

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бакун Богдан Миколайович

УДК 622.691

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГ

133 – Галузеве машинобудування

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Б. М. Бакун

Наукові керівники: **Копей Богдан Володимирович**

доктор технічних наук, професор

Кречковська Галина Василівна

доктор технічних наук, старший дослідник

Івано-Франківськ – 2024

АНОТАЦІЯ

Бакун Б. М. Підвищення ресурсу гібридних насосних штанг. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування» (13 – «Механічна інженерія»). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2024 р.

Дисертаційна робота присвячена обґрунтуванню можливості та пошуку шляхів підвищення ресурсу гібридних насосних штанг (НШ) шляхом вивчення закономірностей зміни їх властивостей за близьких до натурних втомних випробувань зразків, їх порівняння з відповідними властивостями традиційно вживаних сталевих насосних штанг, оцінювання опору динамічним навантаженням, розкриття механізмів руйнування та структурних особливостей склопластикової оболонки та вуглепластикового осердя штанг, розроблення технічно нових конструкційних рішень щодо з'єднання тіла штанги зі сталевією головкою та розрахунку напружено-деформованого стану у критичних перерізах розробленого з'єднання за впливу розтягу та згину як основа для обґрунтування роботоздатності розробленого з'єднання для свердловинного обладнання з суттєвими відхиленнями свердловини від нормальної орієнтації. Оскільки витрати на забезпечення безперебійної експлуатації нафтових свердловин становлять значну частину від собівартості основної продукції паливно-енергетичного комплексу України, то зменшення кількості обривів в колонах насосних штанг, підвищення довговічності кожного з її елементів та, як наслідок, зниження споживання енергії штангових свердловинних насосних установок залишається актуальною задачею сучасного нафтовидобувного виробничого процесу важливою і з наукової, і з конструкторсько-інженерної, і з практичної точок зору.

З аналізу статистики відмов вузлів штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) випливає, що причиною 20–30% експлуатаційних відмов

визнають обрив насосних штанг. У 70–80% випадків обрив колони штанг відбувається через руйнування тіла сталевих НШ. Серед основних причин негативного впливу на їх роботоздатність називають корозійно-активне середовище та високі і різнонаправлені експлуатаційні навантаження в елементах штангової колони. Для підвищення ефективності роботи ШСНУ сьогодні все частіше використовують колони НШ, значну частину штанг якої виготовляють із полімерних композитних матеріалів (ПКМ). Для цього використовують різні варіації полімерних матеріалів, армованих скляними, вуглецевими чи волокнами іншої природи. Порівняно із сталлю такі матеріали мають ряд переваг. Зокрема в роботі експериментально обґрунтовано високий потенціал цих матеріалів за різного типу навантажень, показано особливості структури оболонки гібридних штанг, армованої скляними волокнами, та їх вуглепластикового осердя, розкрито механізми їх пошкодження за втомних та ударних навантажень, показано ключову роль скло волоконної оболонки у забезпеченні втомної міцності таких штанг та вуглепластикового осердя в забезпеченні їх високого опору крихкому руйнуванню.

Проте для широкого використання склопластикових чи вуглепластикових НШ у ШСНУ їх потрібно надійно з'єднувати із сталевими головками. Адже наявність різьби на цих головках дає можливість послідовно з'єднувати між собою велику кількість НШ. Існує багато конструктивних рішень такого з'єднання. Проте з урахуванням складного напружено-деформованого стану у таких з'єднаннях під час експлуатації колон (крутні моменти та високі напруження розтягу, згину та удару, яких неможливо уникнути у глибоких свердловинах) досі залишається важливим і остаточно не вирішеним завдання, спрямоване на забезпечення рівнозначної міцності самої сталевий головки і її з'єднання з склопластиковим чи вуглепластиковим стрижнем.

Аналіз особливостей відомих матеріалів для виготовлення гібридних НШ свідчить про їхні позитивні якості відносно сталевих. Зокрема їм властиві висока питома міцність, суттєво менша вага та вища стійкість до корозійно-активних технологічних середовищ. Разом з тим, їх з'єднання зі сталевий головою

залишаються недостатньо надійними. За використання клею для фіксації їх між собою як одне ціле адгезивна міцність з'єднання гібридних штанг зі сталеву головою визначатиметься дотриманням технології склеювання, якої непросто дотримуватися у виробничих умовах, та міцністю клею, яка на сьогодні все ще залишається обмеженою.

Відомий також варіант з'єднання цих елементів, в якому циліндричний стрижень із композиційного матеріалу з'єднують з металевою головою штанг, що містить з одного боку різьбу, а з іншого – установочну частину із внутрішньою порожниною. У цьому варіанті з'єднання вимоги до стану поверхонь, що з'єднуються між собою, є значно нижчими, оскільки не передбачають їх додаткової підготовки. Це не лише нівелює вплив клеєвого з'єднання на міцність та надійність штанги, але ще й суттєво спрощує операцію кріплення стрижня зі сталеву головою штанг.

Для усунення перелічених недоліків, властивих відомим прототипам з'єднань, розробили новий варіант з'єднання тіла гібридної штанги зі сталеву головою. Під час її конструювання мінімізували вплив клеєвого прошарку у забезпеченні міцності з'єднання обох елементів, збільшили площу поверхні клеєного з'єднання, розпустивши кінець гібридної штанги на сектори, між які просочувався клей, використали можливості сил тертя вздовж конусної поверхні порожнини, в якій фіксували кінець гібридної штанги, усунули концентрацію напружень на переході між тілом штанги та крайкою отвору в сталевій головці, в яких входила штанга. Створена 3D модель такого з'єднання в середовищі SolidWorks показала його технологічну дієздатність та можливість використання сталевих головок, прийнятих в експлуатації насосних колон, а застосування скінченно-елементного аналізу дало змогу розрахувати напруження і деформації у критичних перерізах розробленого з'єднання і показати їх спроможність чинити опір експлуатаційним навантаженням за розтягу та згину. Застосування розробленого з'єднання сталеву головки з тілом гібридної штанги значно підвищило міцність і надійність їх кріплення між собою, а також спростило технологію виготовлення і зборки гібридних насосних штанг. Завдяки технічній

простоті його реалізація не вимагає великих фінансових вкладень та кардинального переобладнання наявного устаткування підймальних установок.

Ключові слова: міцність конструкції, насосна штанга, мікроструктура, комп'ютерне моделювання, метод розрахунку, ресурс, полімерно-композиційні матеріали, тріщина, руйнування, надійність, втомна довговічність, напруження.

ABSTRACT

Bakun B. M. Increasing the resource of hybrid sucker rods. – Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in speciality 133 – "Industrial mechanical engineering" (13 – "Mechanical engineering"). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 2024.

The dissertation is devoted to substantiating the possibility and finding ways to increase the service life of hybrid sucker rods (SR) by studying the patterns of changes in their properties during fatigue tests of samples close to real life, comparing them with the corresponding properties of traditionally used steel sucker rods, evaluating the resistance to dynamic load, revealing the mechanisms of destruction and structural features of the fiberglass shell and the carbon-plastic core of the rods, the development of technically new structural solutions for the connection of the rod body with the steelhead and the calculation of the stress-strain state in the critical sections of the developed connection under the influence of tension and bending as a basis for substantiating the workability of the developed connection for hole equipment with significant deviations of the well from the normal orientation. Since the costs of ensuring the uninterrupted operation of oil wells constitute a significant part of the cost of the main products of the fuel and energy complex of Ukraine, reducing the number of breaks in the sucker rod columns, increasing the durability of each of its elements and, as a result, reducing the energy consumption of rod well pump installations remains relevant the task of the modern oil production process is important both from the scientific, from the design and engineering, and from the practical points of view. From the analysis of the statistics of failures of rod well-pumping units (RWPU), it

follows that the reason for 20-30% of operational failures is the break of sucker rods. In 70–80% of cases, the break of a column of rods occurs due to the destruction of the body of steel SR. Among the main reasons for the negative impact on their performance are the corrosive-active environment and high and multidirectional operating loads in the elements of the rod column. In order to increase the efficiency of the work of RWPU, today more and more often use columns of SR, a significant part of the rods of which are made of polymer composite materials (PCM). For this, different variations of polymer materials reinforced with glass, carbon or fibers of another nature are used. Compared to steel, such materials have a number of advantages. In particular, the work experimentally substantiates the high potential of these materials under various types of loads, shows the features of the structure of the shell of hybrid rods reinforced with glass fibers and their carbon fiber core, reveals the mechanisms of their damage under fatigue and shock loads, shows the key role of the glass fiber shell in ensuring fatigue strength such rods and carbon-plastic core in ensuring their high resistance to brittle failure. However, for the wide use of fiberglass or carbon-plastic SR in RWPU, they need to be reliably connected to steel heads. After all, the presence of a thread on these heads makes it possible to sequentially connect a large number of SR. There are many constructive solutions for such a connection. However, taking into account the complex stress-strain state in such connections during the operation of the columns (torques and high tensile, bending and impact stresses, which cannot be avoided in deep wells), there is still an important and not finally solved task aimed at ensuring equivalent strength of the steel head itself and its connection with a fiberglass or carbon fiber rod. The analysis of the features of known materials for the manufacture of hybrid SR shows their positive qualities relative to steel ones. In particular, they are characterized by high specific strength, significantly lower weight and higher resistance to corrosive and active technological environments. However, their connection to the steel head remains insufficiently reliable. By using an adhesive to fix them together as a whole, the adhesive strength of the connection of the hybrid rods to the steel head will be determined by the adherence to the bonding technology, which is not easy to follow in production conditions, and the strength of the adhesive, which is still limited today. A

variant of connecting these elements is also known, in which a cylindrical rod made of composite material is connected to a metal rod head, which contains a thread on one side, and an installation part with an internal cavity on the other. In this version of the connection, the requirements for the condition of the surfaces that are connected to each other are much lower, since they do not require their additional preparation. This not only eliminates the influence of the adhesive joint on the strength and reliability of the rod, but also significantly simplifies the operation of attaching the rod to the steel rod head.

To eliminate the listed shortcomings inherent in the known prototypes of connections, a new version of the connection of the body of the hybrid rod with the steel head was developed. During its construction, the influence of the adhesive layer in ensuring the strength of the connection of both elements was minimized, the surface area of the glued connection was increased by spreading the end of the hybrid rod on the sectors between which the glue seeped, and the possibilities of frictional forces were used along the conical surface of the cavity in which the end was fixed hybrid rod, eliminated the stress concentration at the transition between the body of the rod and the edge of the hole in the steel head, in which the rod entered. The created 3D model of such connection in the SolidWorks environment showed its technological efficiency and the possibility of using steel heads adopted in the operation of SR columns, and the use of finite element analysis made it possible to calculate stresses and deformations in the critical sections of the developed connection and show their ability to resistance to operational loads in tension and bending. The use of the developed connection of the steel head with the body of the hybrid rod significantly increased the strength and reliability of their attachment to each other, as well as simplified the technology of manufacturing and assembly of hybrid sucker rods. Due to its technical simplicity, its implementation does not require large financial investments and a radical conversion of the existing equipment for lifting installations.

Keywords: Structural strength, sucker rod, microstructure, computer modelling, method of calculation, resource, polymer-composite materials, crack, fracture, reliability, fatigue life, stress.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Regularities of growth of fatigue cracks in hybrid pumping rods. Kopei B. V., Krechkovska H. V., Nisonyski V. P., Bakun B. M. *Materials Science*. 57, 4. 2022. P. 549–556. DOI 10.1007/s11003-022-00577-y (Scopus, WoS, Q3). *(Особистий внесок здобувача: аналіз досліджень втомної поведінки штанг та дослідження напружень при розтягу та стиску, Нісонський–графічне оформлення, Копей та Кречковська – редагування та вичитування).*

2. Specific features of corrosion-fatigue fracture of steel and hybrid pump rods. Kopei B. V., Krechkovska H. V., Kopei I. B., Bakun B. M. *Materials Science*. 2023. 58, 6. P. 768–773. DOI 10.1007/s11003-023-00728-9 (Scopus, WoS, Q3). *(Особистий внесок здобувача: проведення наукових досліджень та результати досліджень росту втомних тріщин насосних штанг. Копей І.–графічне оформлення, Копей Б. та Кречковська – остаточний рукопис).*

3. Peculiarities of fatigue cracks growth in steel and composite sucker rods. H. Krechkovska, B. Kopey, B. Bakun, I. Kopei. *Procedia Structural Integrity*. 2022. 42. P. 1406–1413. DOI 10.1016/j.prostr.2022.12.179 (Scopus, WoS). *(Особистий внесок здобувача: результати досліджень втомної поведінки штанг залежно від напружень випробувань. Копей І.–графічне оформлення, редагування – Копей Б. та Кречковська).*

4. Feature of fatigue fracture of the composite sucker rod / H. Krechkovska, B. Bakun, I. Kopei. O. Student. *Procedia Structural Integrity*. 2024. 59. P. 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.042>. (Scopus, WoS). *(Особистий внесок здобувача: фрактографічний аналіз зламів та дослідження зародження та поширення тріщин у гібридній штанзі за випробувань на втому, Копей І підготовка зразків, Кречковська та Копей Б – редагування).*

5. Impact Toughness and Fractographic Peculiarities of a Composite Pump Rod Fracture. H.V. Krechkovska, B.M Bakun., O.Z. Student, I. B. Kopei. *Materials*

Science. 2024. 59, 5. P. 616–622. DOI:10.1007/s11003-024-00818-2. (Scopus, WoS). *(Особистий внесок здобувача: визначення ударної в'язкості складових штанги та фрактографічний аналіз зламів після випробувань на удар із встановленням механізмів руйнування, Копей І. та Студент–підготовка зразків, Копей Б. та Кречковська обговорення результатів та вичитування матеріалу статті).*

6. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Бакун Б. М. Дослідження з'єднань вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками при дії навантажень згину. Нафтогазова енергетика. 2021. 2, №36. С. 68–79. (фах. вид. Б). *(Особистий внесок здобувача: дослідження конструкцій насосних штанг та скінченно-елементний аналіз з'єднання вуглепластикового стрижня зі сталевою головкою. Михайлюк – графічні дані, Копей – обговорення результатів).*

7. Скінчено-елементний аналіз з'єднань гібридної насосної штанги. Копей Б. В., Копей І. В., Канівець В. В., Бакун Б. М. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. №4 (85). 2022 – С. 43–52. (фах. вид. Б). *(Особистий внесок здобувача: скінченно-елементний аналіз з'єднання вуглепластикового стрижня зі сталевою головкою, Копей І. та Канівець – графічне оформлення, Копей Б.–обговорення результатів щодо проблем насосних штанг і їх вирішення).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Патент на корисну модель. № u 2022 03340 МПК (2023.01) E21B 17/00, E21B 11/00. Спосіб з'єднання тіла насосної гібридної штанги зі сталевою головкою. Копей Б. В., Бакун Б. М. – u 2022 03340; заявл. 12.09.2022; опубл. 18.10.2023. – 1 с. *(Особистий внесок здобувача: спосіб з'єднання сталеві головки та вуглепластикового стрижня, Копей Б.–обговорення результатів щодо проблем насосних штанг і їх вирішення).*

9. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Бакун Б. М. Дослідження з'єднань вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками. Abs. of the 2-nd Int. scientific and practical conf. “Priority directions of science and technology development” (October 25–27, 2020) SPC “Sci-conf. com.ua”, Kyiv, Ukraine. 2020. P. 281–285. *(Особистий внесок здобувача: аналіз конструкції з'єднання вуглепластикових*

стрижнів зі сталевими головками та визначення нормальних напружень Михайлюк–графічне оформлення, Копей–обговорення результатів).

10. Копей Б. В., Бакун Б. М. Ріст тріщин втоми в гібридних штангах. Сучасний рух науки: тези доп. XI міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції, 8-9 жовтня 2020 р. Дніпро, 2020. Т. 1. С.330 – 332. *(Особистий внесок здобувача: отримання аналіз результатів досліджень росту втомних тріщин, Копей–обговорення результатів).*

11. Розрахунок числа циклів навантаження насосної штанги з втомною тріщиною до критичного значення. Копей Б. В., Мартинець О. Р., Бакун Б. М. Конференція Sworld “World Scientific and Technical Trends’ 2020“, Німеччина, 26-27 листопада. 2020. С.4 – 8. *(Особистий внесок здобувача: аналіз результатів досліджень штанг за різного навантаження за втомних випробувань, Мартинець–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).*

12. Копей Б. В., Бакун Б. М., Біжко Т. В. Скінченно-елементний аналіз з’єднання гібридної насосної штанги. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 6th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Kyoto, Japan. 2021. P. 326–335. *(Особистий внесок здобувача: аналіз з’єднання вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками та розрахунок напружень при розтязі, Біжко–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).*

13. Копей Б. В., Бакун Б. М., Мартинець О. Р. Оцінка ресурсу насосних штанг з втомними тріщинами. Тези конференції «Нафтогазова енергетика-21», 20–25 вересня 2021 р. Секція А: Нафтогазова інженерія, Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. 2021. С.50–61. *(Особистий внесок здобувача: аналіз роботоздатності штанг за кількістю циклів навантаження, Мартинець–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).*

14. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Бакун Б. М. Дослідження з’єднань вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками при дії навантажень згину. Тези конференції «Нафтогазова енергетика-21», 20-25 вересня 2021 р. Секція А: Нафтогазова інженерія, Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2021, с. 21–22.

(Особистий внесок здобувача: аналіз розподілу нормальних напружень у гібридній штанзі, Михайлюк–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).

15. Копей Б. В., Бакун Б. М. Закономірності росту втомних тріщин в гібридних насосних штангах. Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference, February 3-4, 2022. FOP Marenichenko V. V., Dnipro, Ukraine. P. 293–295. *(Особистий внесок здобувача: дослідження кінетики росту тріщин, Копей–обговорення результатів).*

16. Копей Б. В., Копей І. Б., Бакун Б. М. Дослідження росту втомних тріщин в сталевих та композитних насосних штангах. В зб. «Нафта і газ. Наука – Освіта – Виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку»: матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Дрогобич, 27 травня 2022 р.). Дрогобич: ТзОВ «Трек-ЛТД». 2022. С. 99–105. *(Особистий внесок здобувача: отримання та аналіз результатів досліджень штанг за втомного навантаження, Копей І.–графічне оформлення, Копей Б. – обговорення результатів).*

17. Krechkovska H., Kopey B., Bakun B., Kopey I. #502 Peculiarities of fatigue cracks growth in steel and composite sucker rods. Book of abstracts. ECF23. Madeira. 2022. (27 June – 02 July 2022. P. 451. ISBN: 9788831482189 *(Особистий внесок здобувача: отримання та аналіз результатів досліджень росту втомних тріщин у штангах, Копей І.–графічне оформлення, Копей та Кречковська – обговорення результатів).*

18. Копей Б. В., Канівець В. В., Копей І. Б., Бакун Б. М. Скінченно-елементний аналіз з'єднань сталевих наконечників та гібридного стержня насосної штанги. Пріоритетні напрями розвитку науки під час воєнного стану, ХСІІ Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. м. Одеса, 24 червня 2022 р. P.13–21. *(Особистий внесок здобувача: Скінченно-елементний аналіз з'єднання вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками, Копей І. та Канівець – графічне оформлення, Копей Б.– обговорення результатів щодо проблем насосних штанг і їх вирішення).*

19. Kopey B. Krechkovska G. Kopey I. Bakun B. Growth of fatigue cracks in steel and composite sucker rods. XVI International Conference “Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials” (Corrosion-2022). 15–16 November 2022, Lviv, Ukraine: Book of Abstract. Lviv, 2022. P. 29. (*Особистий внесок здобувача: аналіз росту поширення втомних тріщин за різних навантажень, Копей І.–графічне оформлення, Копей та Кречковська – обговорення результатів*).

