УДК 621.88
DOI: 10.31471/1993-9965-2024-2(57)-50-57

МОДЕЛЮВАННЯ АДГЕЗІЙНО-ПРЕСОВОГО З'ЄДНАННЯ ПОРОЖНИСТИХ СКЛОПЛАСТИКОВИХ НАСОСНИХ ШТАНГ

[1]І. І. Чудик, [1]І. Б. Копей, [1]В. Б. Копей *, [2]Г. В. Кречковська, [1]І. В. Пронюк

[1]ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: v k o p e y @ g m a i l . c o m

[2]Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України; 79060, Львів, вул. Наукова 5;
e-mail: k r e c h k o v s k a h a l y n a @ g m a i l . c o m

Порожнисті насосні штанги з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) володіють високою втомною міцністю, але потребують удосконалення і забезпечення міцності з'єднання композитного тіла зі сталевим ніпелем. Проєктування таких з'єднань ускладнено тим, що тіло з ПКМ має ортотропні характеристики пружності та міцності та низьку міжшарову міцність. Морфологічний аналіз показав, що перспективним напрямком удосконалення таких з'єднань є об'єднання адгезійно-клинового, пресового і різьбового способів з'єднання в одній конструкції. Це дозволяє підвищити міцність, покращити технологічність, запобігти проникненню середовища в зону контакту. Кільцевий отвір сталевого ніпеля із гвинтовою нарізкою заповнюють клеєм і загвинчують в нього гладкий стержень з утворенням посадки з натягом. Полімеризований клей утворює систему клинів, що забезпечують додаткову міцність. Розроблено скінченно-елементну осесиметричну модель такого з'єднання з моделюванням контакту, пластичності матеріалу ніпеля та ортотропії матеріалу тіла. Виконується два кроки симуляції. На першому виконується симуляція натягу і полімеризації клинів. На другому кроці з'єднання поступово навантажується зусиллям розтягу, що імітується осьовим переміщенням торця тіла. Момент руйнування з'єднання визначається за максимальним значенням напруження в тілі ніпеля. Моделювання підтвердило ефективність запропонованої конструкції. Розглянутий варіант витримує напруження розтягу до 709 МПа, а еквівалентні напруження в тілі, після утворення натягу, близькі до 500 МПа. Параметрична модель і макрос для неї можуть бути використані для дослідження і оптимізації параметрів такого з'єднання для різних типів ПКМ (склопластик, вуглепластик тощо). Збільшення натягу і довжини зони контакту не вирішує проблеми концентрації напружень. Необхідна оптимізація інших геометричних параметрів. Перспективними можуть бути такі рішення, як створення додаткової гвинтової нарізки на протилежній контактній поверхні, додаткове обтискання штампами, спеціальна обробка поверхні, застосування змінного вздовж осі діаметра отвору, кроку та інших параметрів гвинтової нарізки.

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал, міцність, напруження, посадка з натягом.

Hollow sucker rods made of polymer composite materials (PCM) have high fatigue strength, but require improvement and ensuring the strength of the connection of the composite body with a steel nipple. The design of such connections is complicated by the fact that the PCM body has orthotropic characteristics of elasticity and strength and low interlayer strength. Morphological analysis has shown that a promising direction for improving such connections is the combination of adhesive-wedge, press and threaded connection methods in one design. This allows to increase strength, improve manufacturability, and prevent the penetration of the medium into the contact zone. The annular hole of the steel nipple with a screw thread is filled with glue and a smooth rod is screwed into it to form a tight fit. The polymerized glue forms a system of wedges that provide additional strength. A finite element axisymmetric model of such a connection has been developed with simulation of contact, ductility of the nipple material and orthotropy of the body material. Two simulation steps are performed. In the first, tension and polym-?rization of wedges are simulated. In the second step, the connection is gradually loaded with a tensile force, which is simulated by axial movement of the body end. The moment of failure of the connection is determined by the maximum value of the stress in the body. The simulation confirmed the effectiveness of the proposed design. The considered variant withstands tensile stresses up to 709 MPa, and the equivalent stresses in the body after tension formation are close to 500 MPa. The parametric model and macro for it can be used to study and optimize the parameters of such a connection for different types of PCM (fiberglass, carbon fiber, etc.). Increasing the tension and length of the contact zone does not solve the problem of stress concentration. Optimization of other geometric parameters is necessary. Promising solutions may include the creation of an additional screw thread on the opposite contact surface, additional crimping with dies, special surface treatment, the use of a variable hole diameter, pitch and other screw thread parameters along the axis.

Keywords: polymer composite material, strength, stress, interference fit.

Вступ

Застосування штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) для видобування нафти є в даний час найбільш розповсюдженим, ефективними, універсальним, надійним, безпечним і простим в обслуговуванні порівняно з іншими методами. В ШСНУ працюють тільки механічні елементи (колона штанг і плунжер насоса), що рухаються з невеликими швидкостями, а електричний привод знаходиться на поверхні землі та доступний для зручного обслуговування.

