

УДК 622.276.054

## УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ ТА ФРАКТОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ СКЛАДНИКІВ КОМПОЗИТНОЇ НАСОСНОЇ ШТАНГИ

Г. В. КРЕЧКОВСЬКА<sup>1,2</sup>, Б. М. БАКУН<sup>3</sup>, О. З. СТУДЕНТ<sup>1</sup>, І. Б. КОПЕЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>3</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Оцінено ударну в'язкість кожного із складників (скловолоконна оболонка та вуглець-пластикове осердя) композитної насосної штанги та досліджено фрактографічні особливості руйнування зразків, випробуваних на удар. Показано, що волокна в оболонці штанги руйнувались за крихким механізмом відколу, а полімерна матриця – за в'язким механізмом деструкції на дрібні фрагменти. Особливість осердя штанги – смуги з однонаправлених вуглецевих волокон з періодичною їх переорієнтацією, напрям поширення руйнування на переходах між якими змінювався. Така структурно обумовлена переорієнтація поверхні гальмувала руйнування і осердя, і штанги в цілому.

**Ключові слова:** композитна насосна штанга, випроби на удар, фрактографічні особливості, механізм руйнування.

The impact toughness of each component (fibreglass shell and carbon-plastic core) of the composite pump rod was evaluated, and the fractographic features of the fracture of the impact-tested samples were investigated. The fibres inside the rod shell failed by a brittle cleavage mechanism and its polymer matrix was destroyed by a ductile mechanism, with its fracture into small fragments. A specific feature of the rod core are strips of unidirectional carbon fibres with periodic reorientation, changing the direction of crack propagation at the transitions between adjacent strips. This structurally conditioned reorientation of the fracture surface inside the rod core retarded the fracture of both the core material and the rod as a whole.

**Keywords:** composite pump rod, impact test, fractographic features, fracture mechanism.

**Вступ.** Глибина опускання насосних штанг у нафтових свердловинах досягає понад 2500 м. Під час експлуатації штанги зазнають впливу корозивно-активних середовищ, таких, як пластова мінералізована вода з вмістом розчинених солей, вуглекислого газу та сірководню. Крім того, на колону діють статичні, динамічні, ударні, вібраційні, інерційні навантаження та різного роду тертя [1, 2]. Складні умови експлуатації видобувного устаткування, особливо під час ліквідації аварійних ситуацій, висувають низку вимог до корозійно-механічних характеристик матеріалів [3].

Впродовж останніх десятиліть зросла зацікавленість у композитних матеріалах, армованих вуглецевими і скляними волокнами. Розроблення нових технологій та їх удосконалення відкриває перспективи для використання таких матеріалів в елементах нафто- і газодобувного устаткування [4–8]. Відмови в конструкціях з композитних матеріалів виникають на різних етапах виробничого процесу. Оскільки колони штанг часто працюють в умовах значних динамічних навантажень, то важливо, окрім втомних характеристик [9–12], оцінити також їх опір крихкому руйнуванню. Ця робота спрямована на визначення ударної в'язкості кожного

із складників (оболонка та осердя) композитної насосної штанги та аналіз механізмів руйнування як вуглець-пластикового осердя, так і скловолоконної оболонки.

**Об'єкт та методи випробувань.** Дослідили композитну насосну штангу діаметром 19 mm, яка складалася з пластикового осердя  $\varnothing 12$  mm, армованого вуглецевими волокнами, та скловолоконної оболонки завтовшки 3,5 mm. Відрізки композитної штанги завдовжки 60 mm розрізали вдовж їх осі (рис. 1a). З отриманих половинок штанги виготовили зразки для випробувань на ударну в'язкість. На одній половинці усунули зовнішню оболонку, щоб не враховувати її вплив на ударну в'язкість, концентратор напружень нанесли зі сторони опуклої поверхні штанги. Для стійкості зразка під час випроб на ударну в'язкість з обох його країв зняли фаски (під нерухомі опори для копра) (рис. 1b). На іншій половинці штанги концентратор нанесли зі сторони поверхні поздовжнього розрізу штанги (рис. 1c). Глибину концентраторів на обох зразках розрахували так, щоб забезпечити рівність поперечних перерізів вуглецевих осердь. Таким чином, під час руйнування зразка першого типу визначали ударну в'язкість армованого вуглецем пластикового осердя (рис. 1b), а другого – сукупний ефект від руйнування осердя і зміцненої скловолоконною оболонкою штанги (рис. 1c). Площа осердя на обох зразках однакова, тому за різницею отриманих значень ударної в'язкості визначали показник, властивий скловолоконній оболонці штанги.