20. Fractographic features of composite sucker rod fracture B. Bakun, H. Krechkovska, B. Kopey, M. Hredil, O. Student. Book of Abstracts 24th Annual Conference YUCOMAT – 2023, Herceg Novi, Montenegro, September 4–8, 2023. P. 134. (*Особистий внесок здобувача: вивчення закономірностей зміни механічних властивостей та механізмів руйнування складових композитної штанги, Греділь та Студент–підготовка зразків, Копей та Кречковська – обговорення результатів*).

21. Substantiation of the possibility of repairing sucker rods. A. Stefanyshyn, B. Bakun, I. Kopei, H. Krechkovska, O. Stefanyshyn. Int. Young Scientists Conf. on Materials Science and Surface Engineering MSSE2023. Proceedings, Lviv. P.196–199. (*Особистий внесок здобувача: аналіз результатів досліджень штанг за втомного навантаження, виступ на конференції, Стефанишин–графічне оформлення, Копей та Кречковська – обговорення результатів*).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАСОСНИХ ШТАНГ.....	23
1.1. Штангова установка та особливості роботи насосних штанг у глибоких свердловинах.....	23
1.2. Насосні штанги з полімерних композитних матеріалів	28
1.3 Відомі методи контролю за виникненням пошкоджень у полімерних композитних матеріалах та прогнозування ресурсу штанг.....	34
1.4 Аналіз відомих конструкційних рішень для забезпечення з'єднання сталевих головок з тілом насосних штанг з ПКМ.....	40
1.5 Постановка завдань досліджень.....	58
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	59
2.1 Об'єкт дослідження.....	59
2.2 Втомні випробування насосних штанг.....	61
2.2.1 Підготовка зразків до випробувань.....	63
2.2.2 Контроль аналізованих параметрів.....	64
2.3 Випробування зразків на ударну в'язкість.....	65
2.4 Методика проведення структурного аналізу та фрактографічних досліджень.....	65
РОЗДІЛ 3 ОСОБЛИВОСТІ РОСТУ ТРІЩИН ВТОМИ У ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГАХ ТА АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ТА ФРАКТОГРАФІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЇХ РУЙНУВАННЯ.....	68
3.1 Вплив рівня змінних навантажень на характеристики втоми гібридних насосних штанг.....	68
3.2 Особливості структурні двошарової композиційної штанги на різній віддалі від поверхні втомного зламу.....	75

3.2.1	Макроструктурні особливості композитної штанги в околі втомного зламу.....	75
3.2.2	Мікроструктура двошарової композитної штанги в її поперечному перерізі під втомним зломом	77
3.2.3	Мікроструктура двошарової композитної штанги в її поздовжньому перерізі в околі втомного зламу.....	82
3.2.4	Структура в поперечних перерізах композитної штанги на різній віддалі від втомного зламу.....	90
3.2.5	Вплив напружень в аналізованому перерізі композитної штанги на міру пошкодженості її оболонки.....	98
3.2.6	Особливості структури вуглепластикового осердя на різній віддалі від утомного зламу композитної штанги.....	101
3.3	Фрактографічні особливості втомного руйнування гібридної насосної штанги.....	104
3.4	Ударна в'язкість та фрактографічні особливості руйнування композитної насосної штанги.....	112
3.4.1	Результати випробувань на ударну в'язкість.....	114
3.4.2	Фрактографічні особливості руйнування оболонки композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами.....	115
3.4.3	Фрактографічні особливості руйнування осердя композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами.....	118
	Висновки до розділу 3.....	125
РОЗДІЛ 4 АТЕСТАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ НАСОСНИХ ШТАНГ ЗА ВТОМНОЮ ДОВГОВІЧНІСТЮ ТА РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ З'ЄДНАННЯ ТІЛА ГІБРИДНОЇ НАСОСНОЇ ШТАНГИ ЗІ СТАЛЕВОЮ ГОЛОВКОЮ.....		
4.1	Порівняння втомних характеристик та особливостей росту тріщин в гібридних, склопластикових та сталевих насосних штангах.....	129

4.2 Розвиток підходів до оцінювання залишкового ресурсу насосних штанг.....	139
4.2.1 Теоретичні підходи до розрахунку залишкового ресурсу насосних штанг з утомними тріщинами.....	139
4.2.2. Результати оцінювання показника вичерпування ресурсу гібридних насосних штанг.....	144
4.2.3. Розрахунок залишкового ресурсу насосних штанг за наявності в них втомних тріщин.....	146
4.2.4. Визначення ймовірності неруйнування сталевих та гібридних штанг з кривих росту в них тріщин втоми.....	148
4.3 Розроблення конструкції з'єднання тіла гібридної насосної штанги зі сталевую головою.....	149
4.3.1. Розроблення твердотільної моделі з'єднання.....	149
4.3.2. Дослідження напружено-деформованого стану з'єднання металевої головки із вуглепластиковою штангою.....	151
Висновки до розділу 4.....	159
ВИСНОВКИ.....	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	164
ДОДАТКИ.....	173

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

НШ – насосна штанга

ШСНУ – штангова свердловинна насосна установка

ПКМ – полімерно-композиційних матеріалів

НКТ – насосно-компресорні труби

КНШ – колони насосних штанг

МПНШ – металополімерна насосна штанга

АЕ – акустична емісія

СВ – скляні волокна

ВВ – вуглецеві волокна

σ_B – границя міцності матеріалу

γ – його питома вага.

СПФ – сплав з пам'яттю форми

a – довжина тріщини

a_c – критична довжина втомної тріщини у сталевих штангах

l_c – критична довжина втомної тріщини у гібридних штангах

σ – напруження

K – показник пошкодженості

K_c – критичний рівень пошкодженості

L – віддаль від зламу

N – кількість циклів на потічний момент випробувань

N_f – кількість циклів на момент їх руйнування

N / N_f – частки виробленого ресурсу

ВСТУП

Актуальність теми. З середини минулого сторіччя скло- та вуглепластики розглядали як альтернативу сталям з постійним розширенням сфери їх застосування в багатьох галузях промислового виробництва, зокрема в нафто- і газовидобуванні. На сьогодні композитні матеріали вже є широко вживаними й допомагають вирішити чимало завдань щодо модернізації устаткування. Зокрема, в нафто- та газовидобувній галузях полімерно-композиційні матеріали використовують для виготовлення насосно-компресорних і обсадних труб, нафтопромислових комунікацій, різноманітних ємностей, кришок, фільтрів, насосних штанг, різноманітних перехідників, обв'язок, засувки тощо.

Розширення вжитку полімерних матеріалів обумовлене низкою їх переваг порівняно зі сталями, а саме їх: високою міцністю, суттєво меншою густиною і питомою вагою, високою корозійною стійкістю, що є важливим аспектом з урахуванням умов експлуатації конструктивних елементів в свердловині, непровідністю струму, ефективною роботою не лише у вертикально орієнтованих свердловинах, але також за їх суттєвого відхилення від вертикальності, оскільки полімери здатні витримувати значні деформації без руйнування і легко переорієнтовуватись в напрямі полегшеного свердління.

Попри переваги ПКМ не можна нехтувати їх недоліками відносно сталевих: низькі міцність та надійність з'єднання композиту із металевими наконечниками, доволі висока вартість та складність технології виготовлення. Чимала кількість шкідливих речовин виділяється під час виготовлення й оброблення цих матеріалів, що негативно позначається на довкіллі. Разом з тим завдяки значним перевагам ПКМ широко використовують в промисловості.

Разом з тим для застосування ПКМ в НШ залишається експериментально не обґрунтованою їх здатність чинити опір динамічним та знакозмінним втомним навантаженням, яких не оминати в експлуатаційних умовах нафтовидобування. Важливим є також механізм руйнування компонентів ПКМ

за дії таких навантажень. Не менш важливо розкрити потенційні можливості НШ з ПКМ за втомною довговічністю за сумісного впливу знакозмінних напружень та корозійно-активного середовища та порівняти їх з відповідними властивостями традиційних сталевих штанг.

Завдяки позитивним характеристикам ПКМ вироби з них мають широкий спектр опцій і для удосконалення вже наявних конструктивних рішень, і для запровадження інноваційних шляхом розроблення нових технологічних підходів та конструкцій, які враховують і переваги, і недоліки ПКМ. Зокрема, щоб забезпечити дієздатність і ефективність елементів нафтовидобувних колон на значній глибині з одночасним суттєвим відхиленням свердловини від вертикальності необхідно розробити конструкцію надійного з'єднання між сталевими компонентами колони штанг (у вигляді з'єднувальних головок) та їх тілом з ПКМ. При цьому важливо, щоб під час такої модернізації конструкції з'єднання між цими ключовими елементами було використано вже наявні в галузі сталеві елементи, які широко використовують під час збирання колони. Це дасть змогу суттєво здешевити впровадження удосконаленої конструкції такого з'єднання.

Аналіз відомих на тепер конструктивних рішень, для вирішення такого важливого для нафтовидобувної галузі завдання показав, що під час їх розроблення враховувались лише осьові навантаження в такому з'єднанні. Разом з тим досвід експлуатації свердловин під час глибинного свердління показує, що на елементи колони з НШ діють також навантаження, спричинені згином та крученням, тертям з колоною насосно-компресорних труб (НКТ), тощо. Тому необхідно розробити конструкційне з'єднання між елементами НШ, а також розрахувати напруження у конструктивно слабких його місцях, і тоді за міцністю обґрунтувати можливість використання розробленого з'єднання за експлуатаційних рівнів напружень розтягу та згину.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Дисертаційна робота виконувалась в рамках науково-дослідних програм з розвитку нафтопромислового комплексу України, які були включені до плану

наукової та науково-технічної діяльності Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу МОН України, у вигляді кафедральної науково-дослідної роботи.

Мета і завдання дослідження. Підвищення роботоздатності гібридних насосних штанг шляхом експериментального обґрунтування їх придатності до експлуатації за дії динамічних та втомних навантажень, і розроблення нової конструкції з'єднання з допустимими напруженнями в критичних його перерізах за дії розтягу та згину.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати причини втомного руйнування та відмов НШ з ПКМ та відомі методики оцінки їх роботоздатності.

2. Провести втомні випробування гібридних НШ, проаналізувати особливості зародження і поширення в них втомних тріщин та встановити вплив розмаху навантаження на інкубаційний період до зародження тріщин і на швидкість їх росту, як основу для обґрунтування довговічності НШ.

3. На основі електронно-фрактографічного аналізу вивчити механізм зародження та поширення втомних тріщин в з'єднаннях гібридних насосних штанг.

4. Розробити алгоритм визначення ударної в'язкості різних складових гібридної штанги, розкрити особливості механізму руйнування кожної з них, як основа для оцінювання опору крихкому руйнуванню НШ за динамічних навантажень.

5. Порівняти закономірності зародження та поширення втомних тріщин в гібридних та сталевих НШ за сумісного впливу втомних навантажень та корозійно-активного середовища.

6. Розробити нову конструкцію з'єднання між сталевією головою та тілом НШ з ПКМ, в якій усунути недоліки відомих конструктивних рішень їх з'єднання та забезпечити надійний зв'язок обох елементів та з використанням аналітичних підходів та методу скінчених елементів оцінити напружено-деформований стан в критичних перерізах розробленої конструкції з'єднання

елементів гібридних НШ та обґрунтувати його роботоздатність за дії напружень розтягу та згину.

Об'єкт дослідження – вплив динамічних та втомних навантажень на властивості та механізм руйнування гібридних насосних штанг.

Предмет дослідження – підвищення дієздатності конструкції з'єднання насосної штанги зі сталеву головою на основі моделювання напружено-деформованого стану у його критичних перерізах за дії напружень розтягу та згину.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання та оцінювання напружено-деформованого стану в критичних перерізах розробленої конструкції з'єднання для обґрунтування його роботоздатності за міцністю, випробування на втомну витривалість, ударна в'язкість, структурний аналіз та мікрофрактографічні дослідження механізмів руйнування.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше обґрунтовано механізм визначення ударної в'язкості обох складових ПКМ (вуглепластикового осердя та скловолоконної оболонки) та встановлено високу опірність НШ з ПКМ до дії динамічних навантажень;

- вперше розкрито механізм і показано роль орієнтації скляних волокон в оболонці та вуглецевих волокон в осерді і матричної полімерної складової на особливості руйнування НШ з ПКМ за втомного навантаження;

- вперше на основі порівняння втомних характеристик ПКМ та традиційно вживаних для виготовлення НШ сталей продемонстровано переваги і недоліки кожного з матеріалів за впливу різних чинників впливу (за використання технологічного зміцнення сталі та корозійного середовища як активатора корозійних процесів);

- встановлено залежності зміни інкубаційного періоду та характеру підростання тріщини в зразках з ПКМ залежно від прикладених напружень за циклічного згину;

- розроблено конструкцію з'єднання НШ з ПКМ зі сталеву головою та на основі моделювання напружено-деформованого стану у його критичних перерізах обґрунтовано його дієздатність за впливу напружень розтягу та згину.

Практичне значення одержаних результатів. Запропонована в роботі конструкція з'єднання тіла гібридної насосної штанги зі сталеву головою дасть змогу досягати більших глибин та витримувати дію вищого моменту згину, а отже може витримувати значні відхилення від нормальної орієнтації свердловини, що сприятиме підвищенню ресурсу штангової колони під час її експлуатації. Проведений скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану у критичних перерізах з'єднання тіла гібридної насосної штанги зі сталеву головою засвідчив більший запас міцності штанг за використання з'єднання відповідно до розробленої конструкції. Вдосконалено методику прогнозування ресурсу гібридних насосних штанг на основі експериментально отриманих залежностей росту втомних тріщин на етапі їх докритичного поширення. Результати мають науковий і практичний інтерес для спеціалістів з підвищення ресурсу композитних насосних штанг і будуть корисними для студентів закладів вищої освіти зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Основні експериментальні дані та їх узагальнення, математичні розрахунки та розроблені моделі, викладені наукові положення та висновки, які становлять суть дисертації, отримані та сформульовані здобувачем самостійно. У наукових працях, які опубліковані в співавторстві, Б. М. Бакуну належить (нумерація, згідно додатку А): вивчення закономірностей зміни механічних властивостей та механізмів руйнування складових композитної штанги [4, 5, 7, 20], аналіз досліджень штанг за втомного навантаження [1–3, 10, 15–17, 19, 21], розроблення конструкції з'єднання та скінченно-елементний аналіз з'єднання вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками [3, 6, 8, 9, 12, 14, 18], оцінка ресурсу насосних штанг [11, 13].

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних та вітчизняних конференціях:

2nd Int. Sci. and Pract. Conf. “Priority directions of science and technology development” (Kyiv, 2020); XI міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. «Сучасний рух науки» (Дніпро, 2020); IV Міжн. научно-практ. конф. «World Scientific and Technical Trends’ 2020» (Мюнхен, Німеччина, 2020); 6th International scientific and practical conference (Japan, 2021); Міжн. Конф. «Нафтогазова енергетика-21» (Івано-Франківськ, 2021), European Conf. Fracture, ECF-23, (Madeira, Spain, 2022); Int. Conf. “Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials” (Lviv, 2022); 3rd Int. Sci. and Pract. Internet Conference (Dnipro, 2022); ХСІІ Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (Одеса, 2022); VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Дрогобич, 2022); 24th Annual Conference YUCOMAT – 2023 (Herceg Novi, 2023); XVI Int. Young Scientists Conf. on Materials Sci. and Surface Engineering (Lviv, 2023); VII Int. Conf. “In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction” (2023, Ternopil).

Робота у повному обсязі доповідалася та обговорювалася на розширеному семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та науковому семінарі кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 21 наукову публікацію, з них 2 статті у наукових фахових виданнях України, в т. ч 2 статті, у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб та 5 у періодичних наукових фахових виданнях проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection, з них 3 публікації у журналах з квартилем Q3, 1 патент на корисну модель та 13 тез виступів на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 81 найменування, та 2 додатків. Обсяг основного тексту становить 163 сторінок. Загальний обсяг роботи становить 180 сторінок та включає 93 рисунки і 14 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАСОСНИХ ШТАНГ

1.1 Штангова установка та особливості роботи насосних штанг у глибоких свердловинах

В Україні та й у світі видобування нафти із застосуванням штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) одна з найпоширеніших [1–5]. Близько 60 % наявного фонду свердловин використовують ШСНУ. Вони складаються з приводу, колони насосних штанг (КНШ), насосно-компресорних труб (НКТ), гирлового устаткування, свердловинного насоса й допоміжного підземного устаткування (рис.1.1).

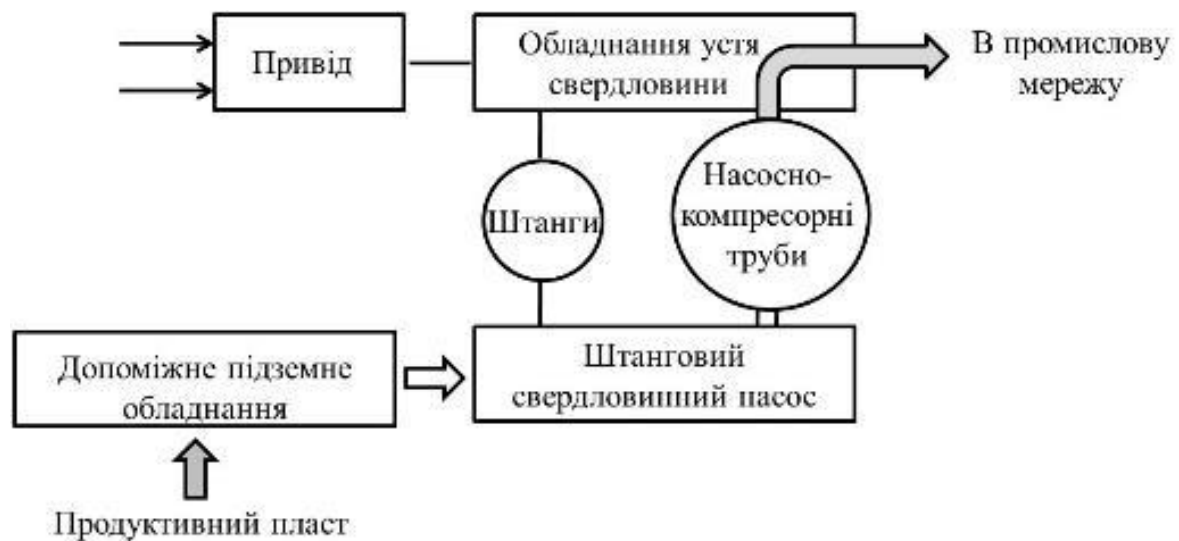


Рисунок 1.1 – Блок-схема штангової свердловинної насосної установки

Для видобування нафти насос опускають у свердловину і через привод, розташований на поверхні, запускають його. Привод перетворює енергію двигуна в механічну роботу з поступального руху КНШ як довгомірної стрижневої системи, складеною з окремих штанг, з'єднаних між собою різьбовими з'єднаннями. Через КНШ енергія привода передається

свердловинному насосу (зазвичай, плунжерний), який перетворює механічну енергію плунжера та рухомих штанг у потенціальну енергію пластової рідини, яку відкачують по колоні з НКТ. Різні варіанти використання свердловинних насосів показано на рисунку 1.2 [6]. Гирлове устаткування герметизує внутрішню порожнину колони НКТ, фіксує її верхню частину та з'єднання з нафтопромисловим колектором. Оптимальний вибір матеріалів для окремих елементів визначає надійність експлуатації устаткування в цілому [7–10].