Деколи замість суцільних насосних штанг застосовують порожнисті штанги з метою свердловинної депарафінізації, деемульсації та обробки інгібіторами [1, 2]. У цих випадках по внутрішньому каналу штангової колони подається з поверхні до насоса відповідний хімічний реагент. Крім того, їх можуть використовувати для відбору продукції у ході одночасно-роздільної експлуатації пластів, а також у разі необхідності підіймання пластової рідини з підвищеною швидкістю, наприклад, для запобігання утворенню піщаних корків. Проте сталеві штанги нерідко виходять з ладу через корозійно-втомні руйнування. Виникає необхідність у використанні міцних та корозійностійких штанг з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), наприклад зі склопластика чи вуглепластика [3, 4].

Спуско-підіймальні операції ШСНУ передбачають згвинчування та розгвинчування штанг. Штанги з'єднуються в колону за допомогою сталевих муфтових різьбових з'єднань. З'єднання ПКМ/метал для цього не використовують через їхню невисоку міцність на зминання та зріз і низьку стійкість до зношування. Як правило, їх виготовляють нероз'ємними. Сталеві деталі штанг додатково захищають тіло з ПКМ від контакту з НКТ.

Аналіз джерел і формулювання проблеми. Необхідно забезпечити міцність з'єднань ПКМ/метал з урахуванням статичних і динамічних навантажень, які виникають в колоні [5]. Проєктування таких з'єднань ускладнено тим, що тіло з ПКМ має ортотропні характеристики пружності та міцності, гетерогенну структуру та низьку міжшарову міцність [5]. Термопластичні полімерні матриці можна розплавити і виконати з'єднання без пошкодження волокон [6]. Але термореактивні матриці не можна нагрівати. Особливості конструкції насосних штанг не дозволяють виготовляти з'єднання на етапі формування ПКМ, як це робиться в інших виробах [7].

На цей час найбільше практичне використання знайшли клейове з'єднання з полімерними клинами [8] і з'єднання шляхом обтискання сталевого бандажу [4, 5]. У першому з них використовується принцип заклинювання тіла штанги під час розтягу за допомогою системи кільцевих клинів у ніпелі, утворених шляхом полімеризації епоксидної смоли. Проте ця конструкція не використовує натяг для додаткового збільшення міцності. Такі клини забезпечують міцність тільки для розтягу. Навантаження стиску, які можливі в деяких випадках (спуск колони, заклинювання плунжера), можуть пошкодити з'єднання. Натяг використовується в другому варіанті з'єднання, яке було успішно випробуване в НГВУ «Долинанафтогаз» [4, 5]. Натяг утворюється шляхом послідовного обтискання сталевого бандажу плоскими штампами з різних сторін. З'єднання є доволі технологічним, але величина переміщення штампів і натяг залежать від механічних характеристик матеріалів тіла і бандажу та повинні мати оптимальне значення, щоб запобігти руйнуванню тіла під час обтискання [5]. Недоліком такого з'єднання є овальність та огранка бандажу, можливість проникнення середовища в контактну зону, що загрожує зменшенням коефіцієнта тертя та погіршенням інших властивостей контакту. Також існує значна концентрація напружень в зонах переходу від деформованої до недеформованої частини з'єднання [4, 5].

Деякі варіанти конструкції з'єднання запропоновані в [5] та показані на рисунку 1. Верхній ряд: пресове гладке, пресове різьбове, пресове зі ступінчастою поверхнею стержня, адгезійно-клинове, адгезійно-пресове. Нижній ряд: пресове з хвилястою поверхнею отвору, адгезійно-пресове з хвилястою поверхнею отвору, пресове порожнистих штанг, пресове з хвилястою поверхнею штампів, адгезійно-пресове зі ступінчастою поверхнею стержня та хвилястою поверхнею отвору. Останній варіант поєднує у собі кілька попередніх і може бути більш ефективним.

Поєднання таких способів з'єднання дозволить вирішити описані проблеми, збільшити міцність та покращити надійність з'єднання [10]. На даний час ця задача не розв'язана.

Метою роботи є розроблення нової конструкцій з'єднання порожнистих штанг, яка поєднує переваги найбільш успішних відомих з'єднань. Для досягнення мети необхідно проаналізувати різні варіанти конструкції та їхні комбінації, вибрати найбільш перспективні та