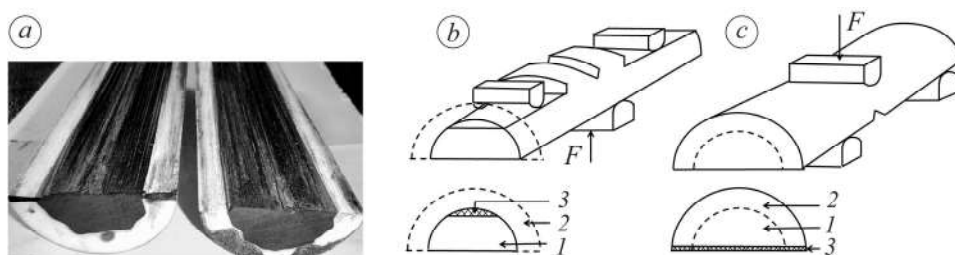


Рис. 1. Загальний вигляд половинок композитної штанги, розрізаної вздовж осі (a), та схеми навантаження зразків для визначення ударної в'язкості окремо вуглецевого осердя (b) та сукупно зі скловолоконною оболонкою (c): 1 – вуглець-пластикове осердя; 2 – скловолоконна оболонка; 3 – розташування концентратора напружень на зразках.

Fig. 1. General view of halves of the composite rod, cut along its axis (a) and the loading schemes of samples to determine the impact toughness of the carbon core separately (b) and together with the fiberglass shell (c): 1 – carbon-plastic core; 2 – fiberglass shell; 3 – location of the stress concentrator on the samples.

Отримані за результатами випробувань злами зразків аналізували на сканівному електронному мікроскопі EVO 40-XVP. Для підвищення їх провідності на поверхню попередньо напиляли прошарок золота з використанням установки JFC-1600.

**Результати досліджень. Випробування на ударну в'язкість.** Випробували дві серії по три зразки кожного типу, виготовлені відповідно до схем на рис. 1b, c. Отримали, що середнє значення ударної в'язкості зразків першого типу становило  $0,32 \text{ MJ/m}^2$ , а другого –  $0,47 \text{ MJ/m}^2$ . Під час її визначення враховували, що обидва типи зразків мали однакову площу перерізу, що припадала на вуглець-пластикове осердя ( $47 \text{ mm}^2$ ). Тому зразок першого типу характеризував опір крихкому руйнуванню осердя з полімерного матеріалу, армованого вуглецевими волокнами, а другий – сумарний ефект осердя і оболонки, армованої скловолокнами. Вирахували, що ударна в'язкість скловолоконної оболонки становила  $0,15 \text{ MJ/m}^2$ . Отже, внесок вуглець-полімерного осердя в опір крихкому руйнуванню штанги вдвічі вищий, ніж скловолоконної оболонки.