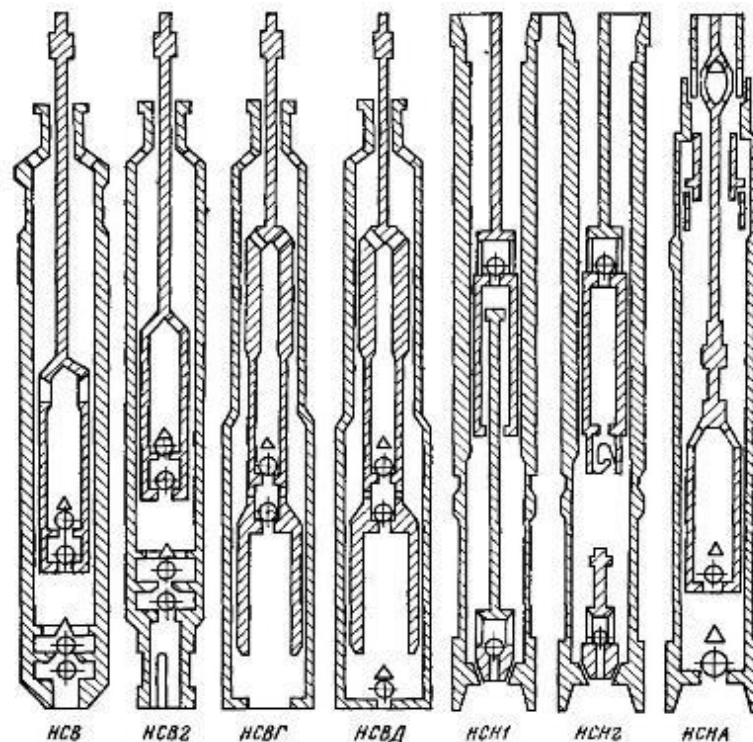


Рисунок 1.2 – Принципові схеми типових свердловинних насосів [6]

Експлуатація НШ відбувається в корозійних середовищах (технологічні рідини, пластові рідини, ґрунтові води, атмосферні впливи, тощо). До найактивніших з них відносять пластові мінералізовані рідини, в яких розчинені солі, нафта, гази, поверхнево-активні речовини тощо [11]. Хімічна активність пластових вод, яка залежить від ступеню їх мінералізації, істотно впливає на руйнування насосних штанг. За ступенем їх мінералізації виділяють: розсоли ($Q > 50$ г/л); солоні ($10 < Q < 50$ г/л); солонуваті ($1 < Q < 10$ г/л); прісні ($Q \leq 1$ г/л) [12]. Мінералізація цих вод зростає із збільшенням глибини залягання пластів.

Залежно від нафтових родовищ вона змінюється від прісної води з невисоким вмістом солей (до 200 г/м³) до концентрованого розсолу (з 300 кг/м³). У пластовій воді виявляють аніони (ОН⁻; Cl⁻; SO₄²⁻; CO₃²⁻; HCO₃⁻) та катіони (Н⁺; К⁺; Na⁺; NH₄⁺; Mg₂⁺; Ca₂⁺; Fe₃⁺), іони мікроелементів (I та Br), колоїдні частинки (SiO₂; Fe₂O₃; Al₂O₃), нафтові кислоти та їх солі. Переважають у пластовій воді хлористі солі (їх вміст досягає 80–90%). За вмістом катіонів солей пластові води розташовуються по наростаючій у ряду: Na⁺; Ca₂⁺; Mg₂⁺; К⁺; Fe₃⁺. На розчинність солей у пластовій воді впливають температура та парціальний тиск CO₂. Вміст компонентів у складі нафти наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вміст компонентів у складі нафти трьох родовищ, мас. % [11].

Компонент / родовище	1	2	3
Вода	44,2	0,4	0,01
Смоли селікагелеві	15,0	15,6	4,2
Асфальтени	0,21	0,23	–
Сірка	0,121	0,124	0,081
Парафін	2,0	0,8	6,65
Механічні домішки	0,158	0,0076	0,026

Під час експлуатації НШ зазнають сумісного впливу механічних навантажень та корозійного середовища, що спричиняє їх корозійно-втомне руйнування [13]. КНШ зазнають впливу ударних, статичних, вібраційних, динамічних, інерційних навантажень, що створює сприятливі передумови для виникнення в них пошкоджень [14 – 22]. Під час руху балансира догори на КНШ діють навантаження від власної ваги НШ, ваги рідини, сил тертя штанг з НКТ, сил тертя плунжера, гідравлічні сили тертя, сили інерції. Під час переміщення балансира донизу навантаження на КНШ знижується через зменшення ваги рідини над плунжером насоса за одночасного зменшення сил тертя та інерції. Якщо сили тертя плунжера в циліндрі насоса та гідравлічних опор в нагнітальних клапанах будуть значними, то у нижній частині КНШ виникатимуть напруження

стиску. Це сприятиме повздовжньому згину НШ над насосом у межах внутрішнього діаметра НКТ і може призвести до їх контактування та зношування, а в подальшому і до руйнування колони та труб [23]. Штанги можуть також вигинатися через заклинювання плунжера насоса під час руху донизу (рис. 1.3), ударів плунжера по рідині (через неповне заповнення циліндра), викривлення свердловини та використання штанг меншого діаметру в НКТ значно більшого діаметра.

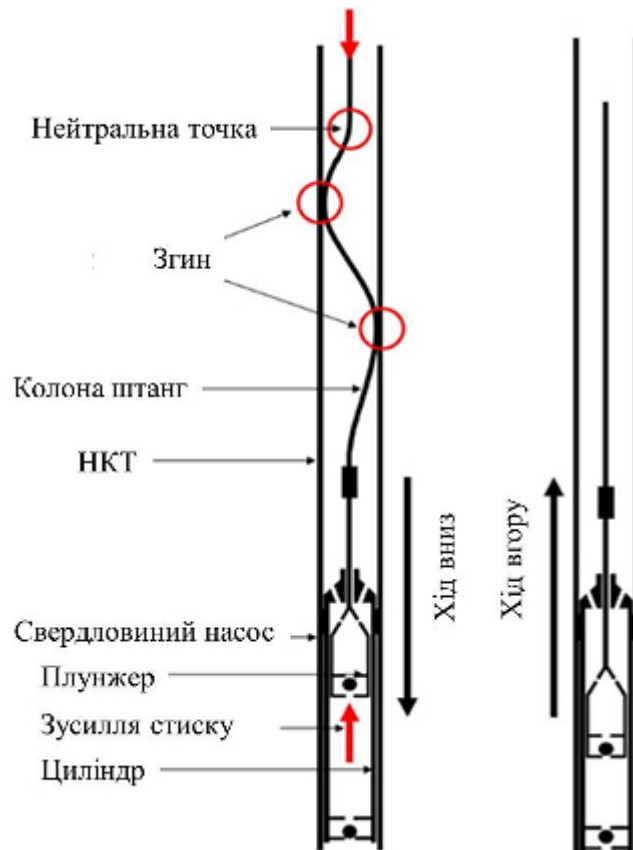


Рисунок 1.3 – Ілюстрація причин втрати стійкості колони насосних штанг під час її переміщення донизу [23]

Аналіз причин експлуатаційних пошкоджень показав, що суцільні сталеві КШ руйнуються в муфтових різьбових з'єднаннях або по їх тілу. Загалом кількість пошкоджень у з'єднаннях становить 30 % від загальної кількості обірваних штанг, причому 80 % з них пов'язують з утомою металу [24, 25]. Циклічні навантаження часом навіть перевищують границю міцності матеріалу (наприклад, під час заклинювання плунжера насоса). Найчастіше НШ

обриваються на віддалі 250–350 мм від головки (в місці з максимальною концентрацією напружень через зміну профілю штанги чи момент згину, спричинений порушенням суцільності тіла з головкою). Експлуатація в корозивному середовищі додатково знижує довговічність НШ. Тому у свердловини, де є передумови для корозії та відкладення солей, додають інгібітори [26]. КНШ звикло руйнуються через втомне руйнування її елементів, зокрема штанги та муфт, різьби та зарізьбових канавок ніпеля тощо [24, 25, 27]. Утомні пошкодження в муфтах НШ зумовлені високою концентрацією напружень в останній робочій впадині їх різьби, зношуванням та порушенням правил експлуатації. Тоді як руйнування ніпелів НШ спричинені високою концентрацією напружень у перших витках їх різьби і у зарізьбовій канавці.

Крутні моменти, що виникають під час роботи насосної установки, можуть сприяти саморозкручуванню різьбових з'єднань в КНШ. Іншу причину руйнувань пов'язують з недотягуванням з'єднань (через відсутність контролю моменту скручування під час монтажу КНШ), що приводить до самостійного розкручування НШ під час експлуатації, а за їх перетягування – до руйнування або зменшення рівня навантажень, які це з'єднання зможе утримати [11].

Під час експлуатації НШ в НКТ і штанги, і труби зношуються через викривлення свердловини та згинання штанг під час їх руху донизу. Вигинання колони НКТ за подвійного ходу (через ефект Лубінського) теж негативно впливає. На вертикальній ділянці тертя між ними немає, але з відхиленням стовбура свердловини від вертикалі на понад 5° та за статичних навантажень понад 50 кН сила тертя між ними перевищує 1 кН [24]. Тому верстати-качалки експлуатують за низької частоти подвійного ходу сальникового штоку ($5\text{--}7 \text{ хв}^{-1}$, що відповідає нижній межі приводу глибинної насосної установки). З підвищенням частоти коливань головки балансира кількість руйнувань штанг, шатунів та сальникових штоків різко зростає. Проте, через прибутковість видобування нафти спонукає експлуатаційників до підвищення цієї частоти.

Аналізу пошкоджень елементів КНШ присвячено багато досліджень. Зокрема створювались математичні моделі типових руйнувань, застосовувались

різні методи діагностики стану свердловинних насосів, колон насосних штанг, їх компонентів, які виникають у польових умовах, та аналізувались шляхи недопущення їх несправності шляхом вдосконалення устаткування та покращення технології видобування [25]. Разом з тим через складні умови експлуатації штанг у свердловинах (особливо в глибоких), щоб забезпечити вищу ефективність видобування нафти, необхідні подальші дослідження сучасних (більш витривалих і корозійностійких) матеріалів.

1.2 Насосні штанги з полімерних композитних матеріалів

Переваги і недоліки композитних насосних штанг. Застосування для виготовлення НШ полімерних композитних матеріалів з вважається одним з найперспективніших шляхів підвищення ресурсу ШСНУ [28]. Їх виготовляють зі скло- та вуглепластиків (рис. 1.5), або з їх поєднанням (гібридні насосні штанги). Під час витоплення склопластикових штанг керуються нормативними документами ГОСТ 31825-2012, API Spec 11B, ГОСТ Р 51161-98, ТУ У 29.5-13741713-002:2006 [29–32].

Недостатня гнучкість, корозійна стійкість, значна вага сталевих НШ ускладнює їх використання для видобутку нафти з надглибоких свердловин. За результатами понад 100 випробувань на втому сталевих НШ їх залишкова міцність становила $\sim(30\dots40)\%$ від початкової, тоді як для композитних НШ вона досягала 90% [33]. Крім того композитні НШ мають менший модуль пружності і за однакових навантажень їх видовження й звуження можуть чотириразово перевищувати властиві сталевим. Тому їх використання у Прикарпатському регіоні зі складними геологічними чинниками (викривлений стовбур свердловин з умовно вертикального у верхніх шарах на спіралеподібний у глибинних) є важливим. Адже КНШ повторює траєкторію свердловини, а тертя між НШ та поверхнею НКТ сприяє їх пошкодженню.

Насосні штанги з ПКМ мають низьку вагу, високу корозійну стійкість, міцність за розтягу та пружність [34, 35]. Їх менша вага полегшує

транспортування та монтаж КНШ, зменшує навантаження на головку балансира верстата-качалки, дає змогу використати електродвигуни меншої потужності, зменшити виробничі витрати та збільшити ресурс обладнання [36].

Епоксидна пултрузія композиційного стрижня. Полімерний стрижень (тіло штанги) виготовляють методом пултрузії (протягування) [37]. Пултрузія – це процес повільного витягування волокна з ванни із смолою, а потім пропускання через підігріту плашку для забезпечення необхідних розмірів. Ця технологія має забезпечити вимоги щодо жорсткості, прямолінійності, опору згину і модуля пружності волокон. Процес протягування часто суміщають з намотуванням отриманих волокон на виріб під певним кутом. При цьому внутрішній шар стержня працює на розтяг, а намотаний з волокон зовнішній шар – на удар та згин. Для виготовлення НШ методом пултрузії використовують однаково орієнтовані волокна зі скла, вуглецю, арамиду. базальтові волокна також вважаються перспективними в Україні (через меншу густину, вищу міцність і значні запаси сировини). Монолітність композиту надає матриця (сполучник), а саме епоксидні, поліефірні, кремнійорганічні чи фенольні смоли, властивості яких наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Фізико-механічні властивості матеріалів сполучників [38]

Параметри		Полі- мерні	Фенолфор- мальдегідні	Епо- ксидні	Кремній- органічні	Полі- амідні
Границя міцності, МПа	розтяг	30–70	40–70	35–100	25–50	90–95
	стиск	80–150	100–125	90–160	60–100	250–280
Модуль пружності, ГПа		2,8–3,8	7–11	2,4–4,2	6,8–10	3,2–5,0
Густина 10^{-3} , кг/м ³		1,2–1,35	1,2–1,3	1,2–1,3	1,35–1,4	1,4–1,43
Теплостійкість, °С		50–80	140–180	130–150	250–280	250–320
Відносне видовження, %		1–5	0,4–0,5	2–9	0,3–0,5	1–2,5
Загальна усадка, %		5–10	15–25	1–5	15–20	3–20

Для виробництва НШ використовують модифіковані епоксидні матриці з високою міцністю за згину та адгезією до волокон, і незначною усадкою. Проте вони в 5 разів дорожчі від поліефірів, що підвищує вартість НШ. Властивості епоксидної матриці нижчі за властивості вуглецевих волокон. Тому для досягнення бажаної міцності вуглепластикові НШ складають з окремих круглих стрижнів певного розміру Таблиця 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики окремих стрижнів для вуглепластикових штанг

Діаметр	3,28 мм
Міцність за розтягу	2620 МПа
Модуль пружності за розтягу	158 МПа
Густина	1350 кг/м ³

Для виготовлення насосних штанг з ПКМ використовують також ровінг ЕС16 1200 (пучок з нескручених скловолоконних ниток, рис. 1.4 *а*), смоли епоксидну ЕД-20 загального призначення (ГОСТ 10587-84), а як затверджувач - ангідрид ізометилтетра-гідрофталевої кислоти та поліетиленполіамін. Характеристики скляного ровінгу наведено на рисунку 1.4 *б*. Як затверджувач для смоли ЕД-20 використовують поширений і дешевий поліетиленполіамін.


	Робочий діапазон температур	-200...+500°C
	Номінальний діаметр волокна	16 мкм
	Тип мастильника	Прямий (вінілсілан)
	Фасовка в бобінах	11 кг
	Лінійна густина	1200 текс (1 текс = 10 ⁻⁶ кг·м ⁻¹)

Рисунок 1.4 – Вигляд скляного ровінгу ЕС16 1200 (*а*) та основні його характеристики (*б*).

Властивості скляних волокон. Неперервні скляні волокна (СВ) формують з розплавленої скломаси. Їх витягують до діаметра 5...20 мкм з наступним швидким охолодженням. Після витягування границя міцності СВ досягає 2000...6000 МПа і залежить від складу скломаси, технології витягування і подальшої обробки. Модуль пружності СВ становить 50...130 ГПа (тоді як для сталі він становить 200 ГПа), а їх густина 2500...2600 кг/м³.

За приблизними оцінками теоретична границя міцності скла становить 14 ГПа, тоді як для скляних стержнів діаметром 1 мм вона у 100 разів менша (140 МПа). Така відмінність зумовлена поверхневими тріщинами, які відчутно знижують міцність високоміцних матеріалів. Починаючи з діаметра 30 мкм границя міцності СВ стрімко зростає і наближається до теоретичної. Отже, застосування тонких СВ для армування матеріалів дає змогу підвищити їх характеристики в'язкості руйнування. Для характеристики СВ використовують такий показник як питома міцність $k_{\sigma} = \sigma_{\text{В}} / \gamma$, де $\sigma_{\text{В}}$ – границя міцності матеріалу, а γ – його питома вага. Питома міцність дорівнює довжині волокна, яке зруйнується під дією власної ваги. Сталевий дріт з ідентичною до СВ міцністю за показником k_{σ} поступається у понад 3 рази.

Властивості вуглецевих волокон. Для виготовлення НШ з ПКМ використовують також вуглецеві волокна (ВВ) з високою міцністю на розрив (до 6200 МПа) та модулем пружності за розтягу (до 827 ГПа) та низькою густиною (1310 кг/м³), що в 6 разів нижча ніж для сталі (рис. 1.5). Діаметр окремих вуглецевих волокон може змінюватися від 4 до 25 мкм, довжина від декількох міліметрів до метрів [40].

Виготовлення ВВ пов'язане з послідовним температурним та механічним впливом на органічні волокна для їх карбонізації, графітізації і вдосконалення структури. Для виробництва ВВ використовують сировину у вигляді хімічних і природних волокон, або волокон, які отримані з лігніну, кам'яновугільної смоли, нафтового пеку, фенольної смоли, циклізованих полібутадієнів та інших речовин [39]. Технологічний процес їх виготовлення пов'язаний з поетапною термообробкою. Спочатку волокна в натягнутому вигляді нагрівають до

температури до 250°C, що формує поперечні хімічні зв'язки між макромолекулами полімеру. Тоді карбонізують за температури 1500°C в середовищі азоту, формуючи його графітоподібну структуру. На завершення ВВ графітизують при 3000 °С, після чого вміст вуглецю у ньому досягає 99 %. Залежно від технології отримання модуль пружності ВВ становитиме 220...700 ГПа, границя міцності 2...3,5 ГПа. Високомодульні ВВ формують під натягом за температури 2700°C.

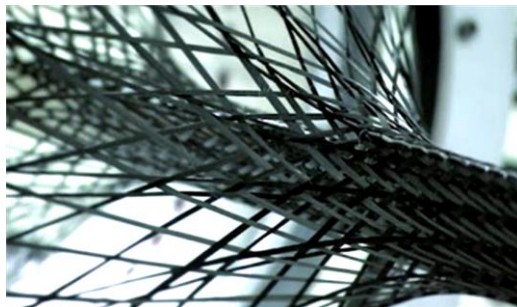


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд плетіння з вуглецевих волокон

Важливими властивостями волокон є їх міцність, жорсткість, густина, хімічна стійкість та стійкість до пошкоджень, корозії, зношування та опір втомі [40, 41],. На початковому етапі виготовлення НШ використовували ВВ з границею міцності 400 МПа і модулем пружності 1600 ГПа. Густина цих ВВ близька до 1310 кг/м³ (порівняно з 7850 кг/м³ для сталі). З урахуванням динамічних навантажень НШ співвідношення міцності і ваги ВВ часто у 15 разів перевищувало властиве сталі. Зносостійкість вуглецевих волокон залежить від їх орієнтації, модуля Юнга та опору внутрішньому зсуву. Питома швидкість зношування однаково орієнтованих ВВ на 2 порядки нижча, ніж для сталі в контакті зі сталлю, чи зі склопластику. Композит з цих волокон з епоксидною смолою відносять до хімічно найстійкіших конструкційних матеріалів. Адже його хімічна інертність вища ніж скловолокон, тому його використовують на заводах з виготовлення кислот. За циклічного навантаження матеріалу з однаково орієнтованих ВВ, навантаженого до 90% від його початкової границі міцності за розтягу, руйнування не відбулося навіть після 10⁹ циклів

навантаження. Високий опір втомі пояснили однаковою орієнтацією ВВ в тілі штанги, за якої руйнування одного з волокон не призводить до зосередження навантаження на сусідньому з ним. Тоді як у сталевих НШ поява мікротріщини створює концентрацію напружень, яка сприяє її поширенню у кожному подальшому циклі навантаження аж до остаточного руйнування. У таблиці 1.4 наведено основні функціональні властивості волокон, які використовують для виготовлення НШ.