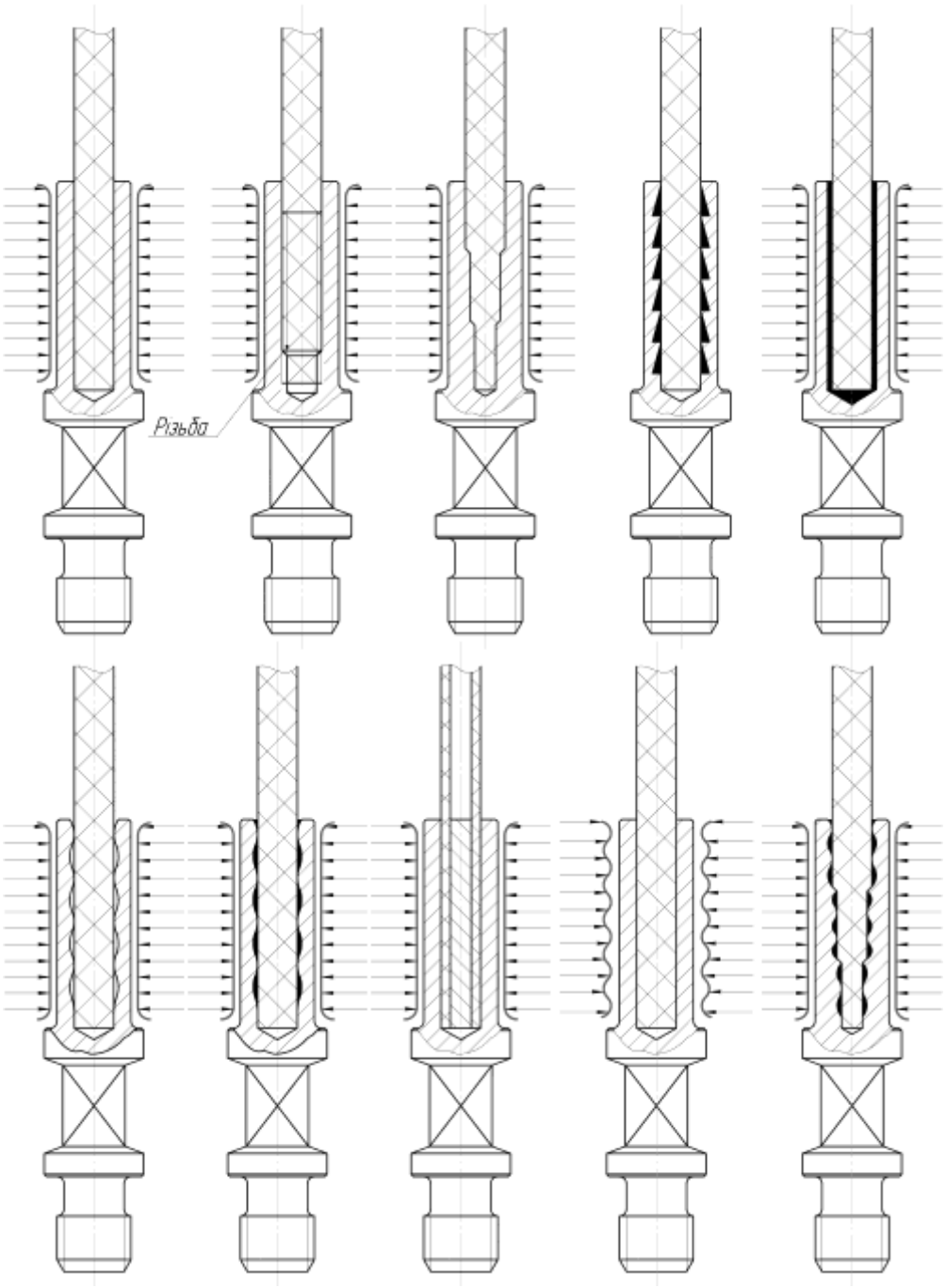


Рисунок 1 – Варіанти з'єднань штанг з ПКМ [5]

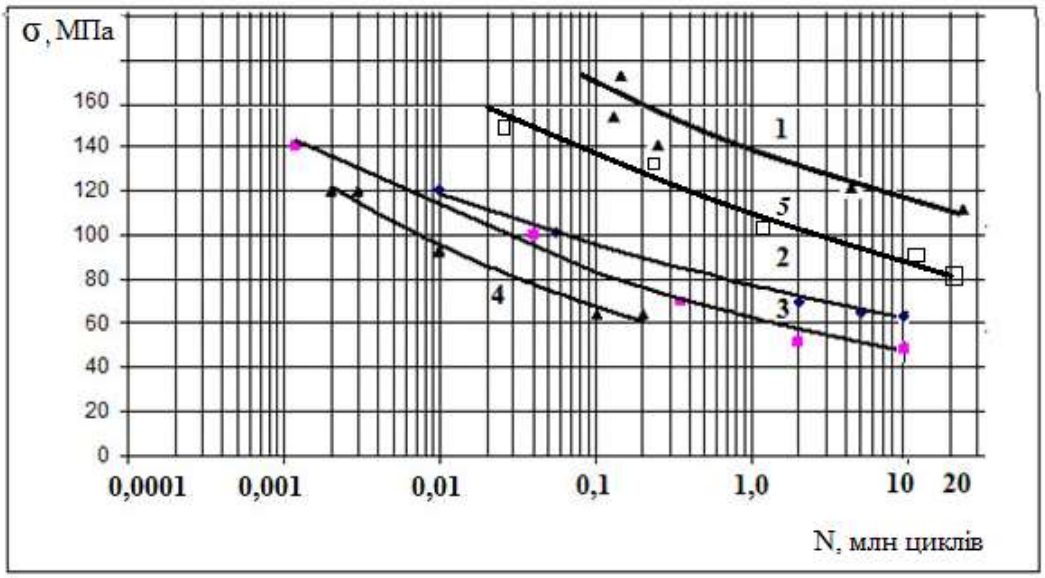
провести скінченно-елементий аналіз їхнього напружено-деформованого стану.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Випробування за умов циклічного консольного згину показують, що гібридні (склопластикові з вуглепластиковою сердцевиною) та порожнисті вуглепластикові штанги мають кращі втомні характеристики у порівнянні з склопластиковими суцільними і порожнистими штангами (рис. 2). Порожнисті склопластикові штанги за певних умов можуть мати кращі втомні характеристики у порівнянні з суцільними. Для бази випробувань $2 \cdot 10^7$ циклів вуглепластикові штанги мали межу втоми 80 МПа, а гібридні насосні штанги з серцевиною, армованою вуглецевим волокном, і оболонкою, армованою скловолокном, – 110 МПа. Проте необхідно розробити якісну конструкцію з'єднання ПКМ/метал і оптимізувати її параметри за критерієм максимального осьового навантаження, що витримує з'єднання.