**Фрактографічні особливості руйнування осердя композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами.** Аналіз зламу зразка, випробуваного за схемою на рис. 1b, виявив каскадний характер його формування (рис. 2a). Така особливість зумовлена різною орієнтацією пакетів з вуглецевих волокон стосовно осі штанги. За сприятливої їх орієнтації (перпендикулярно до осі штанги) на зламі осердя формувалися смуги завширшки 80  $\mu\text{m}$ . В межах окремих смуг спостерігали паралельні ряди вуглецевих волокон відшарованих від полімеру, який зв'язував їх між собою. Довжина цих волокон визначала ширину візуалізованих на макроскопічному рівні смуг. Системності у розташуванні цих смуг на зламі не виявили. Проте завдяки ним відбувалась переорієнтація напрямку поширення руйнування в осерді. Оскільки на різних ділянках зламу орієнтація вуглецевих волокон в їх межах різна, то змінювався також і нахил його поверхні в межах окремих смуг відносно нормальній орієнтації. Таку періодичну переорієнтацію зламу стосовно напрямку дії руйнівальних напружень вважали додатковим важелем впливу на опір крихкому руйнуванню матеріалу вуглецевого осердя. Радіальна стосовно осі штанги орієнтація вуглецевих волокон і зростання кількості та ширини смуг з такими вуглецевими волокнами сприятиме зниженню опору руйнуванню композитної штанги за дії ударних навантажень, а перпендикулярна до неї – його зростанню. Отже, енергоємність руйнування осердя штанги за динамічних навантажень значною мірою залежить від оптимального вибору орієнтації вуглецевих волокон стосовно її осі та ширини смуг з їх однонаправленим розташуванням.

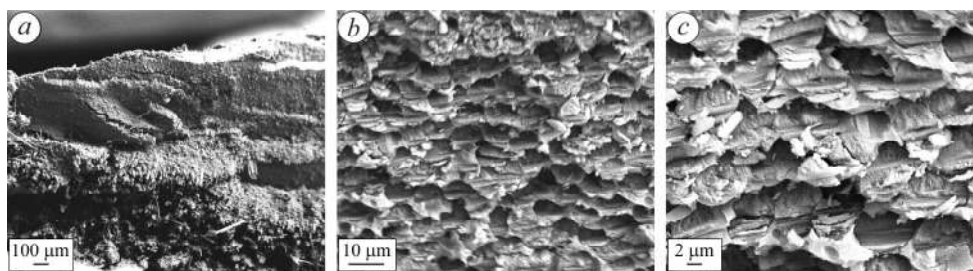


Рис. 2. Макро- (a) та мікрофрактографічні (b, c) особливості осердя композитної штанги на початковому етапі руйнування за випроб на удар. Напрямок руйнування на всіх подальших фрактограмах знизу догори.

Fig. 2. Macro- (a) and microfractographic (b, c) features of the composite rod core at the initial stage of fracture under impact tests. The direction of fracture on all subsequent fractograms from bottom to top.

На початковому етапі руйнування каскадний характер зламу осердя штанги зберігався також на мікроскопічному рівні (рис. 2b, c). Ряди волокон розташовувалися практично паралельно фронту поширення руйнування, але були нахилені до осі осердя штанги під незначним кутом. Як наслідок, зафіксували еліптичні за формою злами окремих вуглецевих волокон (рис. 2c). Характерно, що практично на кожному із аналізованих зламів виявили ознаки шаруватості структури вуглецевих волокон вздовж їх осі, що сприяло появі паралельних фронту тріщини слідів мікророзшарувань у вигляді невисоких сходинок. Така орієнтація цих волокон в осерді поблизу переходу до зовнішньої оболонки штанги (практично паралельно лінії їх розділу) забезпечувала високий опір руйнуванню осердя навіть за виникнення пошкоджень в оболонці. Поява каскадного типу руйнування зумовлена доволі великою зоною передруйнування у вершині надрізу на зразку з матеріалу осердя. Як наслідок, на початковому етапі руйнування поверхня зламу орієнтована під кутом до нормальних напружень (в напрямі виникнення максимальних деформацій).

Подальше руйнування вглиб перерізу зразка відбувалося на ділянках з іншою орієнтацією вуглецевих волокон. В результаті на зламі з'являлись ділянки з хаотично орієнтованими фрагментами зруйнованих волокон (рис. 3a). Злами цих волокон часто були зорієнтовані під кутом до їх осі, а незначне звуження поблизу них свідчило про дію прикладених напружень розтягу, які передували руйнуванню. За орієнтації вуглецевих волокон паралельно напрямку дії напружень розтягу на зламах спостерігали ознаки руйнування від дії тангенціальних зусиль. Це проявилось наявністю косих ділянок зламу, які розпочинались від бічної поверхні волокон вздовж їх периметра і сходились всередині зламу (рис. 3b).