Таблиця 1.4. Порівняння за властивостями різних волокон, які використовують для армування композитних матеріалів [38]

Параметри	Вуглецеві		Борні	Органічні	Скляні
	Високо-модульні	Високо-коміцні			
Модуль пружності, ГПа	400	260	400	120	210
Густина 10^{-3} , кг/м ³	1,95	1,76	2,5	1,45	7,8
Границя міцності на розтяг, ГПа	2,1	3,3	3,5	2,8	2,9
Питома жорсткість, 10^{-6} , м	20,3	14,7	16	8,3	2,7
Питома міцність, 10^{-6} , м	108	187	140	193	37

КНШ з термореактивних СВ обмежені низьким модулем пружності при розтягу порівняно зі сталлю, високою вартістю та низькою ударною в'язкістю. Металеві муфти також є дорогим елементом для стрижнів із термореактивних композитів. Композитні термореактивні НШ з ВВ мають модуль пружності сумірний зі сталлю, але їх можливості обмежені через їх високу вартість. Підйом штанг ускладнений при розробці складних свердловин з глибокими вертикальними та довгими горизонтальними ділянками, де видобуток зазвичай характеризується високими співвідношеннями газу і рідини [42].

Отже, висока питома міцність та корозійна стійкість склопластикових, вуглепластикових чи гібридних НШ робить їх перспективними для використання у нафтовидобувній галузі. Проте для обґрунтування їх придатності

необхідно проаналізувати їх втомні характеристики за напружень згину, що неминуче виникатимуть при глибинному бурінні.

1.3 Відомі методи контролю за виникненням пошкоджень у полімерних композитних матеріалах та прогнозування ресурсу штанг

Виготовлення НШ для видобування нафти з ПКМ (рис.1.6) спричинило ряд проблем, пов'язаних з технологією їх виготовлення і нестабільністю їх характеристик міцності [38, 42–45]. Під час видобутку нафти НШ часто руйнуються, що спричиняє значні збитки та витрати на розблокування свердловини та ремонт устаткування. Вирішення цих проблем неможливе без оцінювання поточного технічного стану та контролю міцності НШ.



Рисунок 1.6 – Насосні штанги з склопластиковими стержнями та металевими головками [45].

Ультразвуковий, термографічний та вібраційний методи використано для контролю трьох композитних елементів з армованого скловолокном пластику, гібридного композиту із серцевиною з того ж матеріалу, облицьованого алюмінієвим сплавом, та з вуглепластику [46]. Проте ці методи виявились не придатними для онлайн-тестування НШ з ВВ та за наявності нерівномірних поверхонь розділу між різними композитними шарами. Для поточного контролю таких компонентів використовують лазерний ультразвуковий метод [47]. До аналізу ледь помітних дефектів від удару в пултрузійній квазіізотропній

композитній пластині, армованій полімерними СВ, та в композитних ламінатах, армованих ВВ з епоксидною зв'язкою, застосовано ультразвуковий метод [48, 49]. Проте ці методи теж не придатні для ПКМ з криволінійними межами розділу [50, 51]. Щоб відрізнити відлуння дефектів від структурного шуму під час ультразвукового контролю ПКМ введено часозалежний поріг [52]. Для класифікації дефектів у полімері, армованому ВВ, використано модель машинного навчання на основі нейронної мережі, а для виділення ознак пошкодженості – метод вейвлет-пакетів [53-55].

Проте для контролю пошкоджень, що виникають у КППМ внаслідок втоми найчастіше використовують метод акустичної емісії (АЕ) [46, 56–59]. Для діагностики міцності НШ їх відтинки випробовували чотириточковим згином за переміщення рухомої опори машини ИР5057-50 з швидкістю 5 мм/хв [45]. Під час випроб записували акустограми зміни амплітуди і інтенсивності сигналів АЕ в часі їх навантаження (рис. 1.7). На початковому етапі навантаження амплітуда сигналів АЕ становила 1200–1800 мкВ і не змінювались аж до відхилення діаграми деформування зразка від лінійності за навантаження $(0,7 \div 0,8) P_{\max}$. При цьому їх амплітуда починала зростати, досягаючи рівня 6000 мкВ, а інтенсивність – переходила через екстремум при 50–60 імп/с. На основі амплітудної селекції сигналів АЕ склопластикової штанги підтвердили придатність параметрів АЕ для контролю її міцності.

Низька амплітуда сигналів АЕ зумовлена з текучістю і розтріскуванням сполучної компоненти та з пошкодженнями її меж розділу із скловолокнами [60]. Зі збільшенням навантаження і прогину зразків запас міцності епоксидної матриці вичерпується і створюються передумови для руйнування скловолокон, що супроводжується появою високоамплітудних сигналів АЕ. Ці сигнали зумовлені вивільненням пружної енергії під час розриву волокон [61]. Кількість сигналів АЕ зростає зі збільшенням кількості зруйнованих волокон і матриці, яка розтріскується з формуванням магістральної тріщини.

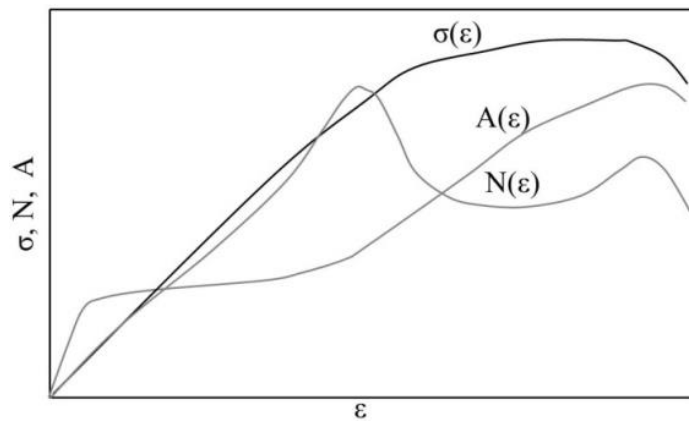


Рисунок 1.7 – Залежності амплітуди (A) та інтенсивності (N) сигналів АЕ, а також напружень (σ) від деформації (ϵ) склопластикових штанг

Метод АЕ використовують також для виявлення втомних пошкоджень в гібридних стрижнях. За руйнування армованих композитів вивільняється енергія і виникає пружна хвиля [62]. Найважливішими параметрами АЕ для такого типу сигналів є кількість, амплітуда, тривалість і абсолютна вивільнена енергія [63]. Так на початковому етапі втомних випробувань зразків з ПКМ за фіксованого рівня максимального навантаження ($70\% \sigma_B$) за високої асиметрії ($R = 0,50; 0,68; 0,85$) (рис. 1.8) форма стрижнів майже не змінювалася, і жодних сигналів АЕ не фіксували.



Рисунок 1.8 – Пошкодження, яке ініціює тріщини в оболонці склопластика біля штанги / в зоні захоплення вздовж поверхні склопластик/вуглепластик [62]

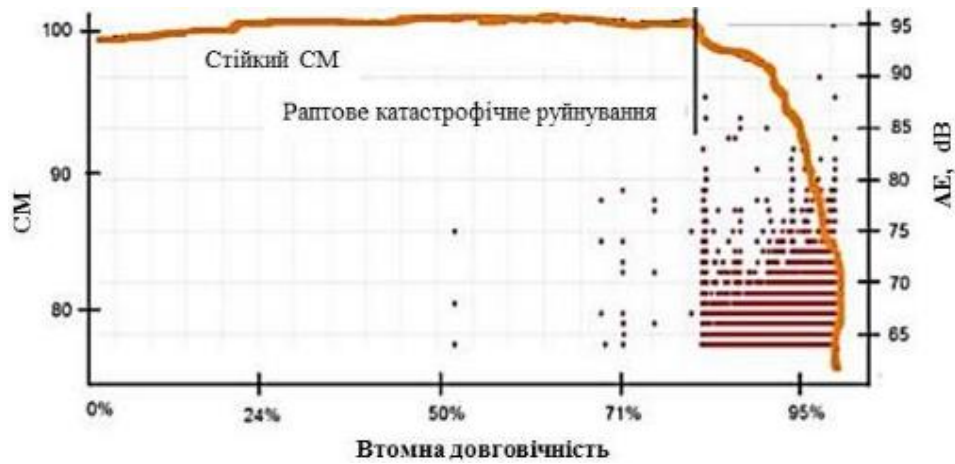
Значні руйнування стрижнів відбувалися після втрати їх початкової форми (рис. 1.9 б, в). Зокрема, через незначні переміщення між ПКМ та цангами

(за правило сталевими затискачами) внаслідок фретинг-втоми (за $R = 0,68$ і $0,85$) на поверхні склопластикової оболонки зароджувалися радіально орієнтовані тріщини, які поширювалися крізь склопластикову оболонку до межі з вуглепластиком за механізмом втоми, чим сприяла зародженню поздовжніх тріщин (рис. 1.8). Багаторазові низькоамплітудні сигнали АЕ (60–70 дБ) зумовлені фретинг-втомою на етапі стійкої міцності (рис. 1.9). Ці сигнали частішали зі збільшенням кількості циклів навантаження. Тріщини фретинг-втоми ініціюють появу у поверхневому шарі склопластику поздовжніх розшарувань, з яких на пізніх етапах випробувань формувалися відокремлені пучки зі скляних волокон у вигляді так званої «пташиної клітки». Зростання амплітуди сигналів АЕ (до 80–95 дБ), пов'язане з розшаруваннями в склопластиковій оболонці (рис. 1.9 б, в).

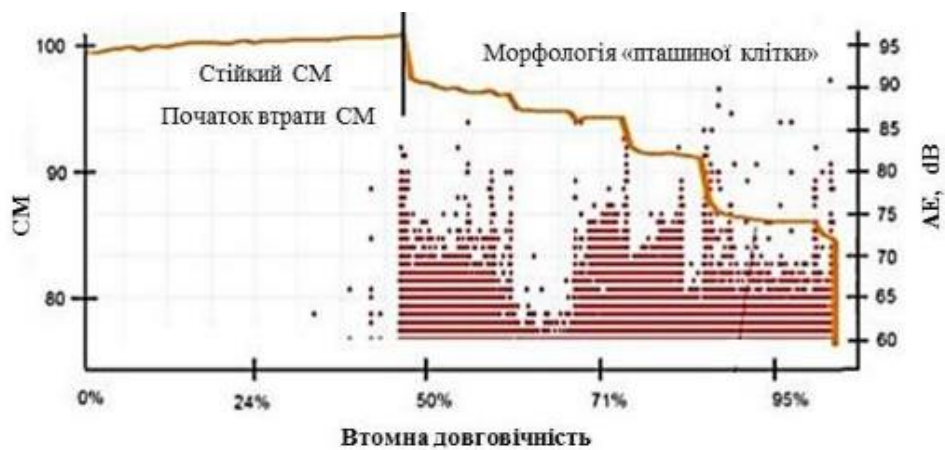
Опір втомі односпрямованих волокон у композитах залежить від таких поздовжніх розшарувань, які перерозподіляють напруження безпосередньо на волокна [63]. Цілісність скловолокон вважається найважливішим чинником, що обмежує втомну довговічність склопластикового композитного матеріалу [64]. Високоамплітудні циклічні навантаження сприяють їх пошкодженню через контакти між волокнами [62]. Такі поверхневі пошкодження гібридного композиту призводять до перерозподілу напружень і до відмови вуглецевого осердя. Збільшення кількості поздовжніх тріщин (уздовж межі розділу склопластик / вуглепластик) спричиняло втрату 10–20% його робочого перерізу вже після $\sim 70\%$ ресурсу (рис. 1.9 б, в). Ці тріщини спричиняли повне відокремлення склопластикової оболонки від вуглепластикового осердя, що зумовило катастрофічне руйнування зразка через його найнижчий робочий переріз. Після досягнення ефекту «пташиної клітки», переріз не змінювався аж до остаточної відмови, і ніякі піки сигналів АЕ не виокремлювалися, поки осердя не руйнувалося остаточно, що супроводжувалось завершальним піком АЕ з амплітудою близькою до 95 дБ.

Контроль росту тріщин у смугах зі скловолоконного-поліестеру, армованого дротами зі сплаву з пам'яттю форми (СПФ) [65]. Контроль

здійснювали за зміною опору дроту СПФ під час деформування. Ці дослідження можуть бути корисними для розроблення засобів контролю поширення тріщин у скловолоконних і поліефірних чи епоксидних ламінатах.



а



б



в

Рисунок 1.9 – Стійкість матеріалу (СМ) та амплітуда сигналів АЕ на різних етапах втомної довговічності за максимального рівня напружень ($70\% \sigma_B$) і трьох значеннях коефіцієнта асиметрії $R = 0,50$ (а), $0,68$ (б) та $0,85$ (в).

Для визначення роботоздатності склопластикових НШ за дії навантажень згину використано методику натурних випробувань на втому [66]. Зразки циклічно навантажували консольним згином у корозійному середовищі і будували криву втоми (залежності числа циклів навантаження до руйнування від величини циклічних напружень). Зокрема, дослідження зародження тріщин при 5 рівнях напружень згину показали [45], що за напружень понад 90 МПа зразки склопластикової НШ ламалися біля сталевої головки (рис. 1.10а). Отже такі НШ не витримують високих напружень згину. За напружень нижчих 80 МПа зразки не руйнувалися, проте в них виявили численні втомні тріщини, розподіл за довжинами яких в залежності від рівня напружень за консольного згину НШ показано на рис. 1.10б.

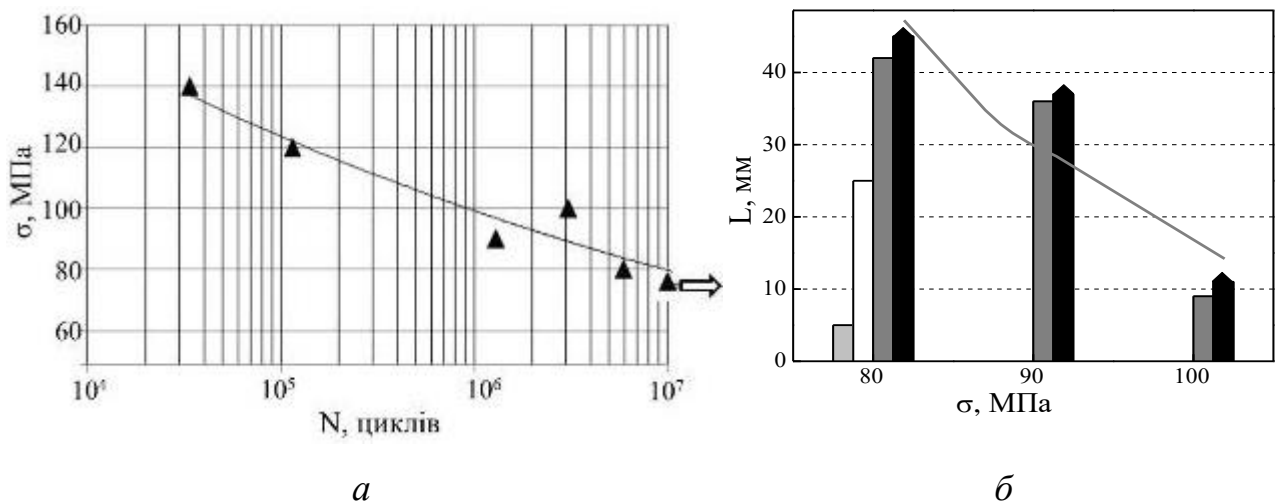


Рисунок 1.10 – Діаграма втомної довговічності $\sigma - N$ (а) та розподіл тріщин за довжиною L , залежно від рівня напружень σ (б) за циклічного консольного згину склопластикових насосних штанг.

На основі проведеного аналізу відомих досліджень прийшли до висновку, що закономірності зародження та росту втомних тріщин в гібридних штангах до сьогодні ще недостатньо вивчені та вивчення механізмів їх руйнування все ще не завершене.

1.4 Аналіз відомих конструкційних рішень для забезпечення з'єднання сталевих головок з тілом насосних штанг з ПКМ

Композитні НШ виготовляються методом пултрузії з матриці із ПКМ з порівняно високими в ряду інших композитів механічними властивостями. Їх широко застосовують у морській та нафтовій промисловості через малу густину, відносно низьку вартість та високу стійкість до корозійних впливів. Проте в нижній частині колони композитні НШ доповнюють сталевими, які виконують роль механізму натягування всієї системи. Корозійна втома сталеві частини колони не викликає занепокоєння, оскільки найбільше навантажені неметалеві стрижні верхньої частини колони. Щодо схильності сталевих головок композитних НШ до корозії, то їх більший ніж полімерних стрижнів переріз не загрожує їх швидким утомним руйнуванням від неглибоких виразок.

Інші переваги КНШ: за поєднання зі сталевими штангами (для обважнення) забезпечують довший хід плунжера під час перекачування, ніж жорсткіші сталеві штанги; скорочують час простою; мають високу довговічність; зменшують кількість покинутих нафтових свердловин; знижують пікові навантаження на полірований шток; уможливають регулювання модуля пружності склопластика зміною співвідношення смоли у композиті. Заміна сталевих штанг на композитні може суттєво зменшити кількість покинутих свердловин та збільшити видобуток сирої нафти.

Попри ґрунтовні дослідження втомної довговічності сталевих НШ, подібні дослідження композитних НШ поки що досить обмежені. Проте втомне руйнування стрижнів НШ через їх постійне навантаження і розвантаження внаслідок руху догори і донизу під час видобування нафти – це один із значних недоліків композитних НШ, який передбачає серйозний аналіз експлуатаційних відмов, щоб з'ясувати причини їх виникнення. Поздовжня орієнтація волокон в пултрузійних стрижнях НШ визначає значно вищу їх поздовжню міцність, ніж поперечну, яку визначає міцність матриці. Через таку анізотропію властивостей стрижня з ПКМ його дуже важко щільно і надійно затиснути у металевій головці,

щоб запобігти їх проковзуванню. Тому розроблення нових та удосконалення відомих конструктивних рішень сталевій головці під ці вимоги все ще залишається актуальним завданням для видобувної галузі.

Кріплення вуглепластикового стрижня до сталевій головці штанги. НШ складається з круглого однонапрявленого вуглепластикового стрижня 2 зі сталевими головками 1 на обох його кінцях (рис. 1.11). Різьба на кінцях сталевих головок НШ дає можливість послідовно з'єднати їх між собою сталевими муфтами. В основному НШ виготовляють діаметром 16, 19, 22, 25, 32, 38 мм та довжиною 8 і 11,5 м. Довжину колони і точність посадки плунжера свердловинного насоса регулюють, використовуючи коротші НШ довжиною 1; 1,2; 1,5; 2 і 3 м.

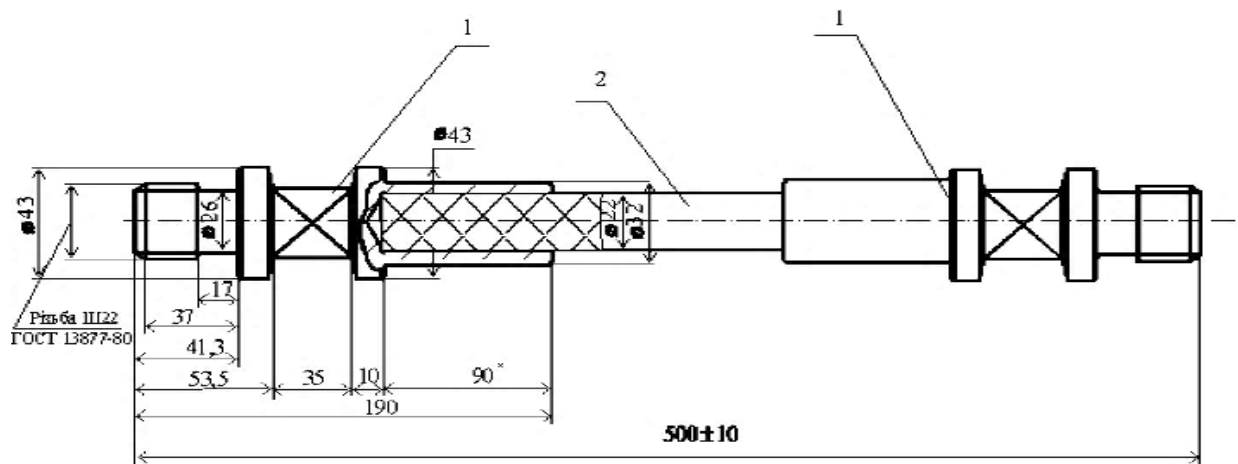


Рисунок 1.11 – Зразок для випробувань насосної штанги з ПКМ.