Для виявлення перспективних варіантів конструкції виконано морфологічний аналіз (таблиця 1). Розглянуто з'єднання: адгезійні

ISSN 1993–9965 print
ISSN 2415–3524 online
Науковий вісник ІФНТУНГ
2024. № 2(57)



1 – гібридні штанги в мінералізованій пластовій воді; 2 – порожниста в нафті з 10% HCl; 3 – посилена конструкція суцільних штанг в пластовій воді з нафтою; 4 – звичайна конструкція суцільних штанг в мінералізованій пластовій воді; 5 – порожниста з вуглецевим волокном УКН/5000, модифікована шляхом атмосферної плазмової обробки акриловою кислотою, оригінальної конструкції насосної штанги в мінералізованій пластовій воді

Рисунок 2 – Криві втоми склопластикових (2-4), вуглецевих (5) і гібридних насосних штанг (1) при циклічному згині

(А), механічні (клепані (К), пресові (П), штифтові (Ш), різьбові (Р)), термомеханічні (Т), отримані в процесі формування композиту (Ф), по гладкій поверхні (Г), по поверхні з виступами і заглибленнями (В).

Таблиця 1 – Матриця морфологічного аналізу з'єднань штанг з ПКМ

	К	П	Ш	Р	Т	Ф	Г	В
А	1	2	3	4	5	6	7	8
К		9	10	11	12	13	14	15
П			16	17	18	19	20	21
Ш				22	23	24	25	26
Р					27	28	29	30
Т						31	32	33
Ф							34	35
Г								36

Адгезійні з'єднання (А) штанг з ПКМ можуть бути достатньо міцними (рис. 1) та їх легко можна поєднувати з іншими методами. Важливим є чітке дотримання технології склеювання. Адгезійні з'єднання насосних штанг, як правило, містять систему адгезійних клинів (рис. 1), що покращують міцність [8].

Пресове з'єднання (П) можна отримати не тільки шляхом обтискання бандажу штампами (рис. 1), але й шляхом запресовування чи загвинчування стержня в нього, або затискання його цангами. Можна комбінувати ці варіанти. Зокрема перспективним є загвинчування гладкого стержня в гвинтовий отвір ніпеля з наступним обтисканням штампами. Це дозволить зменшити крутний момент під час загвинчування і пошкодження бандажу штампами.

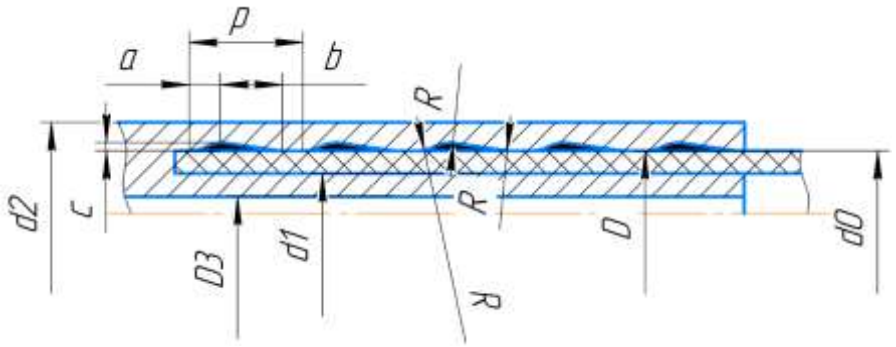
Наявність штифтів (Ш) може забезпечити додаткову міцність. Але їх не можна установлювати на початку з'єднання (ніпеля), де концентрація напружень в стержні максимальна.