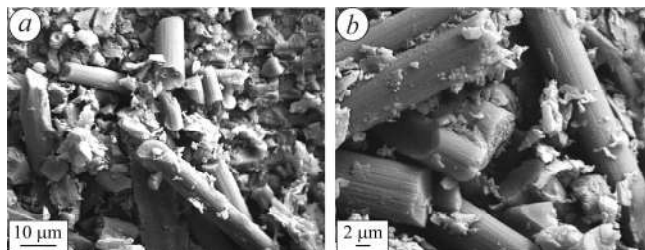


Рис. 3. Мікрофрактограми осердя композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами, на етапі поширення руйнування вглиб перерізу зразка.

Fig. 3. Microfractograms of a core of the composite rod reinforced with carbon fibers at the stage of fracture propagation into the depth of the specimen cross-section.

Отже, навіть за нормальної (стосовно напрямку дії прикладених зусиль) орієнтації волокон їх злами формувалися за механізмом в'язкого руйнування. Крім того, на бічній поверхні вуглецевих волокон виявили незначну ребристість (рис. 3b). Причин її появи може бути декілька. По-перше, це можливо суто технологічна особливість виготовлення вуглецевих волокон. По-друге, ймовірно, що ця ребристість зумовлена слідами тертя між полімером і волокнами під час їх силового висмикування з матриці за випроб на удар. По-третє, це можуть бути сліди шаруватої структури вуглецевого волокна на його бічній поверхні (подібної до відомої у графіті). Проте, незалежно від причини появи такої мікроребристості, яка проявляється на деяких зламах волокон у вигляді смугастості, можна припустити, що вона також впливатиме на опір руйнуванню вуглецевих волокон. І залежно від орієнтації волокон стосовно напрямку дії навантажень такі розшарування можуть як підвищувати цей опір, так і знижувати його. Тому під час виготовлення осердя композитних штанг важливо оптимізувати співвідношення орієнтацій вуглецевих волокон, віддаючи перевагу такому, яке здатне забезпечити найбільший опір руйнуванню.

Звісно, що морфологію бічної поверхні вуглецевих волокон найкраще аналізувати на ділянках їх відшарування від полімерної матриці (рис. 4). Проте через значний нахил зламу до пучка електронів не вдалось якісно ідентифікувати їх поверхню. Лише за високої роздільної здатності виявили ледь помітну поздовжню ребристість на поверхні вуглецевих волокон (рис. 4b). Проте цей аналіз дав змогу встановити, що під час виготовлення осердя штанги для армування полімерної матриці використовували вуглецеві волокна різного діаметра (рис. 4a). Здебільшого це волокна  $\varnothing 3$  та  $7\text{ }\mu\text{m}$ . Такий технологічний прийом дав змогу щільніше заповнити осердя вуглецевими волокнами і мінімізувати частку полімерних прошарків з нижчою здатністю витримувати дію перевантажень. Адже композитні штанги найчастіше використовують на складних ділянках видобування зі значними відхиленнями осі свердловини від нормальної орієнтації, що передбачає суттєві деформації, а отже, і можливість дочасного їх руйнування з блокуванням свердловини.

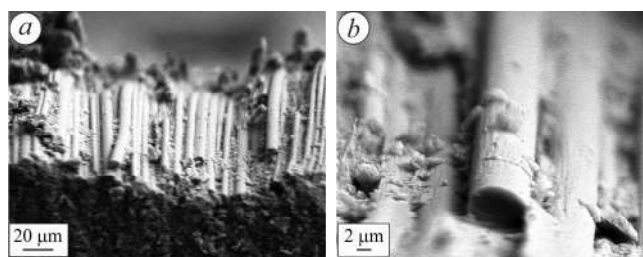


Рис. 4. Фрактографічні особливості ударного зламу осердя композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами, на етапі поширення руйнування в смузі з рядами односторонніх волокон за меншого (а) та більшого (b) збільшення.