За формою сталеві головки 1 НШ з ПКМ подібні до вживаних для сталевих штанг (рис. 1.11). Внутрішнє гніздо в ній служить для кріплення полімерного стрижня 2. Зовнішня геометрія головок однакова для всіх НШ з ПКМ, а внутрішній отвір в них залежить від способу з'єднання стрижня з головкою. Використовують клейове з'єднання та обтискання тиском у сталевій обоймі. Для фіксації вуглепластикових стрижнів в сталевих головках використовують ефект розклинення конусу з епоксидної смоли. Навантаження штанги розтягом перерозподіляє навантаження на поверхні клинового з'єднання і підсилює опір дії силам зсуву вздовж нього.

Згідно специфікації Американського інституту нафти (American Petroleum Institute – API) так звані «векторні штанги», принципова конструкція яких показана на рисунку 1.12, виготовляють чотирьох типорозмірів. Їх довжина становить 19; 22; 25 та 31,8 м, а діаметр за коефіцієнта заповнення тіла штанги 85% – 13; 15,5; 19,5 і 21,7 мм відповідно. Основні механічні та технічні характеристики наведено в таблицях 1.5 – 1.6. Основні відмінності між «векторною штангою» та іншими наявними технологічними рішеннями наведено в таблиці 1.7.

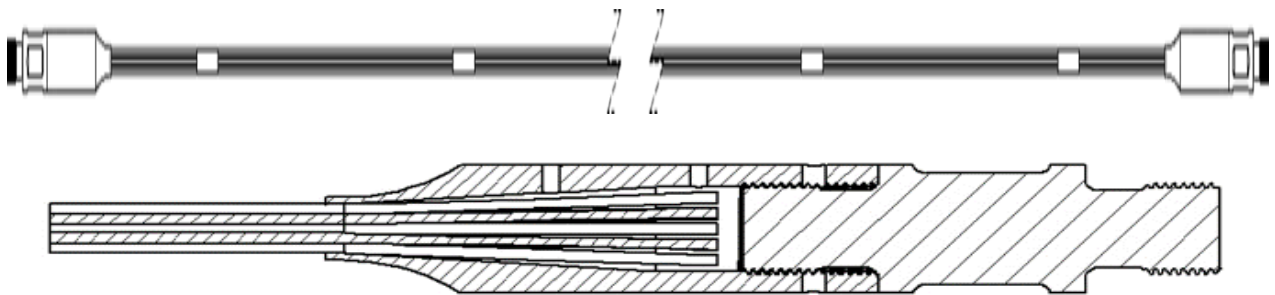


Рисунок 1.12 – Конструкція з'єднання тіла штанги зі сталевую головкою

Таблиця 1.5 – Механічні властивості вуглепластикових насосних штанг Американського інституту нафти

Границя міцності за розтягу	2000 МПа
Допустима міцність за розтягу	1600 МПа
Модуль пружності	160,6 ГПа

Таблиця 1.6 – Технічні властивості вуглепластикових насосних штанг чотирьох типорозмірів Американського інституту нафти

Константа пружності, м/Н·м	$5,25 \times 10^{-9}$	$3,87 \times 10^{-9}$	$2,45 \times 10^{-9}$	$1,99 \times 10^{-9}$
Робоче навантаження, кН	118,1	123,4	135,4	231,3
Пробне навантаження, кН	130,1	135,9	149,2	254,4
Обмежене навантаження, кН	189,1	256,6	340,5	473,7
Основне навантаження, кН	236,7	321,0	471,5	625,2

Таблиця 1.7 – Порівняння характеристик різних типів насосних штанг

Параметри	Вуглепластик	Скловолокно	Сталь групи API
Діаметр штанги, мм	19,0	25,0	25,4
Границя міцності σ_B , МПа	2000	620	792
Модуль пружності, МПа	$1,6 \times 10^5$	$0,5 \times 10^5$	$2,1 \times 10^5$
Константа пружності, мм/Н·м	$2,454 \times 10^{-9}$	$4,146 \times 10^{-9}$	$0,988 \times 10^{-9}$
Максимальне робоче навантаження, кН	135	133	122
Граничне навантаження (прихоплений плунжер), кН	340	177600	279
Максимальне навантаження, кН	471	301	400932
Вага (штанга і одна муфта), Н	97	136	483

Технічні умови на штанги з ПКМ стандартизовані в стандартах Американського інституту нафти, та стандартах і ТУ чинних в Україні. Конструкція скло- чи вуглепластикової НШ містить зазвичай два елементи: стрижень та сталеву головку з різьбою частиною для з'єднання із насосною муфтою (рис. 1.13).

В роботах [25, 37, 62] розглянуто проблеми технології отримання виробів з ПКМ, обумовлені особливістю взаємодії волоконних наповнювачів та полімерної матриці. Вивчено питання впливу технологічних вимог та певного ступеня армування для забезпечення міцності композиту. Ступінь армування впливає на величину концентрації напружень та здатність експлуатуватися при певній робочій температурі.



Рисунок 1.13 – Загальний вигляд насосної штанги. 1 – стрижень із склопластика чи вуглепластика; 2 – сталеві головки із різьбою (ніпелі).

Відомі три варіанти конструктивного рішення для з'єднання склопластику з металом, а саме:

- ✓ з'єднання «обхоплювального» типу, коли склопластиковий стрижень входить в порожнину всередині сталевій головки і жорстко з'єднується з нею;
- ✓ з'єднання «обмотувального» типу, коли елемент сталевий наконечника вклеюють або втілюють всередину склопластикового стрижня;
- ✓ з'єднання комбінованого типу, що поєднують елементи і обмотувального, і обхоплювального варіантів з'єднання. Такі з'єднання найдоцільніше використовувати у високонавантажених вузлах ШСНУ.

Конструкції склопластикових насосних штанг відомі ще з 1988 року. (зокрема, патент США №4360288). Це типові клеєві з'єднання вуглепластикової штанги із металевий головою, яким властиві певні недоліки. Міцність з'єднання визначається зчепленням сталевий елемента з гладкою поверхнею вуглепластиковий стержня, яка визначається адгезивною міцністю з'єднання клею з кожним із елементів і міцністю самого прошарку клею. Відомо, що для отримання міцних та надійних клейових з'єднань, обумовлених тільки силами адгезії, слід дотримуватись низки обов'язкових вимог. Зокрема з'єднувані поверхні повинні бути ретельно очищені від жирових забруднень, мати визначену шорсткість та повинні бути дотримані умови зберігання елементів із підготовленими до склеювання поверхнями від моменту їх готовності до початку процесу склеювання. Недотримання вказаних вимог знижує міцність та надійність отримуваних з'єднань і, як наслідок, міцність та надійність всієї конструкції під час її експлуатації.

Для з'єднання скло- чи вуглепластикових стрижнів НШ з металевими головками поєднують клейовий і механічний варіанти їх сполучення, що забезпечує високу адгезивну міцність та надійність такого кріплення. Це досягається оптимізацією конструкції насосної штанги, до складу якої входить циліндричний стрижень із високоміцного ПКМ, ніпелі з обох країв стрижня, які мають з'єднувальну частину із різьбовим елементом та установочну частину із внутрішньою порожниною для розміщення стержня з донною конічною зоною і

вхідним отвором, та адгезив, що заповнює простір між внутрішньою порожниною установочної частини ніпеля і поверхнею стрижня із високоміцного ПКМ. При цьому зовнішній поверхні стрижня, розташований у зоні внутрішньої порожнини установочної частини ніпеля, надають геометрію зі змінним профілем. Висота змінного профілю зростає у напрямку від вхідного отвору ніпеля до його дна. При цьому змінний профіль може бути виконаний у виді гвинта, або у вигляді кільцевих радіально орієнтованих канавок. Внутрішня поверхня порожнини установочної частини ніпеля може бути циліндричною, або у вигляді послідовно розташованих циліндричних і конічних зон, що чергуються одна з одною. Як ПКМ використовують склопластик, вуглепластик або базальтопластик. Окрім того, до такого з'єднання висувають найслабші вимоги до стану з'єднаних поверхонь, а також не передбачається їх додаткова підготовка, яка необхідною передумовою для клейових з'єднань. Це не тільки зменшує вплив клейового з'єднання на міцність та надійність НШ в цілому під час їх експлуатації, але і дає змогу суттєво спростити операцію сполучення стрижня з ніпелями. У заявленому технічному рішенні висота періодичного профілю є різною по довжині стрижня та збільшується у напрямку від вхідного отвору ніпеля до його дна. Це вирівнює навантаження на витки змінного профілю, що підвищує динамічну міцність з'єднання стрижня і ніпелів. Кут та крок змінного профілю розраховують для кожної типу НШ залежно від механічних характеристик стрижня із високоміцного ПКМ та використаного для з'єднання елементів адгезиву. Вузол кріплення стрижня до ніпеля в розрізі показано на рис. 1.14. Стінки внутрішньої порожнини установочної частини ніпеля можуть бути у вигляді конічних (рис. 1.14 *a*), або циліндричних (рис. 1.14*б*) ділянок. Внутрішній діаметр установочної частини ніпеля більший зовнішнього діаметра стрижня. Порожнину в установочній частині ніпеля заповнюють адгезивом. Слід також зауважити, що виконання установочної частини ніпеля у виді циліндра є більш технологічним та помітно спрощує конструкцію насосної штанги. За допомогою різьбового елементу 5 на з'єднувальній частині 4 ніпеля 2, НШ за допомогою муфт з'єднують у КНШ, яка

є складовим елементом штангової глибинно-насосної установки. Кріплення стрижня 1 із високоміцного ПКМ в установочній частині 6 ніпеля здійснюють шляхом розміщення адгезиву 3 між зовнішньою поверхнею стрижня 1 та внутрішньою порожниною 7 в установочній частині ніпеля. При цьому фіксація стрижня в установочній частині ніпеля досягається безпосередньо за рахунок і клейо-механічного з'єднання (тобто завдяки силам адгезії), і механічних сил (завдяки змінному профілю кінців стрижнів).

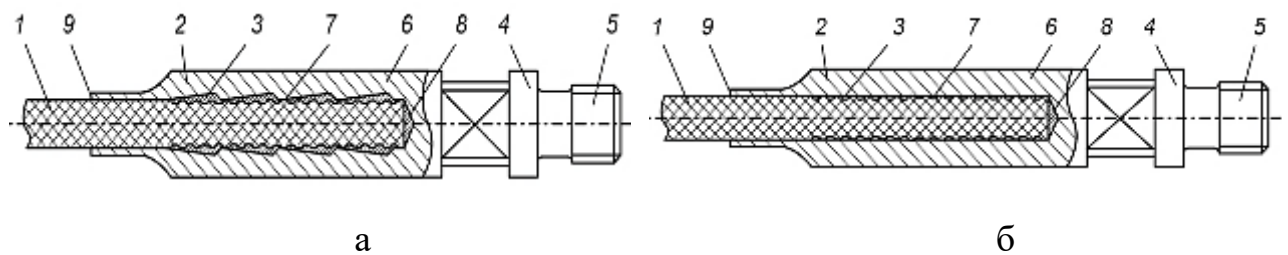


Рисунок 1.14 – Вузол кріплення стрижня до ніпеля. 1 – стрижень із високоміцного композиційного матеріалу; 2 – ніпель; 3 – адгезив; 4 – з'єднувальна частина ніпеля; 5 – різбовий елемент; 6 – установочна частина ніпеля; 7 – внутрішня порожнина в ніпелі; 8 – донна конічна зона порожнини в ніпелі; 9 – вхідний отвір

На бічну поверхню стрижнів із високоміцного ПКМ з обох їх кінців наносять рельєф у вигляді гвинтових або кільцевих радіально орієнтованих канавок (рис. 1.15).

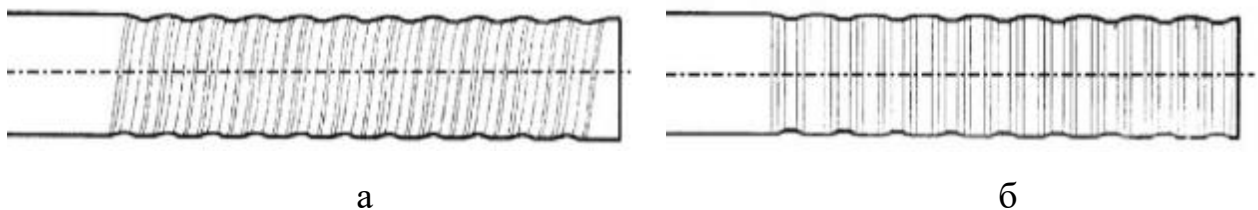


Рисунок 1.15 – Стержень із високоміцного полімерного композиційного матеріалу із змінним профілем у вигляді гвинта (а) та кільцевих радіальних канавок (б)

Інший варіант конструкції вузла кріплення склопластикового стрижня 1 НШ з металевою головкою 2 та розклинювальною деталлю 3 і сполучним адгезивом 4 показаний у розрізі (рис. 1.16).

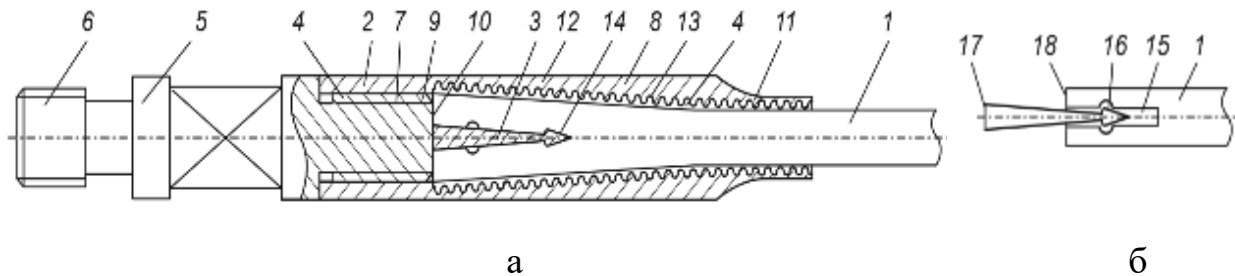


Рисунок 1.16 – Вузол кріплення склопластикового стрижня у металевій головці у зібраному вигляді (а) та фрагмент торця стрижня перед збиранням вузла (б):

1 – склопластиковий стрижень; 2 – металева головка ; 3 – розклинювальна деталь; 4 – адгезив; 5 – з'єднувальна частина головки; 6, 7 – різьбові елементи; 8 – установча частина головки; 9 – різьбовий елемент; 10 – допоміжна порожнина; 11 і 12 – циліндрична вхідна та конічна кільцева ділянка в металевій головці; 13 – різьба; 14 – стрілоподібний клин; 15 – наскрізний проріз у стрижні; 16 – отвір; 17 – основа; 18 – торець стрижня.

Головка 2 має з'єднувальну частину 5 із різьбовими елементами 6 і 7 та установочну частину 8 із різьбовим елементом 9 та допоміжною порожниною 10 із однієї сторони та циліндричною вхідною зоною 11 і конічною кільцевою зоною 12 для розміщення стрижня 1 з іншого боку. Поверхня циліндричної вхідної зони 11 і конічної кільцевої зони 12 виконані із різьбовою обробкою 13. Розклинювальна деталь 3 виконана у вигляді пластини, яка у поперечному перерізі має геометрію конуса із стрілоподібною вершиною 14, причому висота розклинювальної деталі 3 складає $\frac{2}{3}$ висоти конічної кільцевої зони 12 головки НШ 2, а її конусність у 1,15–1,3 рази перевищує конусність останньої. На обох кінцях склопластикового стрижня 1 строго по центру відносно його поздовжньої осі виконані наскрізні прорізи 15 довжиною, що відповідає 0,8–1,0 від висоти розклинювальної деталі 3 і поперечними отворами 16 для встановлення у них

потовщеної частини стрілоподібної вершини 14 розклинювальної деталі 3 (рис. 1.16). Кріплення склопластикового стрижня 1 у головці НШ 2 відбувається наступним чином. Попередньо підготовлений із вставленою у проріз 15 розклинювальною деталлю 3 кінець склопластикового стрижня 1 через циліндричну вхідну зону 11 заводять у конічну кільцеву зону 12 попередньо нагрітої і змащеної адгезивом 4 установочної частини 8 до упору в різьбовому елементі 9. Через допоміжну порожнину 10 із сторони різьбового елемента 9 склопластиковий стрижень 1 розклинюють завдяки деталі 3 до тих пір, токи її основа 17 не зрівняється із торцем 18 склопластикового стрижня 1. Потім через допоміжну порожнину 10 до внутрішньої порожнини установочної частини 8 заливають адгезив 4 зі спеціальним складом аж до його витіснення із зазору між стержнем 1 та циліндричною вхідною зоною 11. Різьбовий елемент 7 з'єднувальної частини 5 головки 2 закручують до упору на різьбовий елемент 9 установочної частини 8. Далі вузол сушать за певних температур та тривалості. Утворюється монолітне з'єднання, яке забезпечує надійне з'єднання склопластикового стрижня 1 із металевою головкою 2, гарантуючи безаварійну роботу склопластикових НШ за робочих і навіть екстремальних навантажень.

Відома також конструкція з'єднання головки насосної штанги з склопластиковим тілом [67]. Завдання її модернізації – підвищити надійність з'єднання, опір втомі сталевих головки і зробити з'єднання роз'ємним, щоб уможливити заміну спрацьованих деталей на нові. Поставлене завдання вирішено шляхом розтискування конічним кінцем гвинта, вкрученого у запресовану в корпус головки гайку, ПКМ в напрямі конусних виточок в отворі наконечника. Форма отвору наконечника і поверхні гвинта утворена кількома конусами. Першу і третю конусну поверхні виготовляють з кутом $\gamma=17^\circ$, а друга і четверта – з кутами α і β близько $2 - 30$. Для ефективнішого затискання волокон стрижня кути конусних розточок в отворі роблять на кілька градусів більшими ніж кути конусних поверхонь гвинта: $\beta = \alpha - 1$. Використання гвинта, який розтискає волокна склопластикового стрижня, підвищує ефективність використання потенціалу склопластику (його високої міцності), оскільки за

такого конструктивного рішення з'єднання забезпечують не тільки поверхневі, а й внутрішні волокна стрижня. Крім того, застосування запресованої в головці гайки, яка направляє стрижень в отвір, дозволяє уникнути нарізання різьби в корпусі головки, що знизило б її опір зародженню втомних тріщин. Крім того, під дією навантажень розтягу стиснутий за допомогою гвинта і гайки кінець ПКМ стрижня забезпечує ще надійніше з'єднання між складовими НШ.

Відоме також з'єднання наконечника НШ і склопластикового стрижня (рис. 1.17). З'єднання складається з склопластикового тіла 1, сталевий головки насосної штанги 2 і гвинта 3, на яких виконані конічні поверхні з кутами α , γ , β а також гайки 4. З'єднання виконується наступним чином. Склопластиковий стрижень НШ 1 на певній довжині позбавляють від зв'язуючого і просочивши зачищений кінець клеєм його вставляють в отвір сталевий головки 2, поверхні якої характеризуються конусністю з невеликими кутами. З протилежного кінця головки, в якому просвердлено отвір невеликого діаметру, вставляють гвинт 3, кінець якого утворює кілька конусних поверхонь з малими кутами. Гвинт закручується до упору в гайку 4 і конусними поверхнями розтискає волокна склопластикового стрижня. Після застигання клею утворюється міцне з'єднання, яке в подальшому, за потреби, можна роз'єднати, відкрутивши гвинт і витягнувши кінець склопластикового стрижня після попереднього його нагрівання.

