

УДК 622.276.054

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОСТУ ТРІЩИН ВТОМИ В ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГАХ

Б. В. КОПЕЙ¹, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА^{2,3}, В. П. НІСОНСЬКИЙ¹, Б. М. БАКУН¹

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Національний університет "Львівська політехніка"

Розглянуто особливості втомного руйнування гібридних насосних штанг для видобування нафти з вуглеволоконним осердям та склопластиковою оболонкою. Встановлено, що руйнування штанг за навантаження згином супроводжується інтенсивним утворенням повздовжніх тріщин у вигляді розшарувань у склопластиковій оболонці та зародження в ній до 5–6 тріщин. Визначено умови тріщиноутворення за однакового рівня циклічного навантаження в штангах запропонованої конструкції. Методом скінченних елементів проаналізовано напруження в з'єднанні елементів гібридної штанги за її навантаження згином та розтягом. На основі встановлених закономірностей росту втомних тріщин у гібридних насосних штангах запропоновано метод прогнозування їх залишкового ресурсу.

Ключові слова: *гібридна насосна штанга, вуглепластикові частини штанги, склопластикові оболонки штанги, скінченно-елементний аналіз, циклічний згин і розтяг, ріст втомних тріщин, прогнозування ресурсу.*

The features of fatigue fracture of hybrid sucker rods with a carbon fiber rod and a fibreglass shell for oil production are considered. It has been established that the fracture of the rods under bending loading is accompanied by the intensive formation of longitudinal cracks in the form of delamination in the metal part of the rods and the initiation of up to 5–6 cracks in the fibreglass shell. The conditions for cracking at the same cyclic load in rods of different designs are determined. The finite element method is used to analyze the stress in the connection of the elements of the hybrid rod when it is loaded by bending and tension. Based on the established patterns of fatigue crack growth in hybrid sucker rods, a method for predicting their residual life is proposed.

Keywords: *hybrid sucker rod, carbon fiber part of rod, fiberglass shell, finite element analysis, cyclic bending and tensile loading, fatigue crack growth, life time prediction.*

Вступ. У нафтодобувній галузі колони насосних штанг складають зі сталевих або склопластикових секцій. Сталеві штанги важкі і схильні до втомного руйнування [1], корозії та корозійного розтріскування під напруженням [2–4]. Скловолоконні штанги легші, але їх пружна деформація за розтягу набагато більша, ніж у сталевих, і тому їх не рекомендують використовувати в перехідних зонах штангової колони через змінні напруження стиску [2]. Застосування вуглецевого волокна в гібридних насосних штангах дає змогу уникнути подібних проблем. Вуглецеве волокно характеризується високими міцністю на розрив (до 6,2 GPa), модулем пружності за розтягу (до 800 GPa) та низькою густиною (1380 kg/m³), яка в 6 разів нижча, ніж у сталі [5, 6].

Вуглецеве осердя гібридних насосних штанг виготовляють зі суцільних волокон, які збирають у пучок [7, 8]. Оскільки ці волокна не зв'язані одне з одним, то в них не утворюються тріщини за циклічних навантажень [9]. Гібридні насосні штанги утричі легші за сталеві та характеризуються вищою корозійною тривкістю.

Контактна особа: Г. В. КРЕЧКОВСЬКА, e-mail: krechkovskahalyna@gmail.com

Проте їх модуль пружності у 4 рази менший, ніж сталевих, що спричиняє їх значне видовження за розтягу. Крім того, вони конструкційно нестійкі до напружень стиску. Наслідком впливу усіх цих чинників є пошкодження насосних штанг, що є однією з найпоширеніших причин простоїв насосних установок [10].

Недоліком гібридних насосних штанг є також ненадійне з'єднання полімерно-композиційного стрижня зі сталевими головками. Максимальне осьове навантаження розтягу, яке витримує таке з'єднання, є основним параметром, який враховують під час його проектування [11, 12]. Водночас важливими також є втомні характеристики з'єднання за згину, складність конструктивного рішення і технології, можливі зміни механічних характеристик матеріалів за впливу високої температури і агресивного середовища [5, 13].