Різьбові з'єднання (Р) допустимі, але потрібно уникати дрібного кроку різьби. Щоб не пошкодити волокна ПКМ слід робити гвинтову нарізку тільки в отворі, а тіло залишати гладким.

Контактні поверхні з виступами і заглибленнями (В) доцільно робити тільки в отворі. Але на стержні вони теж допустимі, якщо виконані на кінці з'єднання. Рекомендується також оптимізація шорсткості або спеціальна обробка поверхні [9].

З'єднання, отримані в процесі формування ПКМ (Ф), теоретично можуть бути найміцнішими [7]. Але вони більше доцільні для труб з ПКМ, які виготовляють намотуванням і які витримують внутрішній тиск, але не навантаження розтягу [4]. Волокна насосних штанг з ПКМ повинні бути направлені вздовж осі штанги.

Комбінування різних видів може бути ефективним внаслідок об'єднання їхніх переваг (рис. 1). В таблиці 1 підкреслено найбільш пер-



D – внутрішній діаметр гвинтової нарізки; d0 – зовнішній діаметр тіла; d1 – внутрішній діаметр тіла; d2 – зовнішній діаметр ніпеля; D3 – діаметр отвору ніпеля; p – крок клинів; a – довжина короткої сторони клину; b – довжина довшої сторони клину; c – глибина клину; R – радіус скруглення

Рисунок 3 – Ескіз з'єднання порожнистої насосної штанги з ПКМ

спективні комбінації: адгезійно-пресове з'єднання (1), адгезійно-різьбове (4), адгезійне (8) або пресове (21) по поверхні з виступами або заглибленнями, пресово-штифтове (16), пресово-різьбове (17), штифтово-різьбове (22), різьбове по гладкій поверхні стержня (29). Глибший аналіз усіх цих комбінацій потребує окремого дослідження. Зокрема комбінації з К, Ф, Т [10] будуть розглянуті в майбутніх дослідженнях.

Застосування цих методів, а особливо пресових, для порожнистих штанг може бути проблемним внаслідок низької радіальної жорсткості. Але жорсткість можна збільшити шляхом розміщення в отворі сталевого ніпеля жорсткого трубчатого елемента (рис. 3). Це дозволить також підвищити міцність шляхом використання в з'єднанні внутрішньої поверхні тіла. Поєднання комбінацій (1+4+8+17+29) дозволило розробити конструкцію з'єднання, ескіз якого показано на рисунку 3.

Ніпель має кільцевий отвір з діаметрами *d0* і *d1*. В отворі виготовляється гвинтова нарізка з кроком *p* і розмірами *a, b, c*. Для створення ефекту заклинювання під час експлуатації штанги необхідна умова *b*>*a*. Для підвищення міцності з'єднання таку нарізку можна робити і на зовнішній поверхні внутрішнього циліндра діаметром *d1*. Кільцевий отвір заповнюється рідким адгезивом і в нього загвинчують трубчасте тіло штанги. Нарізку на тілі штанги не виконують. Після полімеризації клею утворюється з'єднання, міцність якого забезпечена натягом *d0-D* та системою адгезійних клинів. Для збільшення міцності зовнішня поверхня ніпеля може бути додатково обтиснута штампами. Перед цією операцією в отвір *D3* вставляють стержень для тимчасового збільшення жорсткості конструкції. Цей стержень повинен мати невелику конусність для безпроблемного його вилучення після обтискання.

Скінченно-елементну модель цього з'єднання «rod_fiber1.cae» [11] розроблено за допомогою Abaqus/CAE 6.14. Значення геометричних параметрів: довжина зони контакту – 100 мм, *D*=21 мм, *d0*=22 мм, *d1*=14 мм, *d2*=34 мм, *D3*=6 мм, *p*=30 мм, *a*=5 мм, *b*=15 мм, *c*=1 мм, *R*=0 мм. Для автоматизації побудови та зміни параметрів використано макрос [11]. Розглядається квазістатична осесиметрична контактна задача. Тип контакту: Small sliding, Surface to surface. Коефіцієнт тертя рівний 0,1. Адгезійний контакт не моделюється, що дає дещо занижені значення міцності з'єднання. Моделюється пластичність матеріалу ніпеля та ортотропія матеріалу стержня (таблиця 2). Симуляція виконується з двома кроками. Час симуляції *t* змінюється від 0 до 2 с. На першому (0<*t*<1) виконується симуляція натягу і полімеризації клинів. Натяг моделюється опцією «Interference Fit...». Полімеризація клинів моделюється шляхом введення характеристик матеріалу, які залежать від температури. Температура змінюється на початку другого кроку. На другому кроці (1<*t*<2) з'єднання поступово навантажується зусиллям розтягу, що імітується осьовим переміщенням торця тіла на величину Δ (Δ=5 мм, коли *t*=2 с). Момент руйнування з'єднання визначається з графіка (рис. 4) за максимальним значенням напруження в тілі. На рисунку це точка *t*=1,45 с, *S*=709 МПа.

