимальним значенням є *x4*=0 мм.

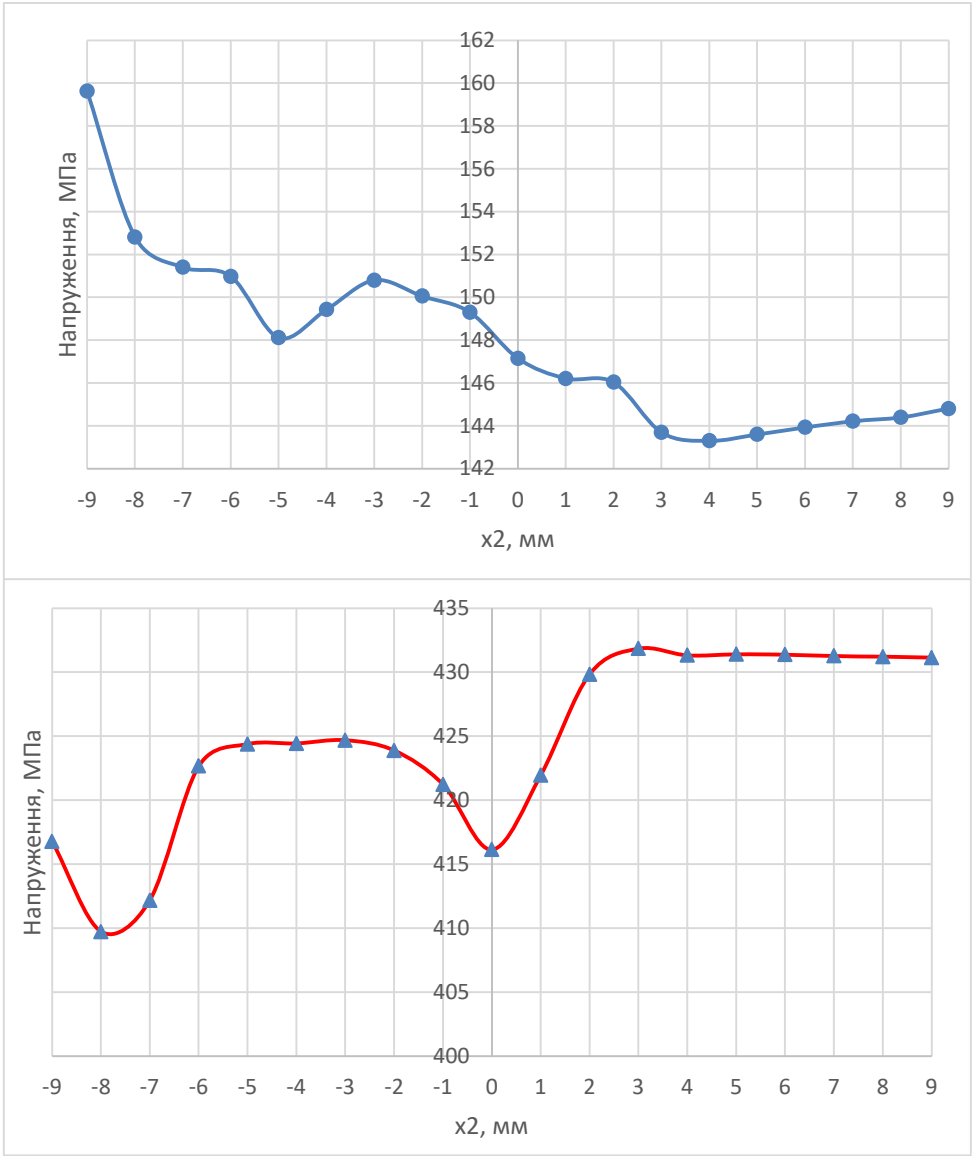


Рис. 6. Максимальні еквівалентні напруження σ_e в тілі готового з'єднання (а) та осьове напруження σ_o в тілі в момент руйнування (б) в залежності від величини x2 (*pa*=30+*x2*, *l1a*=10+*x2*)