Мета роботи – удосконалити конструктивне рішення з'єднання елементів гібридної штанги, застосувавши метод скінченних елементів для визначення напружень у них, дослідити закономірності поширення втомних тріщин і на цій основі розробити методику оцінювання їх залишкового ресурсу.

Конструктивне рішення для з'єднання елементів гібридної штанги. На головку штанги діють поздовжні навантаження розтягу та згинальні зусилля. Конструктивно вона складається з циліндричної склопластикової оболонки 4, що облицьовує вуглепластикове осердя 2, і кінця з різьбою 1 для з'єднання з муфтою (рис. 1).

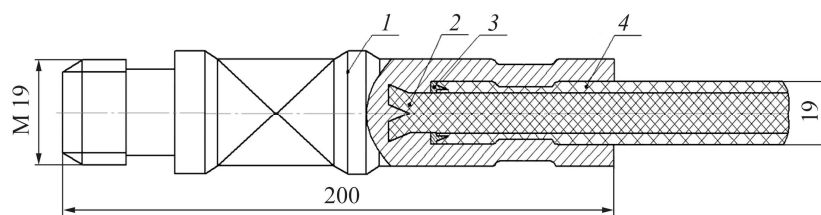


Рис. 1. Конструктивне рішення з'єднання сталеві головки і полімерно-композитної частини гібридної штанги: 1 – сталеві головка; 2 – вуглепластиковий стрижень; 3 – розтискальне кільце; 4 – склопластикові оболонка.

Fig. 1. Connection of the hybrid rod head with the polymer composite body of the rod: 1 – steel head; 2 – carbon fiber rod; 3 – expansion ring; 4 – fiberglass shell.

З'єднання сталеві головки і вуглепластикового стрижня конструктивно необхідне в гібридних насосних штангах. Це пов'язано з умовами і технологією видобування нафти, а саме, з багаторазовим повторенням операцій загвинчування–розгвинчування різьбових з'єднань штанг між собою за допомогою сталевих муфт під час формування колони. Сталеві деталі штанг виконують роль елементів, які підвищують жорсткість колони. Для з'єднання гібридного тіла насосної штанги зі сталеві головкою отвір у ній є зі сходиною, на якій розташовують підкладне кільце 3. Клиноподібний виступ на кільці заввишки 5 mm. Цей клин врізається в склопластикову оболонку штанги 4 і притискає її до внутрішньої поверхні отвору у сталеві головці. Ще один клин із кутом конусності 100...120° виточували всередині сталеві головці. Це забезпечило щільне притискання запресованого в головку вуглепластикового стрижня, змоченого епоксидним клеєм, до отвору в головці. Після цього її обтискали триступеневим штампом для запобігання роз'єднання головки з вуглепластиковим стрижнем під дією повздовжніх навантажень розтягу.

Методика випробувань гібридних штанг на втому. Для дослідження втомної міцності використали зразок у вигляді гібридної штанги з осердям із вуглепластику та зі склопластиковою оболонкою з діаметром 19 mm і завдовжки 220 mm. Зразок навантажували консольним згином на стенді ЗКШ-25 за напружень 140 МПа та частоти 950 min⁻¹. Довжину тріщини контролювали на твірній поверхні тіла

штанги [14]. Установку періодично зупиняли для визначення довжин втомних тріщин у з'єднаннях гібридного тіла зі сталевією головкою. Довжину тріщин заміряли з точністю до 0,1 mm.

За обертового згину зразок закріплювали в цанговому затискачі вала, який обертався на опорах кочення, вмонтованих у стояках стенда. За допомогою пальцевої муфти вал з'єднували з електродвигуном. Зразок навантажували згином вантажами, які розміщували на тарілці підвіски навантажувальної головки. Кількість циклів навантаження реєстрували лічильником. Установку змонтували на рамі з амортизаційними подушками. В момент руйнування зразка електродвигун вимикали, натискаючи важіль.