Fig. 4. Fractographic features of impact fracture surface of the composite rod core, reinforced with carbon fibres at the stage of fracture propagation in a strip with rows of unidirectional fibres at lower (a) and higher (b) magnification.

Що стосується ділянок зламу осердя штанги, які виявились практично нормально орієнтованими до напрямку дії напружень розтягу під час ударних випробувань, то в їх межах вдалося найчіткіше виявити особливості руйнування вуглецевих волокон (рис. 5). Насамперед це ознаки крихкого руйнування полімерної зв'язки, а також суттєва роль у руйнуванні вуглецевих волокон їх шаруватої структури, що проявилось характерною смугастістю на зламах, орієнтованою паралельно фронту поширення руйнування у зразку (рис. 5b, c). Причому на аналізованій ділянці зламу ця смугастість позитивно вплинула на опір руйнуванню матеріалу осердя. Адже на кожній вузькій мікроділянці зламу між паралельно розташованими гребенями та суміжними смугами руйнування в кожному з волокон, орієнтація площини поширення змінювалась, що й уповільнювало їх руйнування. Крім того, на більшій частині зламів спостерігали гребені відриву, які віяло розходились від осередків зародження руйнування (від бічної поверхні волокон) і гальмувалися за перетину з шарувато-смугастою структурою самих вуглецевих волокон.

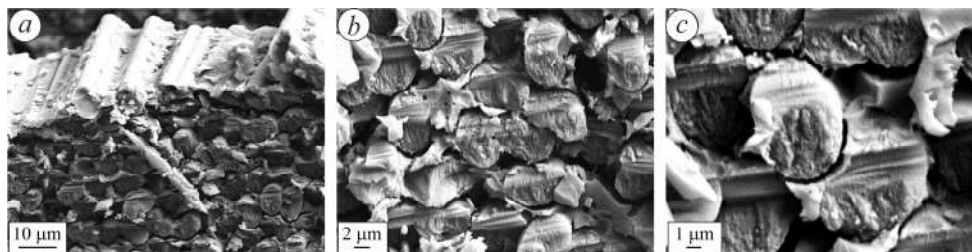


Рис. 5. Мікрофрактографічні особливості осердя композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами, на етапі поширення руйнування в його глибину за випробування на удар на переході двох смуг з різною орієнтацією волокон (а) та на ділянці нормальної орієнтації волокон (b, c).

Fig. 5. Microfractographic features of the core of a composite rod reinforced with carbon fibres at the stage of fracture propagation in its depth during impact tests at the transition of two strips with different fibre orientations (a) and in the area of normal fibre orientation (b, c).

**Фрактографічні особливості руйнування оболонки композитної штанги, армованої скловолокнами.** Аналіз зламу зразка, виготовленого згідно зі схемою на рис. 1с, виявив значну кількість подрібнених фрагментів полімеру між волокнами. Його деструкція відбувалась шляхом витягування перетинок в'язкого полімеру між скловолокнами аж до розриву зі значним його подрібненням. Дрібні уламки полімеру завуальовували злами скловолокон (рис. 6a). За просування по

зламу оболонки, подалі від концентратора напружень, фрагменти полімерної компоненти зникали. Щодо зламів скляних волокон ( $\varnothing 7 \mu\text{m}$ ), то відзначили їх нормальну стосовно дії напружень орієнтацію. Їх руйнування і біля зламу, і на віддалі від нього відбувалось за крихким механізмом з характерними ознаками крихкого руйнування у вигляді гребенів відриву, утворених внаслідок поширення відколів вздовж різних площин (рис. 6b).