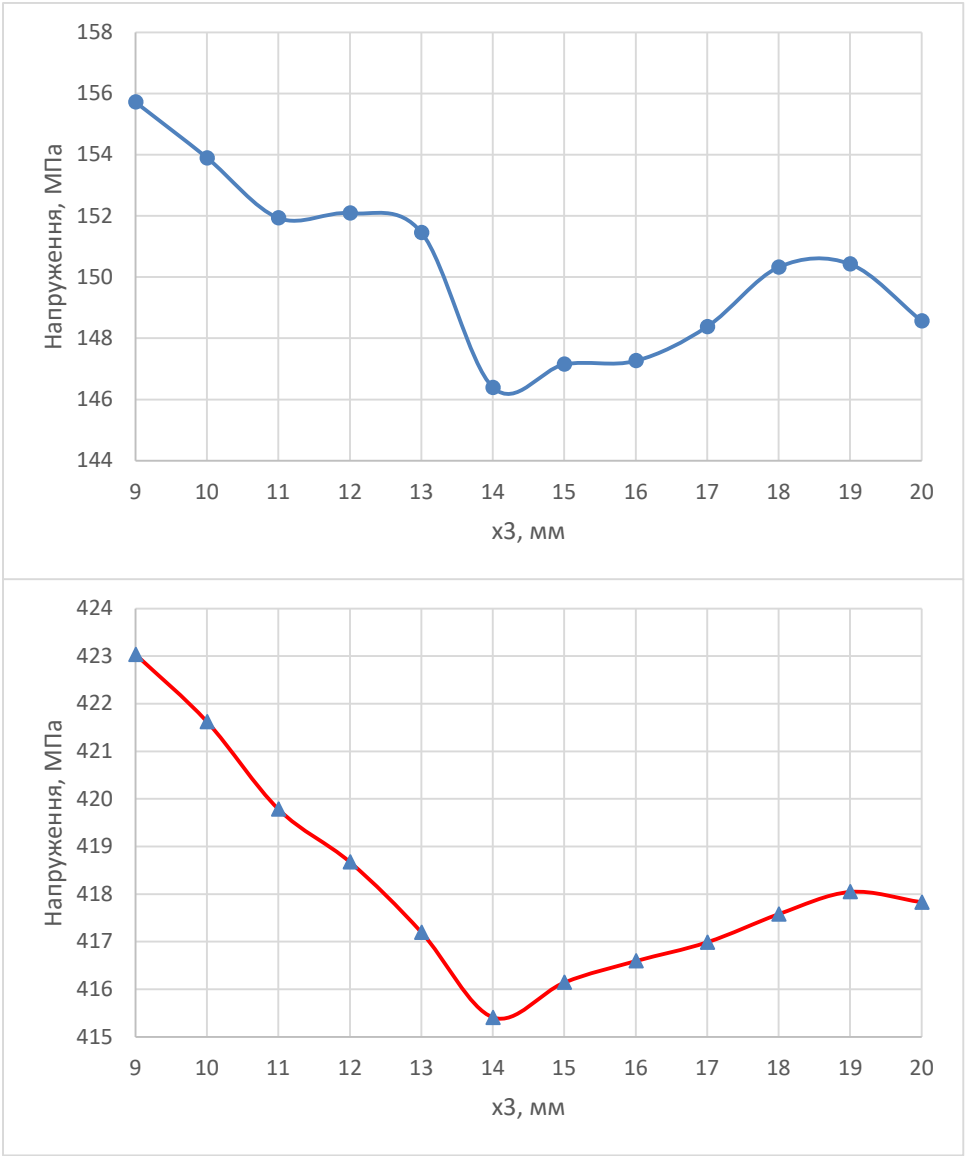


Рис. 7. Максимальні еквівалентні напруження σ_e в тілі готового з'єднання (а) та осьове напруження σ_o в тілі в момент руйнування (б) в залежності від величини *x3* (*l2a=x3*)