Аналіз напружено-деформованого стану гібридних штанг. Результати розрахунків еквівалентних напружень за Губером–Місесом у з'єднанні гібридної штанги наведені на рис. 2.

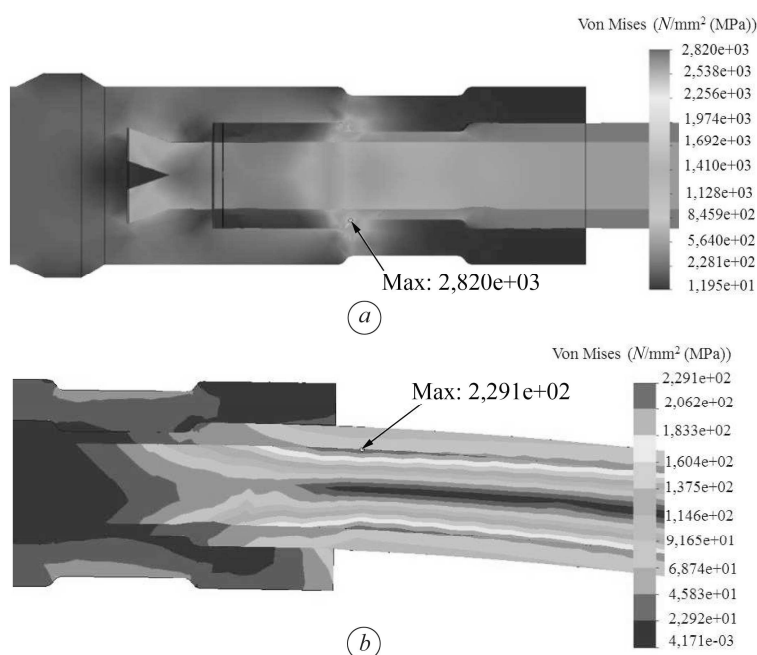


Рис. 2. Еквівалентні напруження за Губером–Місесом, які виникають у з'єднанні сталевією головки і вуглепластикового стрижня гібридної штанги: *a* – за розтягу; *b* – за згину.

Fig. 2. Equivalent stresses according to Huber–Mises in the connection of the hybrid rod: *a* – in tension; *b* – under bending.

Згідно з отриманими результатами, можна зробити висновки, що за навантаження згином міцність з'єднання достатньо висока, проте за навантаження розтягом у зоні з'єднання склопластику із металевією головкою локалізуються напруження. Модернізація цього з'єднання збільшенням кількості проточок на склопластику повинна була б усунути цю зону локалізації напружень. Підпружинення розпірного металевією кільця і встановлення додаткового клина на торці вуглепластику також дало б позитивний ефект. В описаній конструкції вуглепластиковий стрижень не розклинається за дії навантажень розтягу і відповідно не сприймає навантаження, натомість майже повністю його приймала проточка на склопластику.

Результати втомних досліджень. Дослідили втомну поведінку за навантаження згином гібридних втомних композитних стрижнів, які склалися з однонапрямлених вуглецевих волокон осердя і скляних волокон в оболонці, закріплених у сталевією головці. Пошкодження оцінювали за втратою жорсткості стрижнів

залежно від кількості циклів навантаження консольним згином, а втомну міцність за згину визначали за появою тріщин і руйнування. Кількість циклів до відмови визначали за прикладеного напруження 140 МПа. Пошкодження в штанзі зароджувалися і поширювалися в результаті розтріскування матриці і руйнування зв'язки скляних волокон в оболонці (рис. 3). Вдома за навантаження згином починалася тільки тоді, коли гібридна штанга прогиналася на 42% від міцності на вигин. Пошкодження досягло точки насичення уздовж лінії контакту скловолокно/вуглеволокно через концентрацію напружень, яка виникала між двома системами композита, що призвело до асимптотичної поведінки з втратою жорсткості. Оскільки пошкодження не поширювалося на ядро вуглеволокна, то статичні механічні властивості зберігалися до ~85% границі міцності або і більше.