Після утворення посадки з натягом найбільші еквівалентні напруження (500 МПа) в тілі спостерігаються на початку і в кінці з'єднання (рис. 5). Ці напруження залежать від величини натягу і не повинні перевищувати допустимих радіальних напружень, які є різними у різних марок ПКМ.

ISSN 1993–9965 print
ISSN 2415–3524 online
Науковий вісник ІФНТУНГ
2024. № 2(57)

Таблиця 2 – Механічні характеристики матеріалів

Деталь, матеріал	**Властивість, одиниці**	**Значення**
Ніпель, сталь	Модуль пружності E, МПа	$2{,}1\cdot10^5$
	Коефіцієнт Пуассона μ	0,28
	Границя пружності σ_y, МПа	400
	Границя міцності σ_u, МПа	600
Тіло штанги, склопластик	Модуль пружності в напрямку: радіальному – E_1, осьовому – E_2, тангенціальному – E_3, МПа	$0{,}1\cdot10^5$; $0{,}5\cdot10^5$; $0{,}1\cdot10^5$
	Коефіцієнти Пуассона μ_{12}, μ_{13}, μ_{23}	0,22; 0,22; 0,22
	Модулі зсуву G_{12}, G_{13}, G_{23}, МПа	$0{,}04\cdot10^5$; $0{,}04\cdot10^5$; $0{,}2\cdot10^5$
Клини, епоксидна смола	Модуль пружності E, МПа	$0{,}5\cdot10^5$
	Коефіцієнт Пуассона μ	0,22
	Границя пружності σ_y, МПа	20
	Границя міцності σ_u, МПа	80

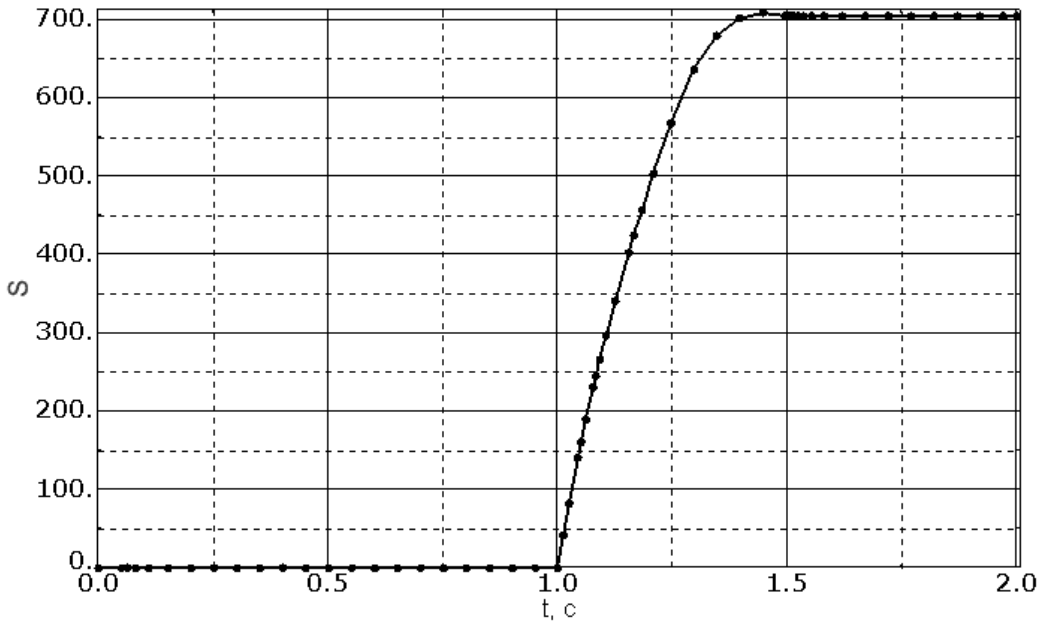


Рисунок 4 – Залежність осьового напруження S (МПа) в тілі штанги від часу симуляції t

Зі збільшенням осьового навантаження розтягу напруження на початку з'єднання зростають і досягають величини 1000 МПа в момент руйнування з'єднання. Руйнування відбувається внаслідок проковзування (рис. 5). В цей момент коефіцієнт концентрації напружень в цій зоні дорівнює 1,41. В цій зоні статичне і втомне руйнування тіла є найбільш імовірним. Додатково спостерігається значне звуження стержня в цій зоні. Це характерно для з'єднань такого типу [5]. Воно призводить до зменшення контактного тиску і можливості проникнення середовища в зону контакту. Цю проблему можна вирішити шляхом змінних параметрів з'єднання вздовж осі. Наприклад діаметр отвору можна збільшувати за лінійною або нелінійною залежністю.

Додатково слід запобігати концентрації напружень в ніпелі, яка є найбільшою в кінці з'єднання (рис. 5) і може призвести до втоми. Цю проблему може вирішити застосування таких конструкційних і технологічних рішень, як збільшення товщини цієї зони, обробка її роликами, збільшення радіусів скруглення.