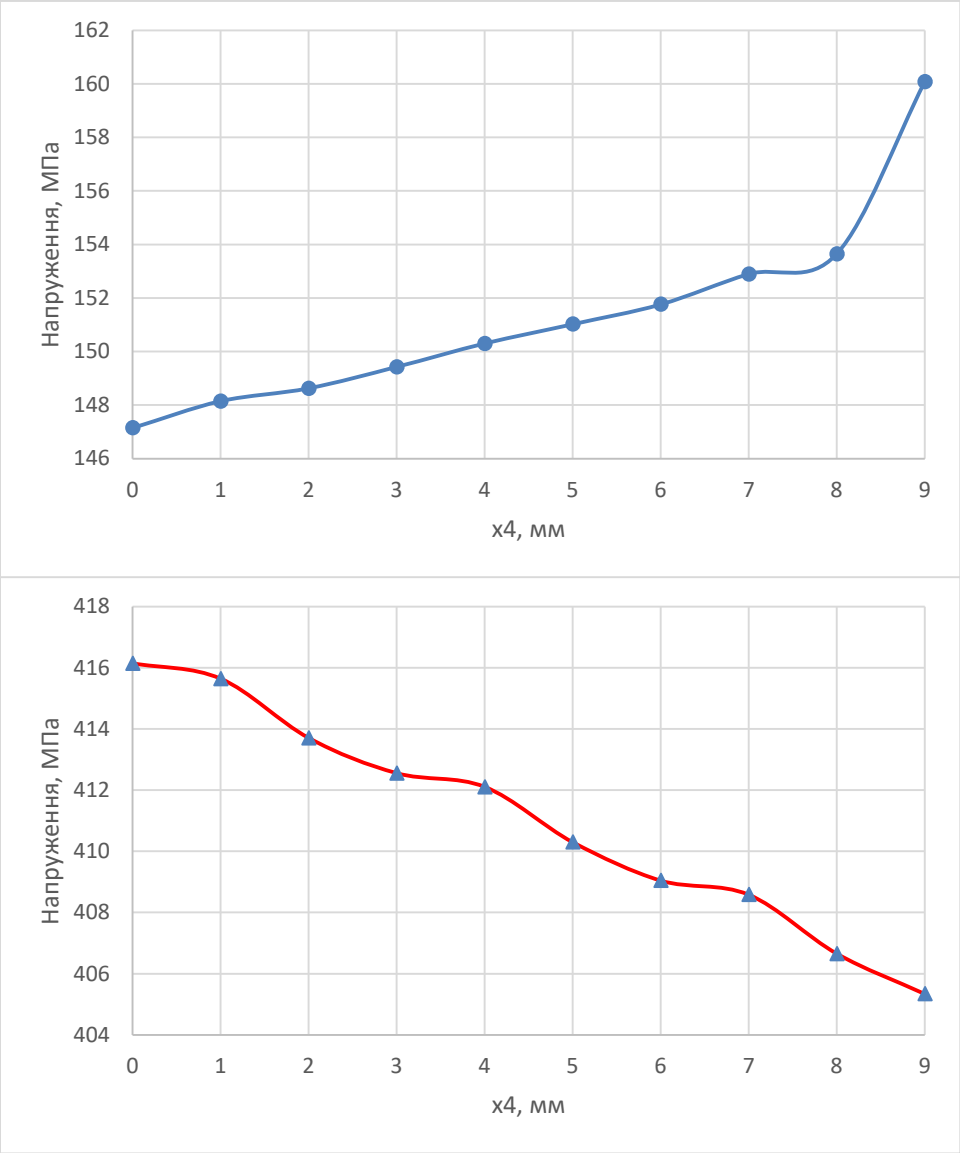


Рис. 8. Максимальні еквівалентні напруження σ_e в тілі готового з'єднання (а) та осьове напруження σ_o в тілі в момент руйнування (б) в залежності від величини *x4* (*l1a*=10-*x4*, *l2a*=15+*x4*)

Висновки. Конструкція розробленого з'єднання об'єднує переваги адгезійних, пресових і різьбових з'єднань. Отримані залежності можуть бути використані для вибору оптимальних значень параметрів та є основою для виготовлення експериментальних зразків з'єднань. Для допустимого еквівалентного напруження в стержні готового з'єднання $[\sigma_e]$ =150 МПа оптимальними параметрами є *rn*=10,5 мм, *pa*=33, *l1a*=13. Це забезпечує міцність з'єднання в межах σ_o=430 МПа. Розроблену параметричну скінченно-елементну модель [16] можна використовувати для дослідження міцності та оптимізації з'єднань такого типу.

Література

1. Lambiase F., Scipioni S.I., Lee C-J., Ko D-C., Liu F. A State-of-the-Art Review on Advanced Joining Processes for Metal-Composite and Metal-Polymer Hybrid Structures // Materials. 14(8). 2021. 1890. https://doi.org/10.3390/ma14081890
2. ASTM D5573-99(2019). Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints. Last Updated: Jun 14, 2019.
3. Zolkiewski S. Mechanical Properties of Fibre-Metal Composites Connected by Means of Bolt Joints // AMR. 837. 2013. P. 296–301. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.837.296
4. Копей В. Б. Автоматизоване проектування з'єднання тіла склопластикової насосної штанги зі сталевою головкою // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2011. №5. С. 142-147.