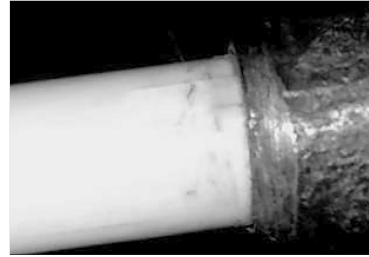


Рис. 3. Зародження тріщин у досліджуваному зразку після $1,312 \cdot 10^6$ cycles навантаження.

Fig. 3. Nucleation of cracks on the test specimen after $1,312 \cdot 10^6$ loading cycles.

За результатами спостережень за ростом усіх шістьох утомних тріщин побудували діаграми їх росту (рис. 4a) та схему їх розташування по периметру штанги перед її руйнуванням (рис. 4b). За результатами досліджень встановили, що зразок пропрацював $1,312 \cdot 10^6$ cycles до зародження тріщин (рис. 3), а після цього – за досягнення $1,504 \cdot 10^6$ cycles – зруйнувався.

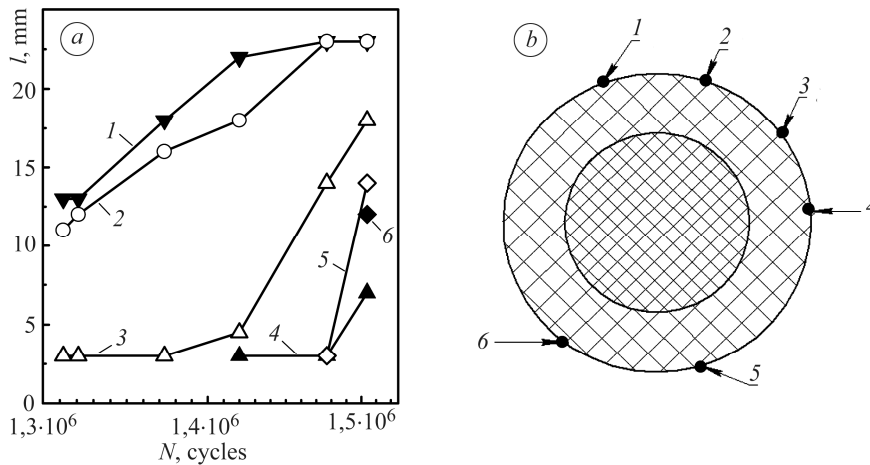


Рис. 4. Діаграми поширення тріщин у гібридній штанзі за їх довжин $l = 23; 23; 18; 7; 14$ та 12 mm перед її руйнуванням відповідно в точках 1–6 (a) та схема розташування втомних тріщин на поверхні штанги по її периметру (b).

Fig. 4. Diagrams of crack propagation in a hybrid rod with their lengths l at points 1–6 at the moment preceding the failure of the rod, equal to 23; 23; 18; 7; 14 and 12 mm, respectively (a) and a scheme of the location of these fatigue cracks on the surface of the rod along its perimeter (b).

В іншому зразку, випробуваному на обертовий згин, теж спостерігали шість втомних тріщин приблизно такої ж довжини (див. таблицю) [14].

Результати випроб гібридної штанги обертовим згином

σ , МПа	N , $\times 10^6$ cycles	Кількість тріщин	l , mm	Стан зразка
140	1,437	6	21; 20; 17; 15; 12; 10	Зруйнований

Оскільки насосні штанги під час роботи в свердловині часто виходять з ладу внаслідок зародження та росту втомної тріщини, важливо оцінювати їх залишковий ресурс. Кількість циклів навантаження штанги N_c до досягнення нею критичного стану визначили з диференційного рівняння

$$\frac{dl}{dN} = a \frac{N}{N_c} + b,$$

де dl/dN – швидкість росту тріщини, а N/N_c – частка вичерпаного ресурсу.