На міцність з'єднання суттєво впливає величина натягу і довжина зони контакту, тож вони повинні бути достатніми. Напруження від натягу не повинні перевищувати допустимі для даного типу ПКМ. Величина натягу не повинна створювати значні напруження кручення під час загвинчування тіла. Можлива зміна характеристик ПКМ під впливом середовища може призводити до зменшення натягу. Збільшення натягу і довжини зони контакту не вирішує проблеми концентрації напружень. Необхідна

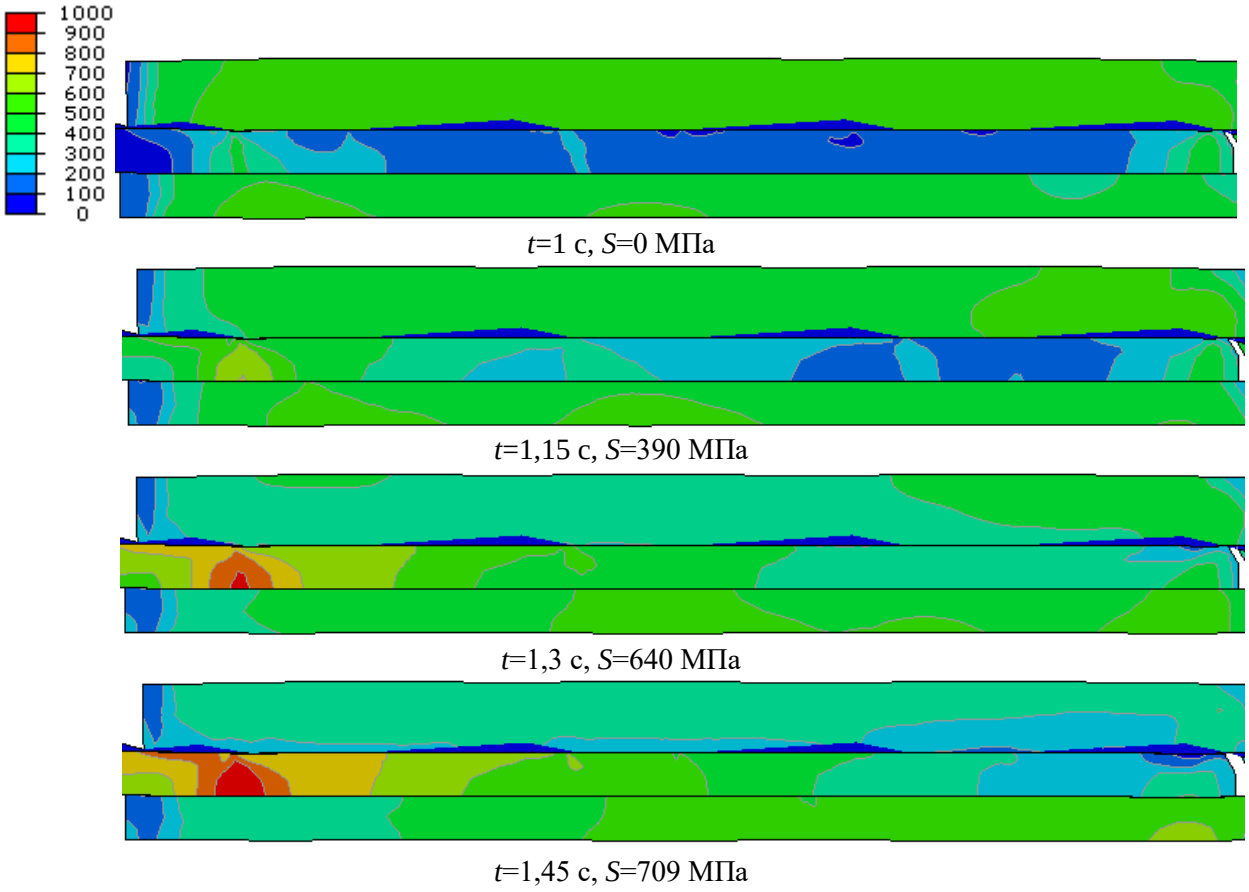


Рисунок 5 – Еквівалентні напруження за критерієм Мізеса-Губера (МПа) в з'єднанні

оптимізація інших геометричних параметрів, зокрема параметрів клинів та шорсткості. Перспективними можуть бути такі рішення, як створення додаткової гвинтової нарізки на протилежній контактній поверхні, додаткове обтискання штампами, спеціальна обробка поверхні, застосування змінного вздовж осі діаметра отвору, кроку та інших параметрів гвинтової нарізки.

Висновки

Морфологічний аналіз показав, що перспективним напрямком удосконалення з'єднання тіла штанги з ПКМ зі сталевим ніпелем є об'єднання адгезійно-клинового способу з'єднання, пресового і різьбового в одній конструкції. Це дозволяє підвищити міцність, покращити технологічність, запобігти проникненню середовища в зону контакту.