5. Pat. US20120141194A1, Int. Cl. E21B 17/04, B32B 38/04. Sucker Rod End Fittings and Method of Using Same / Russell P. Rutledge, SR.; Russell P. Rutledge, JR.; Ryan B. Rutledge. Filed: Feb. 10, 2012; Pub. Date: Jun. 7, 2012. 10 p.
6. Zhang J., Liu Y., Cheng L., Kang D., Gao R., Qin Y., Mei Z., Zhang M., Yu M., Sun Z. Design and Performance Study of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Connection Structures with Surface Treatment on Aluminum Alloy (6061) // Coatings. 14(7). 2024. 785. https://doi.org/10.3390/coatings14070785
7. Lucas R. R., Silva E. R. R., Marques L. F. B., Da Silva F. J. G., Abrahão A. B. R. M., Vieira M. D. O. L., Hein L. R. D. O., Botelho E. C., Mota R. P., Sales-Contini R. D. C. M. Analysis of Plasma Electrolytic Oxidation Process Parameters for Optimizing Adhesion in Aluminum–Composite Hybrid Structures // Applied Sciences. 14(17). 2024. 7972. https://doi.org/10.3390/app14177972
8. Hutsch T., Lang A., Schubert T., Schiebel P., Christ M., Weißgärber T., et al. Metal/FRP Connection Module – A Powder Metallurgical Approach // MSF. 825–826. 2015. P.449–56. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.825-826.449
9. Meng X., Huang Y., Xie Y., Li J., Guan M., Wan L., Dong Z., Cao J. Friction self-riveting welding between polymer matrix composites and metals // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 127. 2019. 105624. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105624
10. Blaga L., Bancilă R., dos Santos J.F., Amancio-Filho S.T. Friction Riveting of glass–fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints // Mater. Des. 50. 2013. P. 825–829. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.061
11. Abibe A.B., Amancio-Filho S.T., Dos Santos J.F., Hage E. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints // Mater. Des. 46. 2013. P.338–347. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.043
12. Lionetto F., Balle F., Maffezzoli A. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites // J. Mater. Process. Technol. 247. 2017. P.289–295. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002
13. Gibbs S. G. Application of Fiberglass Sucker Rods // SPE Production Engineering. SPE, Nabla Corp., May 1991. P. 147-153.
14. Копей В.Б. Науково-методологічні основи автоматизованого проектування обладнання штангової свердловинної насосної установки : в 2 ч. дис. … д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 2020.Ч. 1. 428 с.
15. Кузьмін О. О. Вдосконалення свердловинного обладнання для попередження відкладів піску, парафіну та смол : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.12. ІФНТУНГ. Івано-Франківськ, 2012. 18 с.
16. Kopei V. Fiberglass-Sucker-Rod-Connection. URL: https://github.com/vkopey/Fiberglass-Sucker-Rod-Connection/tree/master/2023

References

1. Lambiase F., Scipioni S.I., Lee C-J., Ko D-C., Liu F. A State-of-the-Art Review on Advanced Joining Processes for Metal-Composite and Metal-Polymer Hybrid Structures // Materials. 14(8). 2021. 1890. https://doi.org/10.3390/ma14081890
2. ASTM D5573-99(2019). Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints. Last Updated: Jun 14, 2019.
3. Zolkiewski S. Mechanical Properties of Fibre-Metal Composites Connected by Means of Bolt Joints // AMR. 837. 2013. P. 296–301. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.837.296
4. Kopei V. B. Automated design of the connection of the fiberglass sucker rod body with a steel head // Computer-integrated technologies: education, science, production. 2011. No. 5. P. 142-147.
5. Pat. US20120141194A1, Int. Cl. E21B 17/04, B32B 38/04. Sucker Rod End Fittings and Method of Using Same / Russell P. Rutledge, SR.; Russell P. Rutledge, JR.; Ryan B. Rutledge. Filed: Feb. 10, 2012; Pub. Date: Jun. 7, 2012. 10 p.
6. Zhang J., Liu Y., Cheng L., Kang D., Gao R., Qin Y., Mei Z., Zhang M., Yu M., Sun Z. Design and Performance Study of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Connection Structures with Surface Treatment on Aluminum Alloy (6061) // Coatings. 14(7). 2024. 785. https://doi.org/10.3390/coatings14070785
7. Lucas R. R., Silva E. R. R., Marques L. F. B., Da Silva F. J. G., Abrahão A. B. R. M., Vieira M. D. O. L., Hein L. R. D. O., Botelho E. C., Mota R. P., Sales-Contini R. D. C. M. Analysis of Plasma Electrolytic Oxidation Process Parameters for Optimizing Adhesion in Aluminum–Composite Hybrid Structures // Applied Sciences. 14(17). 2024. 7972. https://doi.org/10.3390/app14177972
8. Hutsch T., Lang A., Schubert T., Schiebel P., Christ M., Weißgärber T., et al. Metal/FRP Connection Module – A Powder Metallurgical Approach // MSF. 825–826. 2015. P.449–56. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.825-826.449
9. Meng X., Huang Y., Xie Y., Li J., Guan M., Wan L., Dong Z., Cao J. Friction self-riveting welding between polymer matrix composites and metals // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 127. 2019. 105624. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105624
10. Blaga L., Bancilă R., dos Santos J.F., Amancio-Filho S.T. Friction Riveting of glass–fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints // Mater. Des. 50. 2013. P. 825–829. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.061