Звідси приріст тріщини dl визначили так:

$$dl = \left(a \frac{N}{N_c} + b \right) dN.$$

Різницю між поточною l_k та початковою довжиною тріщини в момент її виявлення l_i обчислювали інтегруванням диференційного рівняння:

$$l_k - l_i = \int_{N_i}^{N_c} \frac{aN dN}{N_k} + \int_{N_i}^{N_c} b dN = \frac{a}{N_k} N dN \uparrow \int_{N_i}^{N_c} + b dN \uparrow \int_{N_i}^{N_c} = \frac{1}{2} \frac{a}{N_k} (N_c^2 - N_i^2) + b(N_c - N_i),$$

де N_c – критична кількість циклів (перед руйнуванням); N_k – кінцева (руйнування зразка).

Після перетворень, підстановки меж інтегрування та врахування, що $l_i = 0$, отримали рівняння:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{a}{N_k} (N_c^2 - N_i^2) + b(N_c - N_i) - l_k = 0.$$

Тоді

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{a}{N_k} N_c^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{N_k} N_i^2 + bN_c - bN_i - l_k = 0.$$

Позначивши $A = a/2N_k$, $C = a \cdot N_i^2/2N_k - b \cdot N_i - l_k$, спростили рівняння до $AN_c^2 + bN_c - C = 0$, отримавши при цьому квадратне рівняння з дискримінантом: $D = b^2 - 4AC$. Тоді критичну кількість циклів N_c в остаточному варіанті запишемо так:

$$N_c = -\frac{bN_k}{a} \pm \frac{N_k}{a} \sqrt{b^2 - 2 \frac{a}{N_k} \cdot \left(\frac{1}{2} \frac{a}{N_k} N_i^2 - bN_i - l_c \right)}.$$

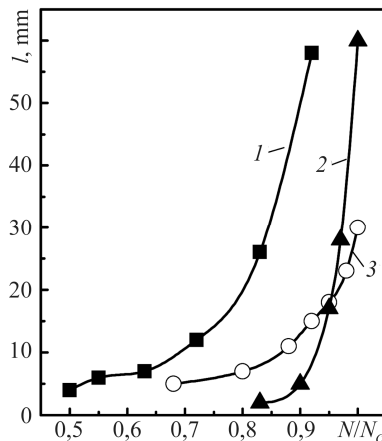
За допомогою запропонованого методу розрахунку з рис. 5 можна визначити критичну кількість циклів до повного руйнування штанги. З параметрів кривої підростання тріщини необхідно визначити не тільки довжину початкової тріщини l_i , але і значення сталих a та b , а тоді розрахувати N_c .

Діаграму росту тріщини l_2 (рис. 4), яка поширювалася від початку досліджень, порівняно з діаграмами росту тріщин, які утворилися у сталевих штангах зі сталі 20Н2М без та з поліуретановим покриттям (рис. 5). З отриманих залежностей очевидно, що в насосній штанзі зі сталі 20Н2М без покриття тріщина зародилася приблизно після втрати 50% її ресурсу (рис. 5, крива 1). Її ріст спостерігали, починаючи від довжини 5 mm і аж до кінця штанги (58 mm).

У насосній штанзі зі сталі 20Н2М з поліуретановим покриттям тріщина зародилася наприкінці наробітку (після понад $0,8 N_c$) і дуже стрімко розвивалася до довжини 60 mm. У гібридній насосній штанзі тріщина з'явилася подібно (після $0,67 N_c$), але поширювалася повільніше, і її критична довжина перед руйнуванням становила 20...25 mm.

Рис. 5. Залежність показника виробленого ресурсу N/N_c від довжини втомних тріщин l у насосних штангах $\varnothing 19$ mm зі сталі 20H2M без покриття (1, $\sigma = 120$ MPa), з поліуретановим покриттям (2, $\sigma = 180$ MPa) та в гібридній насосній штанзі (3, $\sigma = 140$ MPa).