Скінченно-елементний аналіз підтвердив ефективність цієї конструкції. Розглянутий варіант витримує напруження розтягу до 709 МПа, а еквівалентні напруження в тілі після утворення натягу близькі до 500 МПа.

Розроблена параметрична скінченно-елементна модель і макрос для неї можуть бути використані для дослідження і оптимізації параметрів такого з'єднання для різних типів ПКМ (склопластик, вуглепластик тощо).

Наступним етапом дослідження є створення більш реалістичної тривимірної моделі з імітацією процесу загвинчування, моделюванням руйнування матеріалів, моделюванням адгезійного контакту і його руйнування.

Література

1. Копей Б.В., Кузьмін О.О., Онищук С.Ю. Обладнання для попередження відкладень асфальтосмолистих речовин, парафіну та піску: монографія. Серія «Нафтогазове обладнання», том 3. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. 216 с.

2. 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.

3. Gibbs S. G. Application of Fiberglass Sucker Rods. *SPE Production Engineering*. SPE, Nabla Corp., May 1991. P. 147-153.

4. Насосні штанги і труби з полімерних композитів: проектування, розрахунок, випробування / Копей Б.В., Максимук О.В., Щербина

ISSN 1993–9965 print
ISSN 2415–3524 online
Науковий вісник ІФНТУНГ
2024. № 2(57)

Н.М., Розгонюк В.В., Копей В.Б. Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2003. 352 с.

5. Копей В.Б., Копей Б.В. Проектування та міцність колон і з'єднань насосних штанг з полімерних композитів: Монографія. Серія «Нафтогазове обладнання»: у 12 т. За заг. ред. Б. В. Копея. Том 12. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 314с.

6. Seidlitz H., Ulke-Winter L., Ost L., Kuke F. Material and load path appropriate joining techniques for FRP/metal hybrid structures. *Welding - Materials, Fabrication Processes, and Industry 5.0*. Intech Open. 2023. https://doi.org/10.5772/intechopen.1002239

7. Hentinen M., Hildebrand M., Visuri M. Adhesively bonded joints between FRP sandwich and metal: Different concepts and their strength behaviour. *VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes*, no. 1862, Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland. 1997. 44 p. URL: https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1997/T1862.pdf

8. 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.

9. 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*. 2024. Vol. 14, Iss. 7. P. 785. https://doi.org/10.3390/coatings14070785

10. 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*. 2021. Vol. 14, Iss. 8. P. 1890. https://doi.org/10.3390/ma14081890

11. Kopei V. Fiberglass-Sucker-Rod-Connection. URL: https://github.com/vkopey/Fiberglass-Sucker-Rod-Connection/tree/master/2023

References

1. Kopei B.V., Kuzmin O.O., Onyshchuk S.Yu. Equipment for the prevention of deposits of asphalt resinous substances, paraffin and sand: monograph. Series "Oil and gas equipment", Volume 3. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2014. 216 p. [in Ukrainian]

2. Kuzmin O. O. Improvement of well equipment for the prevention of deposits of sand, paraffin and resins: author's abstract of dissertation ... candidate of technical sciences: 05.05.12. IFNTUNG. Ivano-Frankivsk, 2012. 18 p. [in Ukrainian]

3. Gibbs S. G. Application of Fiberglass Sucker Rods. *SPE Production Engineering*. SPE, Nabla Corp., May 1991. P. 147-153.

4. Sucker rods and pipes made of polymer composites: design, calculation, testing / Kopei B.V., Maksymuk O.V., Shcherbyna N.M., Rozgonyuk V.V., Kopei V.B. Lviv : IPPMM, 2003. 352 p. [in Ukrainian]

5. Kopei V.B., Kopei B.V. Design and strength of columns and joints of sucker rods made of polymer composites: Monograph. Series "Oil and gas equipment": in 12 vol. Under the general editorship of B.V. Kopei. Volume 12. Ivano-Frankivsk : IFNTUNG, 2021. 314 p. [in Ukrainian]

6. Seidlitz H., Ulke-Winter L., Ost L., Kuke F. Material and load path appropriate joining techniques for FRP/metal hybrid structures. *Welding - Materials, Fabrication Processes, and Industry 5.0*. Intech Open. 2023. https://doi.org/10.5772/intechopen.1002239

7. Hentinen M., Hildebrand M., Visuri M. Adhesively bonded joints between FRP sandwich and metal: Different concepts and their strength behaviour. *VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes*, no. 1862, Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland. 1997. 44 p. URL: https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1997/T1862.pdf

8. 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.

9. 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*. 2024. Vol. 14, Iss. 7. P. 785. https://doi.org/10.3390/coatings14070785

10. 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*. 2021. Vol. 14, Iss. 8. P. 1890. https://doi.org/10.3390/ma14081890

11. Kopei V. Fiberglass-Sucker-Rod-Connection. URL: https://github.com/vkopey/Fiberglass-Sucker-Rod-Connection/tree/master/2023