На зламах скловолокон, зазвичай, ідентифікували досить високі сходинки між паралельними площинами відколу з вторинними тріщинами, які їх декорували (рис. 6c). Ці сходинки розпочинались від бічної поверхні волокон (практично вздовж більшої частки їх периметра) і сходились до однієї точки, вказуючи на напрямок поширення руйнування. Цей напрямок змінювався від волокна до волокна і здебільшого не збігався з магістральним напрямом поширення руйнування. Це означає, що в оболонці композитної штанги відбувались складні процеси перерозподілу напружень та деформацій і між оболонкою та осердям, і між волокнами та в'язким полімером. Крім того, мікрodefекти на поверхні волокон могли також слугувати концентраторами напружень та ініціювати мікровідколи. У будь-якому разі так виглядає, що механізм крихкого відколу скловолокон в оболонці композитної штанги визначальний під час її руйнування від динамічних навантажень згином, уникнути яких практично неможливо за видобування зі значними відхиленнями свердловини від вертикальної орієнтації.

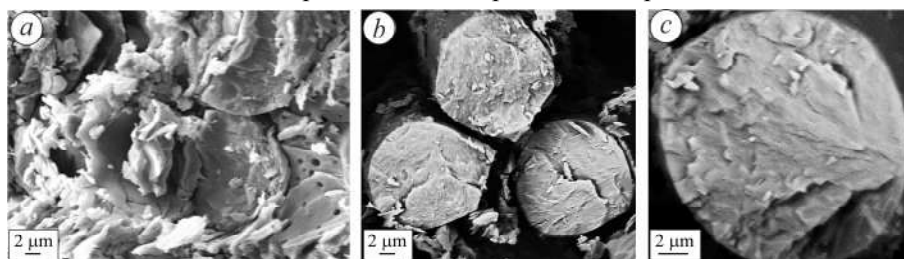


Рис. 6. Мікрофрактографічні деталі зламу зразка із композитної штанги, випробуваного ударом, виявлені в межах скловолоконної оболонки поблизу концентратора напружень на зразку (a) та на віддалі 0,5 mm від нього (b, c).

Fig. 6. Microfractographic details of the sample surface fracture of a composite rod under impact test, detected within the fiberglass shell at the stress concentrator on the sample (a) and at a distance of 0.5 mm from it (b, c).

## ВИСНОВКИ

Визначено ударну в'язкість обох компонент композитної штанги (скловолоконної оболонки та вуглець-пластикового осердя) і показано, що ударна в'язкість осердя ( $0,32 \text{ MJ/m}^2$ ) вдвічі вища, ніж оболонки ( $0,15 \text{ MJ/m}^2$ ), а отже, його внесок у опір крихкому руйнуванню композитної штанги загалом є визначальним. Досліджено їх фрактографічні особливості руйнування після випробувань на удар. Виявлено, що скловолокна в оболонці штанги руйнувалися за крихким механізмом відколу, а її полімерна матриця – за в'язким механізмом деструкції полімеру з його поділом на дрібні фрагменти. Напрямок поширення цих відколів визначав лише напрямок руйнування окремих волокон, який істотно змінювався від волокна до волокна і не збігався з магістральним напрямом поширення руйнування у зразку. Це ознака перерозподілу напружень і деформацій між скловолокнами і полімерною матрицею. За дії згину відокремлення скловолокон від матриці робить їх уразливими до відколу. Фрактографічною особливістю вуглець-пластикового осердя штанги були поперечні до напрямку поширення руйнування смуги з однонаправленим розташуванням волокон. На переходах між смугами з їх відмінною орієнтацією змінювався напрям поширення руйнування в осерді. Це трактували як можливий чинник гальмування руйнування матеріалу осердя і штанги в

цілому. Появу ледь помітного ребристого рельєфу на бічній поверхні волокон пов'язали із здатністю вуглецевих волокон розшаровуватись вздовж певних паралельних площин. Крім того, показано, що для армування осердя використано вуглецеві волокна двох типорозмірів ( $\varnothing$  3 і 7  $\mu\text{m}$ ). Це збільшило щільність їх упакування і, відповідно, зменшило прошарки полімерної зв'язки. Таким чином, забезпечено високу деформівну здатність штанги і убезпечено її від дочасного крихкого руйнування.