11. Abibe A.B., Amancio-Filho S.T., Dos Santos J.F., Hage E. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints // Mater. Des. 46. 2013. P.338–347. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.043
12. Lionetto F., Balle F., Maffezzoli A. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites // J. Mater. Process. Technol. 247. 2017. P.289–295. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002
13. Gibbs S. G. Application of Fiberglass Sucker Rods // SPE Production Engineering. SPE, Nabla Corp., May 1991. P. 147-153.
14. Kopei V.B. Scientific and methodological bases of computer-aided design of equipment for a sucker rod pumping unit.: in 2 parts. dissertation ... Dr. Tech. Sciences: 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 2020. Part 1. 428 p.
15. Kuzmin O. O. Improvement of well equipment for the prevention of sand, paraffin and tar deposits: author's abstract of dissertation ... Candidate of Tech. Sciences: 05.05.12. IFNTUNG. Ivano-Frankivsk, 2012. 18 p.
16. Kopei V. Fiberglass-Sucker-Rod-Connection. URL: https://github.com/vkopey/Fiberglass-Sucker-Rod-Connection/tree/master/2023

Chudyk I.I., Kopei B.V., Kopei V.B., Proniuk I.V. Modeling of adhesive-press joint of fiberglass rod with steel shell

For the full use of polymer composite materials (PCM), it is necessary to create reliable PCM/metal joints. The creation of such joints is a complex scientific and technical problem, also associated with the orthotropic nature of PCM. A review of the most promising methods for creating such connections (mechanical, adhesive, welded and others) has been conducted. A new design of an adhesive-press joint of a fiberglass rod with a steel shell has been developed, which is used in sucker rods for oil production. The connection is formed by screwing an undamaged, unthreaded rod into a threaded steel nipple that has a wedge-shaped profile and is filled with liquid adhesive. This creates a press fit, and the polymerization of the adhesive provides additional strength due to a system of wedges that hold the rod during tension. The design combines the advantages of adhesive, press and threaded joints. To study the strength and optimization of the joint, a parametric finite element model with two simulation steps has been developed. In the first step, the formation of a tension fit and the polymerization of the adhesive are simulated and the maximum equivalent stresses in the rod are recorded. In the second step, the axial deformation of the joint is simulated by gradually moving the rod end by a distance of 5 mm. In this step, the failure moment at which the axial stresses in the rod reach their maximum value is recorded. The dependences of the maximum equivalent stresses in the rod of the finished joint and the axial stress in the rod at the moment of failure on the joint parameters have been obtained. The dependences can be used to select the optimal values of the parameters and are the basis for the manufacture of experimental samples of the joints. For an allowable equivalent stress in the rod of the finished connection of 150 MPa, the optimal parameters are the inner radius of the nipple of 10.5 mm, the wedge adhesive pitch of 33 mm, the length of the cylindrical (press) part of 13 mm. This ensures the strength of the connection within 430 MPa. The developed parametric finite element model can be used to study the strength and optimization of connections of this type.

***Keywords**: fiberglass, sucker rod, strength, finite element analysis, optimization*

Чудик Ігор Іванович – д.т.н., професор, ректор Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, rector@nung.edu.ua
Копей Богдан Володимирович – д.т.н., професор, професор кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, kopeyb@ukr.net
Копей Володимир Богданович – д.т.н., професор, професор кафедри комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, vkopey@gmail.com
Пронюк Ігор Володимирович – аспірант кафедри комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, pronyuk00@gmail.com

Стаття подана 12.11.2024.