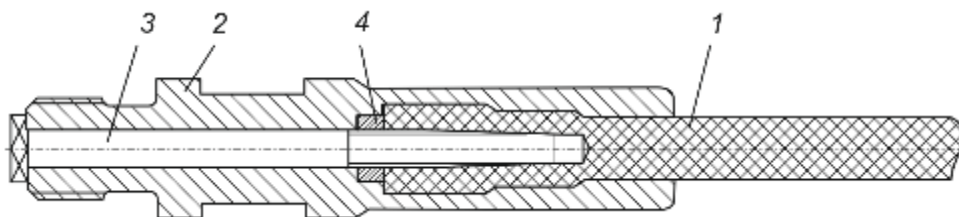


Рисунок 1.17 – З'єднання головки насосної штанги з склопластиковим тілом.

1 – склопластикове тіло; 2 – сталевий наконечник; 3 – гвинт; 4 – гайка

Відоме також з'єднання сталевий головки з НШ з ПКМ [67]. В основу винаходу поставлено завдання створити такий спосіб з'єднання сталевий наконечника зі стрижнем із ПКМ, в якому новий конструктивний зв'язок між

елементами, дозволив би стабілізувати внутрішні напруження в тілі насосної штанги і за рахунок цього підвищити надійність з'єднання тіла штанги зі сталеву головою. Задачу вирішено шляхом зменшення внутрішніх напружень, збільшення площі зрізу, чого досягають завдяки тому, що в сталевій головці НШ і на кінці його ПКМ стрижня нарізали несиметричну різьбову поверхню з круглим профілем для встановлення в ній сталевго витка, який служив з'єднувальним елементом між сталевим наконечником і стрижнем НШ з ПКМ (рис. 1.18). Крім того на торці циліндричного гнізда в сталевій головці формувалася конічна поверхня ($Z < 1:16$). З'єднання сталевго головки і полімерно-композиційного стрижня НШ складається зі сталевго наконечника 1 і полімерно-композиційного стрижня НШ 2, на яких зроблено канавки несиметричного круглого профілю зі вставленим в неї сталевим витком 3 (рис. 1.18). З'єднання елементів цієї конструкції відбувається наступним чином. На тілі склопластикової НШ 1 накатується різьбова поверхня круглого несиметричного профілю, на яку накручується вставний сталевий виток 3. Після чого стрижень НШ 2 скручується зі сталевим наконечником 1. При цьому вставний виток заповнює проміжок між виточками в сталевій головці і на стрижні НШ, завдяки чому забезпечується щільність з'єднання.

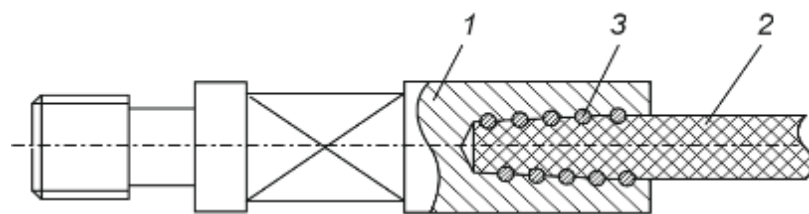


Рисунок 1.18 – З'єднання сталевго головки насосної штанги з полімерно-комполитним стрижнем: 1 – сталева головка; 2 – кінець стрижня насосної штанги; 3 – вставний сталевий виток

Різьбову поверхню на кінцях стрижня з КПКМ формують накатуванням. Завдяки цьому не порушується шарувата структура матеріалу, оскільки волокна матеріалу не перерізаються, а лише пластично деформуються плашками чи

роликами для накатування різьби. Отримана таким методом різьба має гладку, чисту і зміцнену поверхню. Використання круглого несиметричного профілю різьбової поверхні зменшує концентрацію напружень в з'єднанні, збільшує площу зрізу, а отже підвищує границю міцності з'єднання. Крім того, для забезпечення герметичності та високої міцності і зниження напружень у з'єднанні сталевий головці і стрижня НШ на торці циліндричного гнізда в головці формують конічну поверхню ($Z < 1:16$). Крім цього, затиснутий сталевий виток створює в з'єднанні напружений стан, який перешкоджає самовільному розкручуванню штанги під час її експлуатації. Під час з'єднання сталевий головці зі стрижнем НШ важливо дотримуватись їх співвісності.

Поширеним в нафтодобувній галузі є також з'єднання, розроблене фірмою VectorRod [68]. У цьому випадку для ущільнення та підвищення міцності з'єднання елементів НШ використано клинові елементи (рис. 1.19). Проте очевидно, що геометрія профілю внутрішньої поверхні отвору для фіксації стрижнів з ПКМ у тілі сталевий головці сприяє підвищенню концентрації напружень в околі вершин заглибин для розташування клинів з полімеру, а отже, сприятиме зародженню втомних тріщин в найслабших перерізах головці НШ.

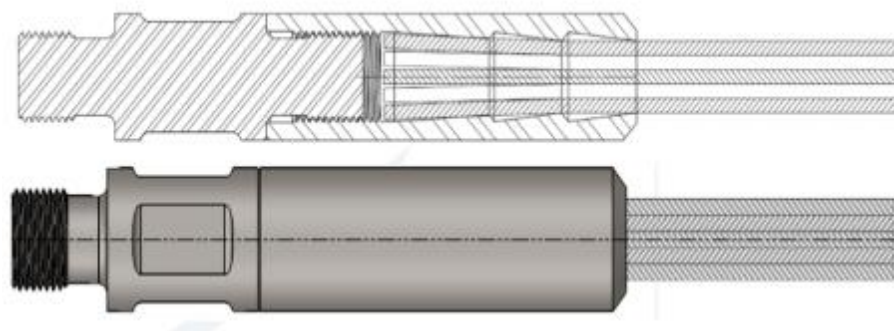


Рисунок 1.19 – З'єднання сталевий головці НШ із вуглепластиковим стрижнем

У свердловинах з високим вмістом води з'єднання скловолоконних НШ особливо схильні до руйнування, що знижує термін їх експлуатації. Сучасні дослідження в основному зосереджені на оцінці міцності з'єднань за кімнатної температури, і менше уваги приділялося залишковій міцності та характеру руйнування під час занурення. Методом скінчених елементів (Finite Element

Method – FEM) моделювали процес надходження води до з'єднання, а методом оцінювання довговічності елементів вивчали розвиток пошкоджень у з'єднаннях [69]. Ці розрахункові дослідження використано, щоб передбачати залишкову міцність з'єднань в момент їх руйнування та отримати дані для прогнозування їх руйнування за експлуатації із занурення у робочих середовищах. Результати показали, що із збільшенням тривалості занурення:

- ✓ основним чинником впливу на руйнування поступово ставало адгезивна міцність зчеплення елементів НШ;

- ✓ максимальні напруження Мізеса, напруження зсуву та залишкова деформація склеєного з'єднання зростали, а максимальне напруження між елементами майже не змінювалося (зміна відбувалась в діапазоні 5%);

- ✓ Розрахована чисельними методами міцність зчеплення елементів з'єднання зменшилася від 21,8 до 11,5 МПа, що добре узгоджується з експериментальними результатами (відхилення між розрахованими і експериментально визначеними значеннями міцності не перевищувала 8%).

Відома також конструкція наконечника НШ, в якій використано серію клинів (рис. 1.20). Навантаження від сталеві головки до стрижня передається через стиск і зсув між цими елементами.

Детальних пояснень аналітичних або скінчено-елементних досліджень такої схеми з'єднання елементів НШ практично немає. Хоча такі з'єднання є важливими для НШ з КППМ, оскільки їх використовують як сполучний елемент між двома композитними стрижнями. Тому напружений стан поблизу сталеві головки особливо важливо аналізувати. З аналізу розподілу напружень в околі головки НШ з КППМ, вивчали ймовірні причини відмови за втомного навантаження та визначали ділянки, схильні до руйнування [69]. Ефективний дизайн головки НШ можна отримати, лише зрозумівши основні причини виникнення втомного руйнування. Оскільки стрижні з КППМ вже широко застосовуються, то покращення дизайну з'єднання композитних стрижнів розширить сферу їх застосування і в інших галузях. 2-D і 3-D скінчено-елементний аналіз композитних НШ здійснюють, щоб зрозуміти розподіл

напружень біля головки НШ з ПКМ, а також щоб виявити ділянки з максимальними напруженнями.

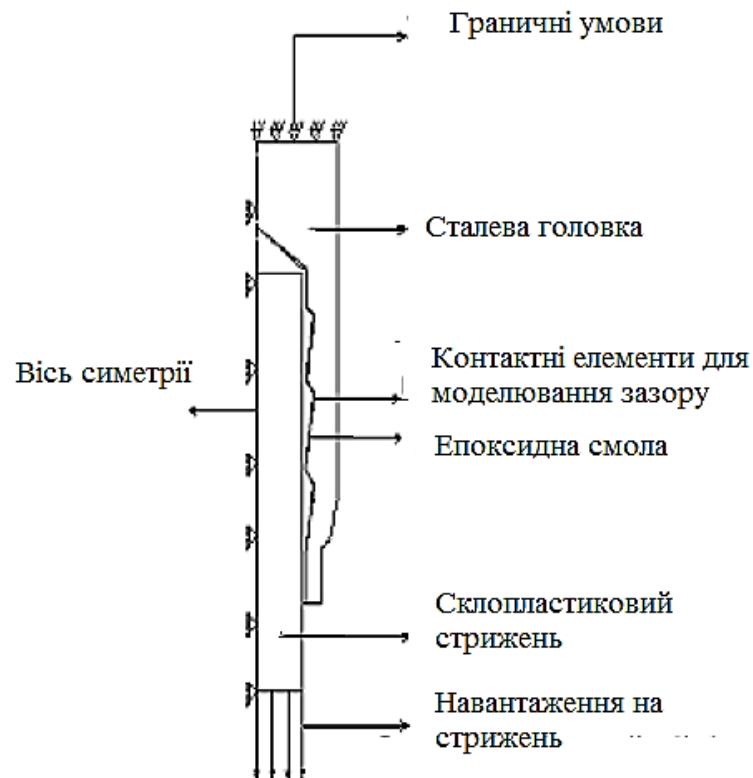


Рисунок 1.20 – Розрахункова схема з граничними умовами і навантаженнями за осесиметричної моделі аналізу НШ методом скінчених елементів

Таблиця 1.8 – Результати випробувань зразків КПМ на розтяг і стиск.

Радіус стрижня	9,9 мм
Міцність за розтягу	793 МПа
Модуль пружності	42,1 ГПа
Міцність за поздовжнього стиску	624 МПа
Міцність за поперечного стиску	59 МПа
Поперечний модуль пружності	605 МПа

Зразки композитних стрижнів, виготовлені методом пултрузії з композиту на основі поліефірної смоли армованої скляними волокнами, випробували на розтяг і стиск на розривній машині MTS [69]. Результати дають змогу порівняти теоретично та експериментально отримані властивості зразків з

ПКМ (табл. 1.8, табл. 1.9). Їх використано як вихідні дані для побудови осесиметричної моделі в скінчено-елементному аналізі (табл. 1.10).

Таблиця 1.9 – Порівняння експериментальних (I) та теоретичних (II) властивостей стрижня, армованого скловолокнами

	I	II
Об'ємна частка скловолокон	0,57	0,59
Модуль пружності в поздовжньому напрямі, ГПа	41,4	43,9
Модуль пружності в поперечному напрямі, ГПа	8,3	8,8
Коефіцієнт Пуассона	0,25	0,27

Скінчено-елементний аналіз з'єднання композитних НШ з використанням пакету програм ANSYS 5.5 дав змогу створити 2D і 3D моделі цього з'єднання як основи для визначення окружних напружень стиску та максимального напруження на ділянках концентрації напружень. Навантаження скловолоконного стрижня моделювали поверхневим тиском на його поверхні.

Таблиця 1.10 – Вихідні властивості ПКМ для осесиметричної моделі

Властивості	Сталева головка	Епоксидна смола	Склопластиковий стрижень
Модуль пружності в окружному напрямі E_{θ} , ГПа, (E_z)	207	5,08	8,73
Модуль пружності в радіальному напрямі E_r , ГПа, (E_x)	207	5,08	8,73
Модуль пружності в осьовому напрямі E_z , ГПа, (E_y)	207	5,08	43,5
Модуль зсуву в окружному напрямі $G_{r\theta}$, ГПа	80	1,82	3,82

Граничні умови та навантаження, прикладені до стрижня, та саму модель для розрахунків наведено на рис. 1.21. Під час моделювання були зроблені наступні припущення:

- для розрахунку з'єднання склопластикового стрижня зі сталеву головою використали показники, визначені у радіальному, поздовжньому і коловому напрямках. Для демонстрації властивостей ортотропного матеріалу застосували Декартову систему координат;

- концентрацію напружень від фасок на сталевій головці під плоский асиметричний гайковий ключ не враховували;

- зроблено припущення, що епоксидна смола в проміжку між елементами НШ ідеально з'єдналася із стрижнем зі скловолонна;

- навантаження прикладалося, як поверхневий тиск на площинний елемент в 3D моделі;

- тиск вважали рівномірно розподіленим по всій поверхні.

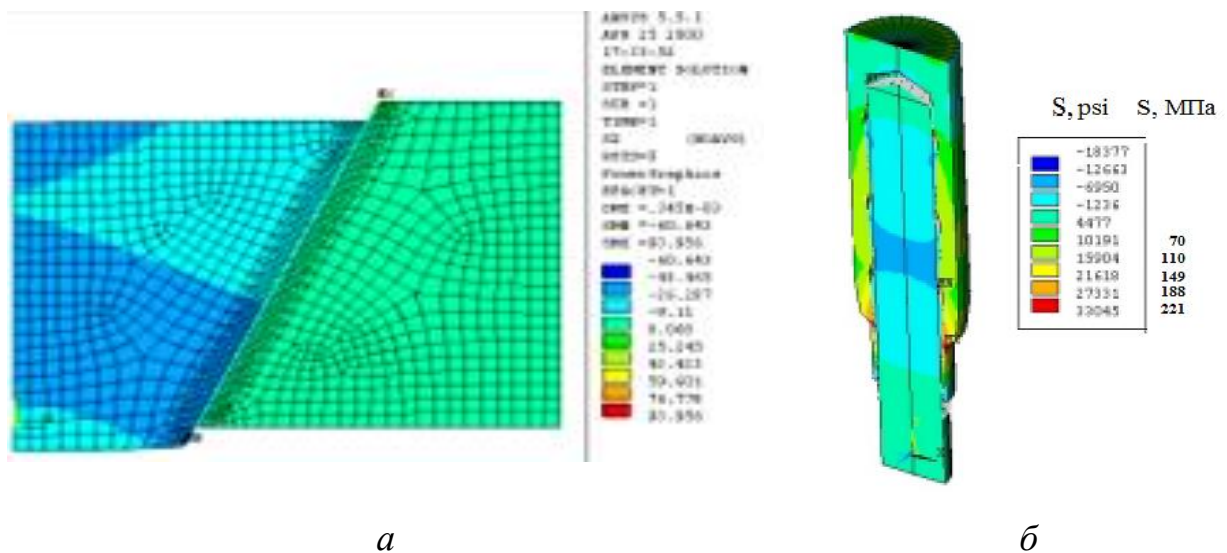


Рисунок 1.21 – Сходимість скінчено-елементного аналізу клинів у з'єднанні (а) та твердотільна модель розподілу напружень стиску в клинах (б) між стрижнем з ПКМ та сталеву головою

Щоб забезпечити необхідну вірогідність результатів скінчено-елементного аналізу, їх порівнювали з теоретичними значеннями та додатково оптимізували розміри розрахункової сітки. Для спрощеної 2D осесиметричної моделі без контакту елементів, аналіз спочатку виконали на простому ізотропному, а потім на анізотропному стрижні. Для випадку контакту елементів окружне напруження знайдено за моделлю спрощеного клину і його

порівнювали з теоретично розрахованими значеннями. Щільність сітки регулювали для підвищення точності отриманих результатів. Теоретичне значення окружного напруження стиску визначали з рівняння (1.1), яке давало змогу оцінити зміну окружних напружень (σ_z) на віддалі в радіусі (r). Встановили, що максимальні напруження стиску виникають на віддалі мінімального радіусу.

$$\sigma_z = \frac{P}{\pi \cdot (R_2 - R_1) \cdot r} \quad (1.1)$$

З використанням осесиметричної сітчастої моделі еталонного клина і сталеві головки за напружень стиску порівняли значення колових напружень, отриманих методом кінцевих елементів, і теоретичних результатів за різних рівнів навантажень (рис. 1.22). У цьому випадку ковзання між сталлю та стрижнем не враховували, оскільки вважали, що епоксидна смола приклеєна до стрижня, армованого скловолокнами. Сталеву головку, стрижень зі скловолокна та епоксидну смолу вважали нероз'ємними частинами. Вважали також, що між епоксидною смолою та сталевим кінцевим фітінгом існує міцний адгезійний зв'язок [69]. Припустили, що завдяки власній вазі стрижня епоксидна смола відразу контактує з поверхнею торця металевого фітінгу. Для аналізу це найпростіший випадок, коли елементами з'єднання є сталевий фітінг, епоксидна смола та скловолоконний стрижень з різними властивостями. Попри те, що властивості елементів з'єднання відрізнялися всі три зони контакту між елементами вважали безперервними. Усі властивості поточної геометрії елементів з'єднання переводили з циліндричних координат в координати Декартової системи, які використали як вхідні дані в осесиметричній моделі. На показаній на рис. 1.22 а сітковій 3D-моделі враховано геометрію усіх елементів вздовж поверхні клинового з'єднання.

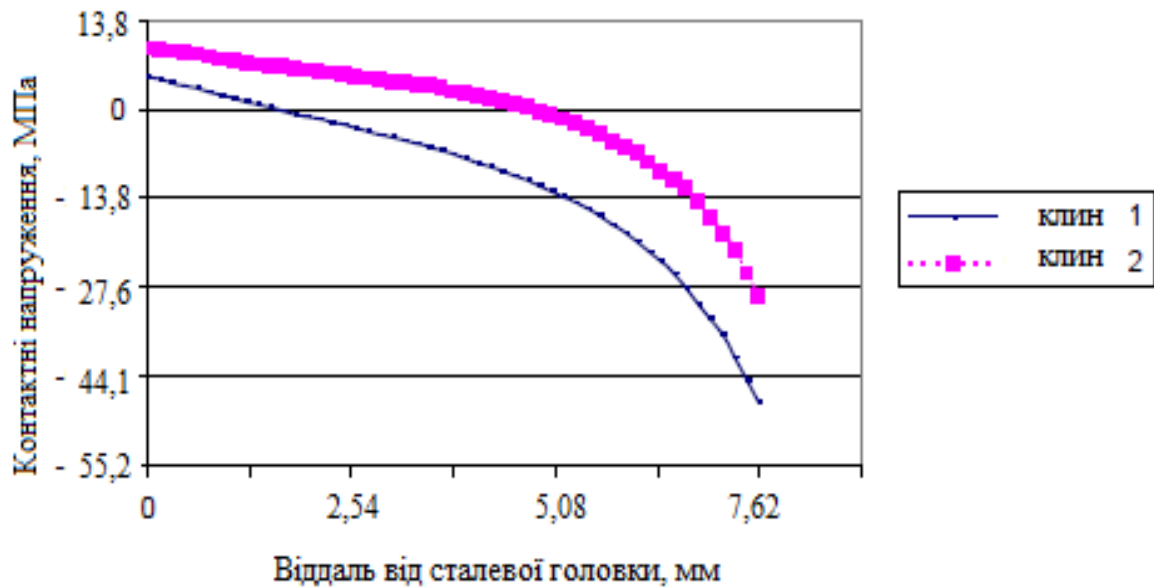


Рисунок 1.22 – Контактні напруження, що виникали за ідеального контакту між елементами 2 типів клинового з'єднання, розраховані за допомогою осесиметричної моделі

На рис. 1.23 схематично показано типове з'єднання склопластикового стрижня зі сталеві головкою. Хоча, як правило, конфігурація з'єднань між ПКМ та металевими елементами у різних виробників дещо відмінні.