Fig. 5. Dependence of the exhausted life N/N_c on the fatigue crack length l in sucker rods with $\varnothing 19$ mm made of 20H2M steel without coating (1, $\sigma = 120$ MPa), with a polyurethane coating (2, $\sigma = 180$ MPa) or in a hybrid sucker rod (3, $\sigma = 140$ MPa).



Менше значення критичної довжини тріщини у гібридній штанзі вказує на нижчу статичну тріщиностійкість (в'язкість руйнування) полімерного матеріалу порівняно з металевим. Гібридний варіант матеріалів штанги передбачає поєднання підходів лінійної [15–18] і нелінійної механіки руйнування [19], що потребує подальших експериментальних обґрунтувань їх застосування для оцінювання роботоздатності модернізованих штанг.

ВИСНОВКИ

Удосконалено з'єднання гібридної насосної штанги обтисканням головки тіла штанги, в якій розташовані спеціальні клини. Гібридну частину насосної штанги та сталеву головку, а саме отвір в ній, виконали ступінчастими, а у головці насосної штанги розташували підкладне кільце. Згідно з результатами скінченно-елементного аналізу, міцність з'єднання за навантаження згином є достатньою, проте за навантаження розтягом виявили зону локалізації напружень у місці з'єднання склопластику із металеву головкою. Вивчено закономірності росту тріщин у гібридних насосних штангах за випроб на втому. Побудовано діаграму росту тріщин та схему їх розташування за периметром гібридної штанги. В гібридній насосній штанзі тріщина починає розвиватися наприкінці наробітку ($0,67 N_c$), але росте вона повільніше, ніж у сталевій з поліуретановим покриттям і її критичний розмір перед руйнуванням становив 20...25 mm. Запропоновано метод прогнозування ресурсу гібридної насосної штанги за приростом тріщин на етапі їх докритичного росту.

1. Kret N. V., Svirskaya L. M., and Venhrynyuk T. P. Corrosion-fatigue crack propagation in exploited pump rods made of 20N2M steel // *Materials Science*. 2020. – **56**, № 2. – P. 279–283.
(Крет Н. В., Свірська Л. М., Венгринюк Т. П. Корозійно-втомний ріст тріщини в експлуатованих насосних штангах зі сталі 20H2M // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 2. – С. 130–134.)
2. Копей Б. В., Копей В. Б., Копей І. Б. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 406 с.
3. Elevation of the fatigue strength of pump rods as a result of treatment with a special medium / B. V. Kopei, O. I. Zvirko, T. P. Venhrynyuk, Z. V. Slobodyan, and I. P. Shtoyko // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 1. – P. 125–131.
(Підвищення втомної міцності насосних штанг обробкою спеціальним середовищем / Б. В. Копей, О. І. Звірко, Т. П. Венгринюк, З. В. Слободян, І. П. Штойко // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. – 2020. – **56**, № 1. – С. 118–123.)
4. Kryzhanivskiy E. I., Hoisan I. M., and Student O. Z. Specific features of the growth of fatigue cracks in 36G2S steel of drill pipes after the recovery heat treatment // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 1. – С. 92–97.
(Крижанівський Є. І., Гойсан І. М., Студент О. З. Особливості росту втомних тріщин у сталі 36Г2С буринних труб після відновлювального термічного оброблення // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 1. – С. 86–91.)