Результати фрактографічного аналізу зламів зразків з композитних штанг показали можливі напрямки вдосконалення технології їх виготовлення для підвищення роботоздатності в складних умовах видобування вуглеводнів із значним відхиленням свердловин від нормальної орієнтації. Зокрема, для підвищення опору крихкому руйнуванню штанг за динамічних навантажень згином рекомендовано щільніше вкладати скловолокна в межах оболонки, підвищувати адгезію між оболонкою і осердям та оптимізувати орієнтацію пакетів вуглецевих волокон в осерді стосовно напрямку дії максимальних динамічних згинальних напружень.

1. *Evaluation of the physical and mechanical properties of braided fabrics and their composites* / K. M. Charlebois, R. Boukhili, O. Zebdi, F. Trochu, and A. Gasmi // *J. of Reinforced Plastics and Composites*. – 2005. – **24**. – P. 1539–1554. DOI: 10.1177/0731684405050391.
2. *Kret N. V., Svirskaya L. M., and Venhrynyuk T. P. Corrosion-fatigue crack propagation in exploited sucker rods made of 20N2M steel* // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 2. – P. 279–283. DOI: 10.1007/s11003-020-00426-w.
3. *Failure analysis of a field brittle fracture composite insulator: Characterization by FTIR analysis and fractography* / Y. Gao, X. Liang, W. Bao, S. Li, and C. Wu // *IEEE Transact. on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2018. – **25**, № 3. – P. 919–927. DOI: 10.1109/TDEI.2018.006928.
4. *Laboratory-instrumented sucker-rod pump* / S. Pilone, S. Luppina, G. R. Maccarini, B. Williams, and M. Mahoney // *SPE Prod Fac.* – 2003. – **18**. – P. 104–113. DOI: 10.2118/83674-PA.
5. *Research on new technology for offshore heavy oil thermal recovery with rod pumping* / Y. Yu, Z. Cang, Y. Qi, and D. Feng // *J. of Petroleum Exploration and Production Techn.* – 2018. – **8**, № 3. – P. 947–955. DOI: 10.1007/s13202-017-0388-1.
6. *Fractographic analysis of tensile failures of aerospace grade composites* / M. S. Kumar, K. Raghavendra, M. A. Venkataswamy, and H. V. Ramachandra // *Mater. Research*. – 2012. – **15**, № 6. – P. 990–997. DOI: 10.1590/S1516-14392012005000141.
7. *Capacitive imaging technique for the inspection of composite sucker rod* / K. Wang, X. Yin, C. Li, W. Li, and G. Chen // *J. Mech. Eng.* – 2019. – **32**. – P. 105–116. DOI: 10.1186/s10033-019-0421-z.
8. *Comparison of the main parameters of the steel and carbon-fiber-reinforced plastic band traction units for long-stroke oil well pumps* / B. Kopei, I. Kopei, V. Kopei, O. Onysko, and V. Mykhailiuk // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – **687**. – P. 86–97. DOI: 10.1007/978-3-031-31066-9\_10.
9. *Regularities of growth of fatigue cracks in hybrid pumping rods* / B. V. Kopei, H. V. Krechkovska, V. P. Nisonyskyi, and B. M. Bakun // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 4. – P. 549–556. DOI: 10.1007/s11003-022-00577-y.
10. *Peculiarities of fatigue crack growth in steel and composite sucker rods* / H. Krechkovska, B. Kopei, B. Bakun, and I. Kopei // *Proc. Structural Integrity*. – 2022. – **42**. – P. 1406–1413. DOI: 10.1007/s11003-023-00728-9.
11. *Specific features of corrosion-fatigue fracture of steel and hybrid pump rods* / B. V. Kopei, H. V. Krechkovska, I. B. Kopei, and B. M. Bakun // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 6. – P. 768–773. DOI: 10.1007/s11003-023-00728-9.
12. *Fractographic analysis of tensile failures of aerospace grade composites* / M. Suresh, K. Raghavendra, M. A. Venkataswamy, and H. V. Ramachandra // *Mater. Research*. – 2012. – **15**, № 6. – P. 990–997. DOI: 10.1590/S1516-14392012005000141.

Одержано 12.08.2023