Рисунок 1.23 – Типове з'єднання склопластикового стрижня зі сталеві головкою (патент США US-6193431-B1)

Розглянуті методи з'єднання стрижнів НШ з ПКМ зі сталевими головками можна використовувати за прототип для з'єднання елементів гібридних штанг. Звісно, що при цьому мають бути враховані їх конструктивні особливості та технологія виготовлення. Основні параметри та механічні характеристики цих з'єднань наведено в стандартах та технічних умовах [30].

1.5 Постановка завдань досліджень

На основі проведеного аналізу специфіки умов експлуатації насосних штанг, причин їх пошкодження та чинників впливу на їх технічний стан сформулювали наступні завдання дослідження в рамках виконання дисертаційної роботи “Підвищення ресурсу гібридних насосних штанг”:

- проаналізувати причини втомного руйнування насосних штанг з полімерних композитів та, використавши відомі методики оцінювання міцності, опору крихкому руйнуванню та втомної міцності, показати перспективи їх використання для підвищення роботоздатності устаткування в нафтодобувній галузі;

- на основі експериментальних досліджень гібридних насосних штанг виявити закономірності зародження та росту в них втомних тріщин та встановити вплив величини змінного навантаження на інкубаційний період зародження втомних тріщин та швидкість їх росту;

- базуючись на фрактографічних дослідженнях зруйнованих зразків з гібридних насосних штанг розкрити механізми зародження втомних тріщин в них та виявити особливості їх поширення на весь переріз штанг;

- оцінити вплив ударних згинальних навантажень гібридних насосних штанг на їх опір крихкому руйнуванню та на основі фрактографічних досліджень вивчити особливості їх впливу на поширення руйнування на весь переріз штанг;

- порівняти особливості зародження та росту втомних тріщин у сталевих, склопластикових та гібридних насосних штангах;

- розробити конструкцію з'єднання елементів гібридних насосних штанг, яка б підвищувала їх зчеплення між собою;

- на основі аналітичних розрахунків міцності зчеплення та скінчено-елементного аналізу напружено-деформованого стану в кожному з елементів з'єднання обґрунтувати підвищення надійності розробленої конструкції.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для виготовлення НШ в нафтогазовій промисловості щораз більшого поширення набуває застосування склопластику. Однак під час експлуатації за впливу різних технологічних чинників характеристики штанг погіршуються. Аварії, що виникають під час експлуатації колон з НШ, істотні витрати на ліквідацію їх наслідків та ремонт устаткування, спонукали до вдосконалення контролю склопластикових деталей, що випускаються для нафтогазодобувної промисловості. Одним із шляхів подолання цих проблем є розроблення нових насосних штанг, а також вдосконалення відомих методик випробувань та діагностування їх стану з прогнозуванням міцності таких насосних штанг.

2.1 Об'єкт дослідження

Дослідили зразки гібридних (поєднання склопластикової оболонки і вуглепластикового осердя) насосних штанг довжиною приблизно 400 мм, які склалися з тіла штанги, виготовленого із ПКМ та сталевих головок (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд зразків з штанг, використаних у випробуваннях

Оболонку композитних насосних штанг виготовляють з ровінгу із скляних ниток (ГОСТ 17139-79), смоли епоксидної ЕД-20 (ГОСТ 10587-84),

поліетиленполіаміну /ПЕПА/ (ТУ 6-02-594-80) та затверджувача – ангідрид ізометилтетрагідрофталевої кислоти /ізоМТГФА/ (ТУ 6-02-594-80).

Діаметр композитних насосних штанг становив 19 мм. При цьому діаметр армованого вуглецевими волокнами осердя становив 12 мм, а товщина скловолоконної оболонки – 3,5 мм. Переріз гібридного стрижня штанги показано на рис. 2.2. Полімерне тіло штанги з'єднували зі сталевією головкою за допомогою з'єднання.

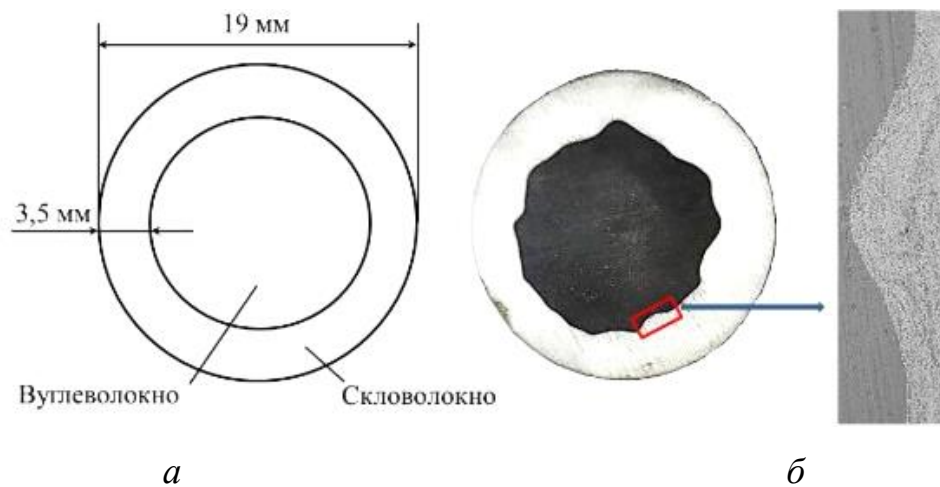


Рисунок 2.2 – Схема (а) та переріз гібридного стрижня насосної штанги з нерівномірним розподілом волокон в зоні контакту склопластикової оболонки і вуглепластикового осердя (б).

Скловолоконні штанги легші порівняно зі сталевими, але їм властива набагато більша пружна деформація за розтягу, і тому їх не рекомендують використовувати в перехідних зонах штангової колони через виникнення тут змінних напружень стиску [11]. Застосування гібридних насосних штанг, з осердям армованим вуглецевими волокнами дає змогу уникнути подібних проблем. Вуглецеве волокно характеризується високими міцністю на розрив (до 6,2 ГПа), модулем пружності за розтягу (до 800 ГПа) та низькою густиною (1380 кг/м³), яка в 6 разів нижча, ніж у сталі [35, 41]. Вуглецеве осердя гібридних насосних штанг виготовляють зі суцільних волокон, які збирають у пучок [70, 71], оскільки ці волокна не зв'язані одне з одним, то за циклічних

навантажень в них практично не утворюються тріщини [72]. Гібридні насосні штанги утричі легші за сталеві та характеризуються вищою корозійною тривкістю.

2.2 Втомні випробування насосних штанг

Для оцінювання технічного стану композитних насосних штанг використали втомні випробування, та проаналізували механізми їх руйнування. Проведення випробувань є важливими для визначення фізико-механічних властивостей композитних насосних штанг та підтвердження можливості їх роботи у свердловині при заміні на них сталевих штанг. Важливо проаналізувати вплив навантажень від розтягу та згину, що виникають під час переміщення колони, перевірити їх властивості в корозійному середовищі, встановити кількість втомних тріщин та характер їх поширення при заданому навантаженні та визначити ресурсні можливості штанг до появи в них втомних тріщин та до їх руйнування.

Визначення втомних характеристик насосних штанг з полімерно-композитних матеріалів здійснювали за методикою близькою до натурних випробувань [11], яка передбачає використання дослідних зразків, вирізаних з готових склопластикових штанг. В зразку для лабораторних досліджень довжиною 400 мм повністю зберегли конфігурацію головки та тіла штанги в зоні найнебезпечнішої для руйнування виробу ділянки, яка відповідала переходу між тілом ПКШ та сталевією головкою (рис. 2.1).

Випробування здійснювали за навантажень 110 та 140, оскільки це робочий діапазон експлуатації штанг у свердловині, а також при навантаженнях 175 МПа, як випадок перевантаження у викривлених свердловинних.

Зразки випробували на установці ЗКШ-25 [73]. Схематично її показано на рис. 2.3. Зразок 1 і камеру 2 для випробувань у робочому середовищі закріплювали в цанговому затискачеві 3 вала 4, який обертався на опорах кочення, вмонтованих в опорах 5. За допомогою пальцевої муфти 6 вал 4 був з'єднаний з

електродвигуном 7. Зразок 1 навантажували з використанням вантажів 8, які вкладали на тарілку підвіски 9 навантажувальної головки 10. Для реєстрації числа циклів навантаження використали лічильник 11. Установка змонтована на рамі 12 з амортизаційними подушками 13. В момент руйнування зразка електродвигун вимикався за допомогою вимикача 14, який натискався важелем 15.

На установці проводили дослідження на втому і корозійну втому зразків із гібридних насосних штанг діаметром 19 мм за частоти навантаження 15 Гц та порівнювали їх із сталевими діаметром 16, 19, 22, 25 мм.

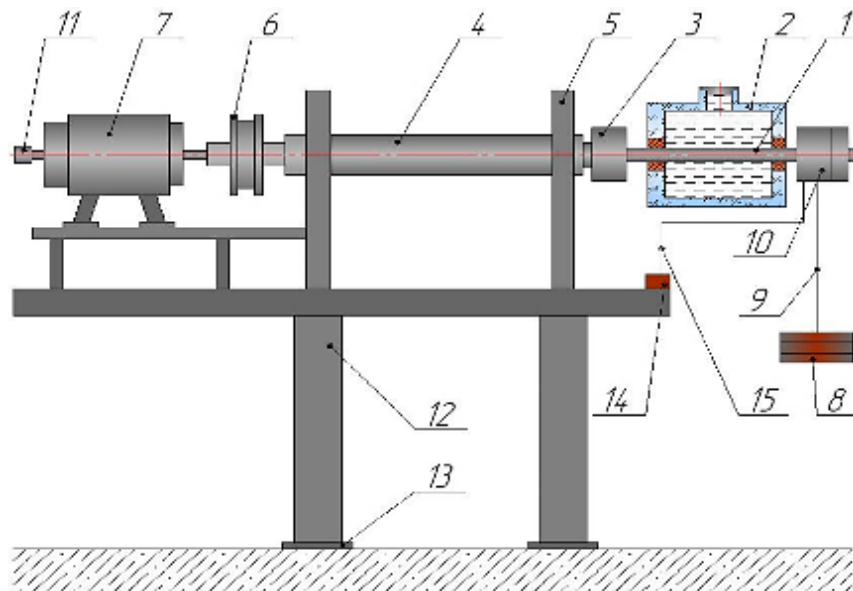


Рисунок 2.3 – Установка для випробувань насосних штанг на втому за їх навантаження обертовим консольним згином

Зразки закріплювали у затискачах випробувальної установки (рис. 2.4) та навантажували їх обертовим консольним згином. Кількість циклів навантаження реєстрували лічильником. Довжину тріщини контролювали на бічній поверхні тіла штанги в околі його контакту зі сталеву головою. Установку періодично зупиняли для огляду ділянки в місці з'єднання склопластикового чи гібридного тіла штанги зі сталеву головою на наявність втомних тріщин та для вимірювання їх довжини з використанням штангенциркуля (точність замірів становила 0,1 мм).



Рисунок 2.4 – Зразок насосної штанги з ПКМ для випробувань на втому

Утомні характеристики зразків із НШ визначали з побудованих кривих втоми (залежностей числа циклів навантаження до руйнування від амплітуди прикладених циклічних напружень). Отримані дані використали для порівняння втомної міцності полімерних штанг у корозивному середовищі відносно властивої сталевим штангам. Як робоче середовище використовували пластову воду з нафтопромислу підприємства «Долинанафтогаз» ПАТ «Укрнафта»: мінералізація 106596 мг/л, рН 7,08; аніони (в мг/л) – 63968 Cl⁻¹, SO⁻², 293 HCO⁻¹, решта SO⁻²; катіони (в мг/л) – 37512 (K⁺⁺Na⁺1,4008 Ca⁺², 608 Mg⁺², 50 Fe заг.) та 5, 10, 15 % розчини соляної кислоти. Також випробування здійснювали в середовищі 3% водного розчину NaCl, який періодично (1 раз на добу) насичували сірководнем до граничної концентрації (~2500 мг/л)

2.2.1 Підготовка зразків до випробувань

Для проведення втомних випробувань використали експериментальну установку ЗКШ-25, двигун якої передавав крутний момент на вал, до якого був під'єднаний дослідний зразок, а вантажі на підвісці створювали навантаження згином. Після випробувань обробляли та аналізували отримані дані по кінетиці поширення втомних тріщин на бічній поверхні зразків.

Випробування проводили згідно попередньо затвердженого плану, що передбачав вирізання склопластикового тіла встановленого розміру, з

наступною підготовкою поверхні контакту сталеві головки та склопластикового тіла (очищення, знежирювання тощо). Поверхню склопластикового тіла штанги підготовляли для полегшення контролю за зародженням та ростом тріщин. Далі з'єднували склопластикові тіла зі сталевією головкою за допомогою епоксидного клею та встановлювали дослідний зразок в захоплювачах установки. Здійснивши перевірку справності всіх вузлів машини, зразки навантажували наперед визначеним зусиллям та виводили установку на робочий режим. Реєстрували "нульовий" показник контрольно-вимірювальних приладів, а в подальшому виміряли утворені внаслідок навантаження тріщини і фіксували кількість циклів до їх зародження та досягнення приростів певного розміру.

2.2.2 Контроль аналізованих параметрів

Процес контролю росту тріщин включав наступні етапи:

- Зупинка роботи установки (що пів години);
- Фіксація числа циклів навантаження та занесення даних у відповідний протокол випробувань;
- Розвантаження підвіски;
- Демонтаж зразка із захоплювачів машини для фіксації підростання наявних тріщин, що зародилися на попередньому етапі іспробувань;
- Візуальний огляд бічної поверхні зразків в околі розмежування сталевієї головки з тілом гібридної штанги на наявність новоутворених тріщин;
- Заміри довжини тріщин за допомогою штангенциркуля з точністю до 0,1 мм;
- Фіксація пошкоджень та запис у протоколі досліджень їх параметрів (довжина тріщин та їх розташування вздовж периметру НШ) з побудовою графічної залежності між довжиною тріщин (починаючи від їх зародження) та кількістю циклів навантаження впродовж якої цю довжину зафіксували.

2.3 Випробування зразків на ударну в'язкість

Технічний стан матеріалу КНШ оцінювали також за ударною в'язкістю KCV, яку визначали на зразках Шарпі з V-подібним надрізом. Зразки випробовували на маятниковому копрі типу ІО – 5003 (рис. 2.5). Для оцінювання опору крихкому руйнуванню гібридних штанг розробили методику, яка дала змогу розділити вклад скловолоконної оболонки та вуглепластикового осердя штанги та показати ключову роль осердя у формуванні опору динамічним навантаженням під час експлуатації штанг у свердловинах.



Рисунок 2.5 – Маятниковий копер типу ІО – 5003 для випробувань на ударну в'язкість зразків із КНШ

2.4 Методика проведення структурного аналізу та фрактографічних досліджень

Для полірування шліфів використовується пристрій LaboPol-2 фірми Struers (рис.2.6). Під час процедури виготовлення зразків по чергово використовували шліфувальні, а потім і полірувальні матеріали з різною зернистістю абразивних часточок та відповідні охолоджувальні рідини.



Рисунок 2.6 – Пристрій LaboPol-2 для виготовлення шліфів

Для запобігання оплавлення зв'язки між скло та вуглецевими волокнами в композитних матеріалах, підвищення провідності та якості фрактографічних зображень поверхню зламів зразків, отриманих після випробувань в лабораторних умовах, а також для аналізу структурно-морфологічних особливостей складових ПКМ на поперечному і повздовжньому шліфах злами і шліфи попередньо напиляли тоненьким шаром золота з використанням установки для вакуумного напилювання зразків магнетронного типу JFC-1600 Auto Fine Coater (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Установка магнетронного типу JFC-1600 Auto Fine Coater для напилювання поверхні зразків з ПКМ золотом.

Для структурних досліджень (візуалізація та аналіз елементів структури матеріалу) та фрактографічних досліджень (встановлення механізмів руйнування реальних елементів зруйнованих внаслідок випробувань у лабораторних умовах) використали електронний мікроскоп Zeiss EVO-40XVP, наявний у центрі колективного користування науковими приладами ФМІ НАН України “Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу” (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Сканівний електронний мікроскопі ZEISS EVO 40-XVP центру колективного користування науковими приладами при ФМІ НАН України “Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу”

РОЗДІЛ 3

ВЛАСТИВОСТІ ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ ШТАНГ ЗА ВПЛИВУ РІЗНИХ ВИДІВ НАВАНТАЖЕННЯ

3.1 Вплив рівня змінних навантажень на характеристики втоми гібридних насосних штанг

Насосні штанги працюють на розтяг при асиметричному навантаженні. Проте, також зазнають навантажень згину у викривлених ділянках свердловини та в нижній частині колони при її ході вниз внаслідок втрати стійкості, та на кручення при застосуванні обертачів. Так, за випробувань на циклічний розтяг 10^4 циклів умовна межа втоми гібридних штанг становить 1 ГПа. Такі високі характеристики втоми насосних штанг забезпечують їх експлуатацію в глибоких свердловинах [45]. За експериментальних досліджень на циклічний згин, при тій же кількості циклів навантаження умовна межа втоми досягала приблизно 200 МПа, а це практично в 5 разів опір втомі є нижчий. Враховуючи те, що гібридні насосні штанги характеризуються високим опором втомному руйнуванню при малоцикловому розтязі, то важливо визначити їх втомні характеристики при згині, оскільки саме такі навантаження є небезпечними в певних ділянках свердловини. Тому, завданням роботи є оцінити поведінку гібридних штанг про циклічному згині.

Дослідили властивості гібридних композитних стрижнів (діаметром 19 мм), втомно навантажених обертовим згином. Для цього стрижні НШ з'єднували зі сталевими головками. Стрижні склалися з оболонки, армованої скляними волокнами, та осердя, армованого вуглецевими волокнами. Пошкодження стрижнів залежало від кількості циклів їх навантаження консольним обертовим згином і проявлялось втратою їх жорсткості, яка залежала і від кількості повздовжніх тріщин, що виникали на їх бічних поверхнях, і від їх довжини. Дослідження здійснили на зразках із НШ за їх

навантаження до рівня напружень 110, 140 і 175 МПа. Періодичність контролю бічної поверхні зразків на наявність тріщин становила 30 хвилин. Пошкодження на поверхні штанги зароджувалися і поширювалися в результаті розтріскування скловолоконної матриці (рис. 3.1а). Встановлено, що руйнуванню гібридних штанг за їх навантаження обертовим згином передувало зародження у склопластиковій оболонці від 2 до 13 повздовжніх тріщин. Два зразки випробували за напружень 140 МПа, які зруйнувалися після критичного підростання втомних тріщин, що зародилися від зони кріплення сталеві головки з тілом штанги. Зокрема у зразку №2 шість тріщин мали довжину, мм: 1 тріщина – 23; 2 – 23; 3 – 18; 4 – 7; 5 – 14; 6 тріщина – 12. Типова схема розташування тріщин вздовж периметру штанги перед їх руйнуванням подана на рис. 3.1б. За результатами спостережень за цими тріщинами у зразках гібридних штанг, навантажених до рівня напружень 140 МПа, побудували діаграми їх підростання в діапазоні від $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження і аж до руйнування (рис.3.1в).