5. *Konei B. V., Юй Шуанжуй, Стефанишин А. Б.* Аналіз ефективності склопластикових, вуглепластикових та гібридних насосних штанг // Нафтогазова енергетика. – 2017. – **28**, № 2. – С. 31–41.
6. *Sharma A.* Study of wear pattern behavior of aluminum and mild steel discs using pin on disc tribometer // *Europ. J. of Appl. Eng. and Scientific Research.* – 2013. – P. 37–43.
7. *Testing and analysis of low cost composite materials under spectrum loading and high cycle fatigue condition / J. F. Mandell, D. D. Samborsky, N. K. Wahl, and H. J. Sutherland // Conf. Paper ICCM14. Paper 1811, SME/ASC.* – 2003. – P. 10.
8. *Sutherland H. J. and Mandell J. F.* The effect of mean stress on damage predictions for spectral loading of fiberglass composite coupons // *Specialty Conf. on Making Torque from the Wind.* – EWEC, 2004. – P. 93–108.
9. *Mouritz A. P.* Design dilemma for z-pinned composite structures // *27th Int. Congress of the Aeronautical Sciences.* – ICAS, 2010. – P. 19–24.
10. *Chenggao Li, Guijun Xian, and Hui Li.* Water absorption and distribution in a pultruded unidirectional carbon / Glass Hybrid Rod under Hydraulic Pressure and Elevated Temperatures Polymers. – 2018. – **10**. – P. 627.
11. *Santhosh K., Muniraju M., and Shivakumar N. D.* Hygrothermal durability and failure modes of FRP for marine applications // *J. Compos. Mater.* – 2012. – **46**. – P. 1889–1896.
12. *Nakada M. and Miyano Y.* Accelerated testing for long-term fatigue strength of various FRP laminates for marine use // *Compos. Sci. Techn.* – 2009. – **69**. – P. 805–813.
13. *Humeau C., Davies P., and Jacquemin F.* Moisture diffusion under hydrostatic pressure in composites // *Material Design.* – 2016. – **96**, № 15. – P. 90–98.
14. *Kopei B. V., Stefanyshyn A. B., and Venhrynyuk T. P.* Fatigue strength of hybrid pump rods // *Materials Science.* – 2019. – **54**, № 5. – P. 739–742.
(*Копей Б. В., Стефанишин А. Б., Венгрюнюк Т. П.* Втомна міцність гібридних насосних штанг // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2018. – **54**, № 5. – С. 117–120.)
15. *Fractographic criterion of attainment of the critical technical state by carbon steels / O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, H. M. Nykyforchyn, and I. M. Kurnat // Materials Science.* 2019. – **55**, № 2. – С. 160–167.
(*Фрактографічний критерій досягнення вуглецевими сталями критичного технічного стану / О. З. Студент, Г. В. Кречковська, Г. М. Никифорчин, І. М. Курнат // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2019. – **55**, № 2. – С. 24–30.)
16. *Special features of determination of the cyclic cracking resistance of fluoroplastics / B. N. Lavrishin, A. Z. Student, M. P. Demyd, and B. P. Kolos // Materials Science.* – 1989. – **24**, № 4. – P. 393–396.
(*Особенности определения циклической трещиностойкости фторопластов / Б. Н. Лавришин, А. З. Студент, Б. П. Колос, М. П. Демид // Физ.-хим. механика материалов.* – 1988. – **24**, № 4. – С. 71–75.)
17. *Degradation theory of long term operated materials and structures / G. Lesiuk, J. A. F. O. Correia, H. V. Krechkovska, G. Pekalski, A. M. P. de Jesus, and O. Student // In Structural Integrity Series.* – Heidelberg: Springer Nature, 2021. – **15**. – 170 p.
18. *A two-parameter failure criterion for fatigue-crack growth / O. M. Romaniv, G. M. Nikiforchin, O. Z. Student, and I. D. Skripnik // Materials Science.* – 1990. – **26**, № 1. – P. 43–49.
(*Двопараметричний критерій руйнування для росту втомних тріщин / О. М. Романів, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, І. Д. Скрипник // Физ.-хим. механика материалов.* – 1990. – **26**, № 1. – С. 46–54.)
19. *Romaniv O. N. and Nikiforchin G. N.* An investigation of the j-integral method for rating the crack resistance of constructional materials (a review) // *Soviet Materials Science.* – 1978. – **14**, № 3. – P. 296–308.
(*Романів О. Н., Никифорчин Г. Н.* Использование метода J-интеграла для оценки трещиностойкости конструкционных материалов // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1978. – **14**, № 3. – С. 80–95.)

Одержано 05.04.2021