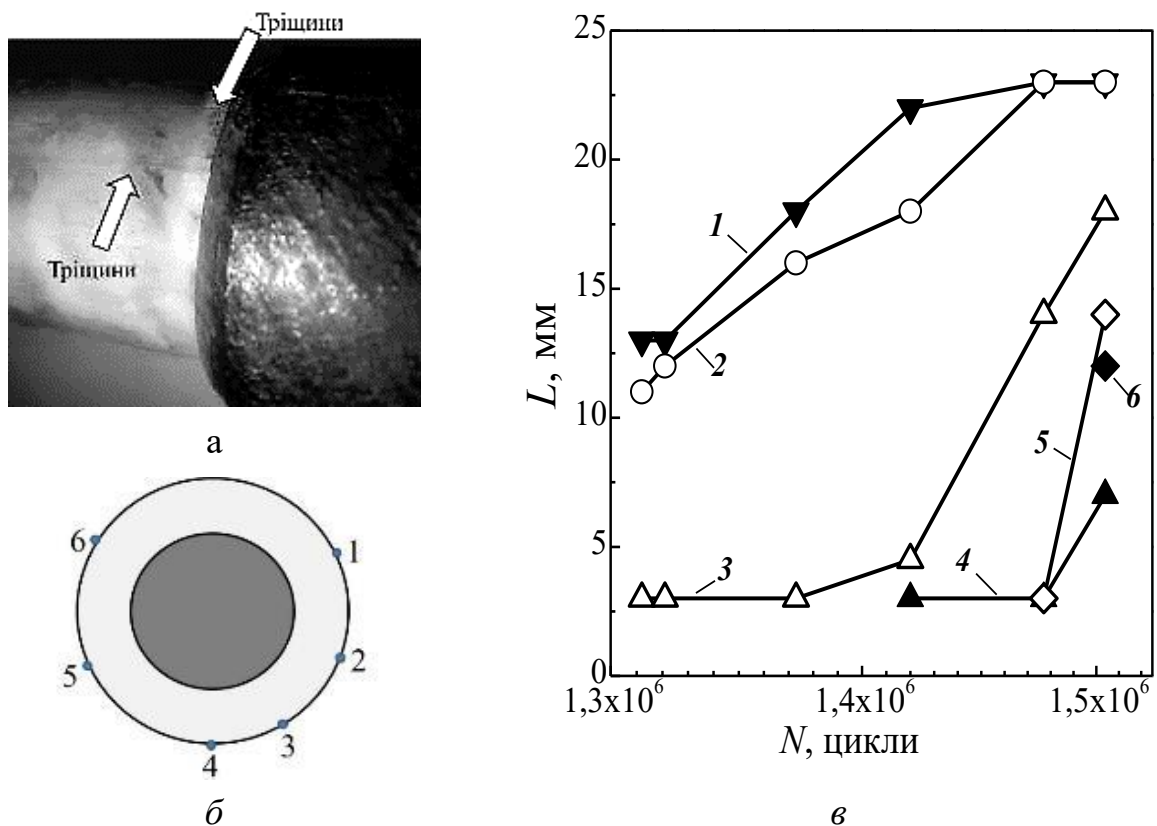


Рисунок 3.1 – Втомні тріщини (а) та їх розташування в зразку гібридної штанги за напружень 140 МПа (б), а також діаграми росту тріщин у гібридній штанзі в діапазоні числа циклів від $1,3 \times 10^6$ до руйнування (в).

Дані для обох випробуваних зразків з гібридних штанг представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Довжини втомних тріщин в зразках гібридних штанг за напружень 140 МПа

	1	2	3	4	5	6
Зразок 1	21	20	17	15	12	10
Зразок 2	23	23	18	7	14	12

За напружень 110 МПа після $2,3 \times 10^7$ циклів навантаження утворилося тільки дві повздовжні тріщини (рис. 3.2). Проте після наступних 5×10^5 циклів навантаження і аж до руйнування виникло ще 11 тріщин. Загальний вигляд зламу гібридної насосної штанги випробуваної за напружень 110 МПа представлено на рисунку 3.3.

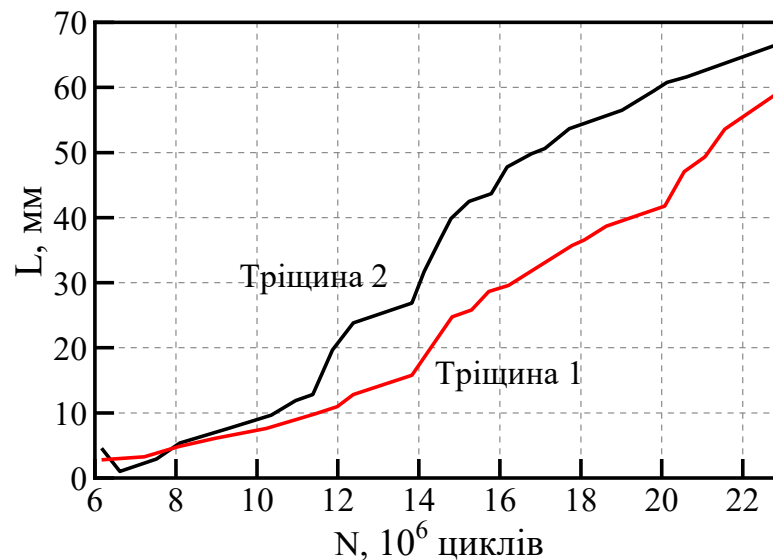


Рисунок 3.2 – Залежність довжин втомних тріщин L від числа циклів втомного змінного навантаження N в гібридних насосних штангах при згинальному напруженні 110 МПа.

Проаналізували також послідовність зародження та росту втомних тріщин відповідно до числа циклів навантаження за напружень 175 МПа

(таблиця 3.2 та 3.3). Під час огляду зруйнованого зразка на його бічній поверхні виявили 13 тріщин. Їх розміри та розташування показано на рис. 3.4.

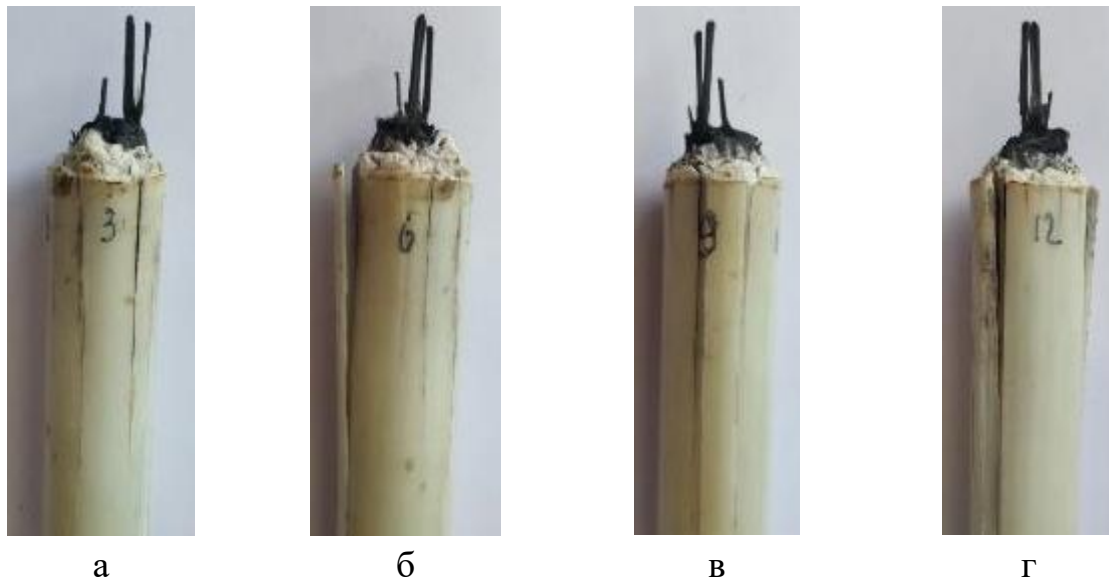


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд зламу гібридної насосної штанги, випробуваної за напруження 110 МПа

Таблиця 3.2 – Довжини перших зароджених в гібридній штанзі тріщин втоми за напружень 175 МПа

N, циклів	Довжина перших чотирьох тріщини l , мм			
$1,246 \times 10^6$	1	–	–	–
$1,307 \times 10^6$	2	–	–	–
$1,341 \times 10^6$	2,5	0,5	–	–
$1,368 \times 10^6$	3	1	–	–
$1,395 \times 10^6$	3	1	1,5	1
$1,422 \times 10^6$	3,5	1	2	1
$1,459 \times 10^6$	Руйнування відбулося після появи 13 тріщин довжиною від 1 до 16 мм			

Таблиця 3.3 – Довжина тріщин l у зразку, зруйнованому за напружень 175 МПа

№ тріщини	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
l , мм	4	2	3	2	1	2	9	10	16	4	10	5	13

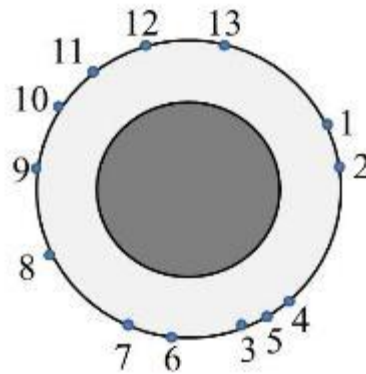


Рисунок 3.4 – Схема розташування втомних тріщин вздовж периметру гібридної штанги, зруйнованої за напружень 175 МПа.

За напружень 175 МПа зразок гібридної штанги зруйнувався в околі зони з'єднання сталеві головки з тілом штанги, витримавши до цього моменту $1,495 \times 10^6$ циклів. На бічній поверхні штанги в околі сталеві головки зафіксували численні тріщини. Таким чином встановили, що за дії високих напружень згину в гібридних штангах зароджувалося багато тріщин (до 13), а за низьких – їх кількість зменшувалася до 2 – 3.

Характерні злами гібридних штанг представлено на рис. 3.5, в яких наявні руйнування як в межах склопластикової оболонки, в якій зароджуються перші тріщини, так і вуглепластикового осердя з розривами вуглецевих волокон на різних рівнях. У вуглепластиковому осерді гібридної НШ також виявили практично діаметрально орієнтовану тріщину, спричинену високими напруженнями згину (рис. 3.6).

Такий характер зародження тріщин з наступними повздовжніми відшаруваннями скловолоконної оболонки від вуглепластикового осердя характерні за дії напружень згину, яких неможливо уникнути за викривлення свердловин від нормальної орієнтації. Проте гібридні штанги мають досить високу міцність за дії напружень розтягу, і задача полягає у тому, щоб не допустити під час експлуатації виникнення в гібридних НШ напружень згину понад 80 – 100 МПа, які можуть стати критичними.

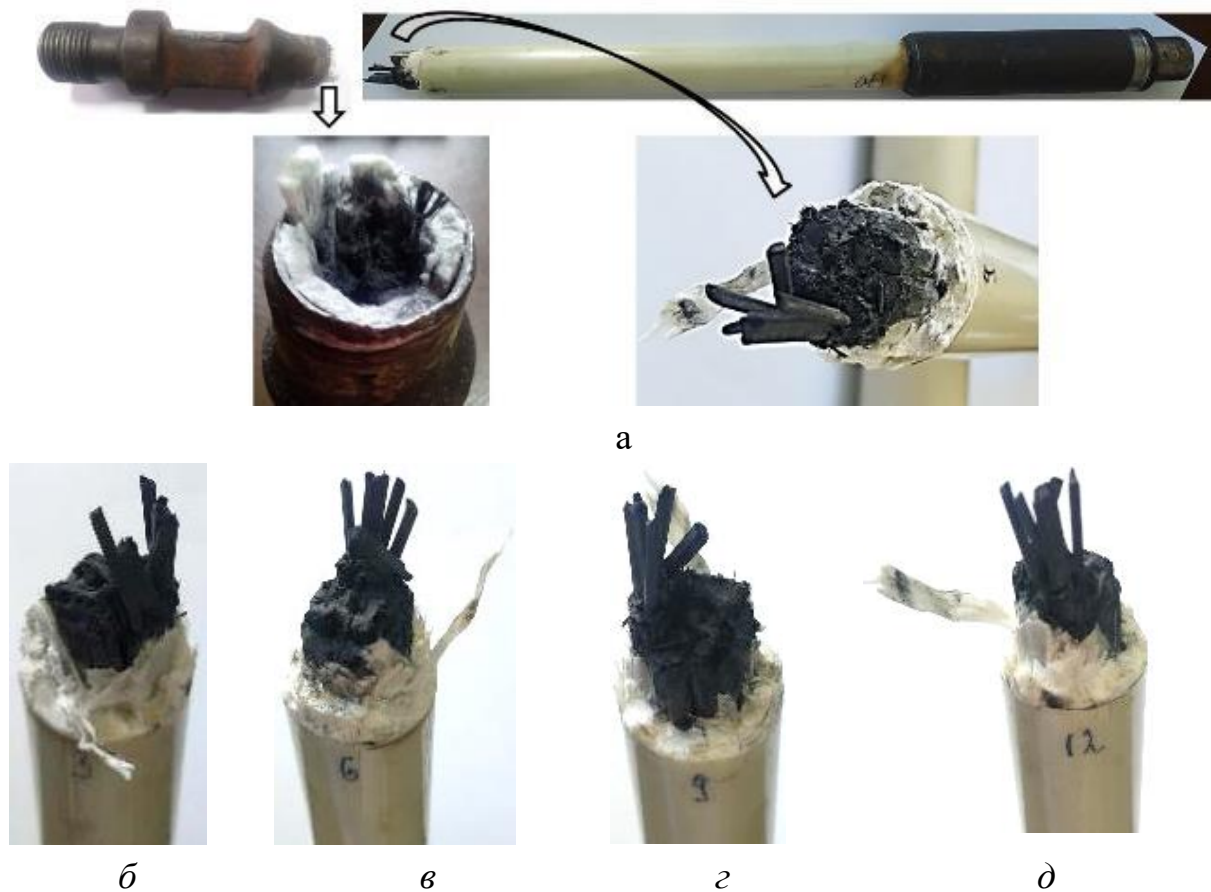


Рисунок 3.5 – Зруйнований зразок та злами гібридної насосної штанги, випробуваної за напружень 175 МПа.



Рисунок 3.6 – Тріщина в осерді гібридної насосної штанги.

Таким чином на основі втомних випробувань зразків гібридних штанг за напружень від 110 до 175 МПа встановили, що кількість тріщин в зоні з'єднання стрижня зі сталевією головкою зростає по наростаючій зі збільшенням величини прикладених циклічних навантажень (рис. 3.7).

Загалом внаслідок утомних випробувань у склопластикових та гібридних штангах на їх бічних циліндричних поверхнях утворюються повздовжні тріщини. За напружень 80 МПа у склопластикових штангах виникали найбільші

тріщини завдовжки 45 мм, за напружень 90 МПа їх довжина досягає 25 мм, а за $\sigma = 100$ МПа – 12 мм. Тріщини в гібридних штангах досягали максимальної довжини за напружень 150 та 175 МПа – 12 та 16 мм, відповідно, а за впливу $\sigma = 140$ МПа – 23 мм, за 120 МПа – 35 мм, а за найнижчих з використаних напружень 110 МПа – довжина цих тріщин зростала до 65 мм.

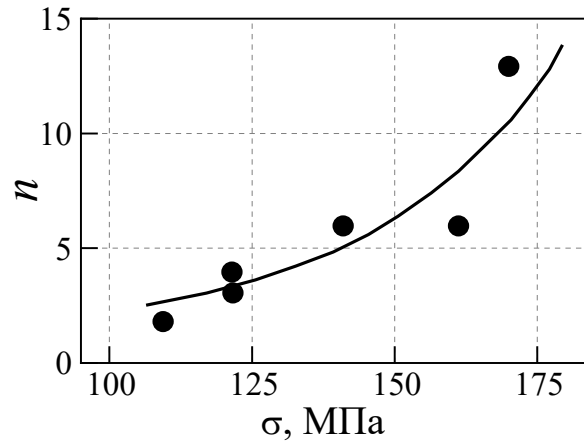


Рисунок 3.7 – Залежність кількості зароджених тріщин n від величини змінного напруження σ в гібридних насосних штангах.

Максимальна довжина втомних тріщин, що утворювалися за різних змінних навантажень, зменшувалася зі зростанням величини напружень (рис. 3.8).

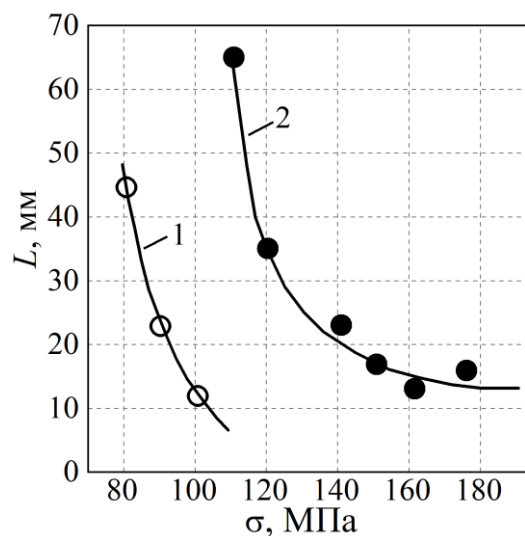


Рисунок 3.8 – Залежність довжини максимально довгої тріщини L на момент руйнування склопластикових (1) та гібридних (2) насосних штанг від величини змінних напружень в циклі навантаження σ .

3.2 Особливості структури двошарової композиційної штанги на різній віддалі від поверхні її втомного зламу

3.2.1 Макроструктурні особливості композитної штанги в околі втомного зламу

Адгезія скло-, і вуглецевих волокон з полімерною матрицею має важливу роль для втомних характеристик штанги. Тому проаналізувати стан самих волокон і полімерної матриці в різних перерізах зразка-штанги випробуваного на втому за кругового консольного згину за напружень 140 МПа аж до руйнування після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження. Шліфи для аналізу структури зразка НШ виготовили в двох його перерізах (рис. 3.9). Перший з шліфів був розташований на глибині 60 мм від поверхні зламу.



Рисунок 3.9 – Розташування шліфів для структурних досліджень на зразку з НШ (а) та тріщина у вуглецевому осерді гібридної насосної штанги (б), випробуваної за напружень 140 МПа.

На його поверхні навіть за візуального спостереження виявили діаметрально зорієнтовану у перерізі шліфа макротріщину, яка перетнула все внутрішнє вуглепластикове осердя штанги і зупинилася на межі його розділу з оболонкою, зміцненої скловолокнами (рис. 3.9). Зрозуміло, що на поперечному шліфі штанги зафіксовано переріз тріщини, яка орієнтована в осьовому напрямі (тому цю тріщину можна класифікувати як тріщину вторинного розтріскування). Адже руйнування штанги за кругового консольного згину відбулося у площині дії максимальних нормально орієнтованих напружень розтягу за навантаження

зразка круговим згином. Отже, макроплощина втомного зламу зразка-штанги перетинала цю вторинну тріщину або під кутом (тоді цю тріщину слід трактувати як вторинне відгалуження основної тріщини), або була зорієнтована перпендикулярно до аналізованої на шліфі тріщини (тоді її слід трактувати як розшарування).

Детальніший аналіз з використанням можливостей електронної мікроскопії виявив макроструктурні особливості композитної штанги (рис. 3.10). По-перше, відзначили макронеоднорідність заповнення зовнішнього шару зразка-штанги скловолокнами, що структурно проявилось ділянками з щільнішим і менш щільним розташуванням скловолокон в перерізі оболонки. По-друге, очевидною була криволінійність межі розділу між осердям і оболонкою на макрорівні (рис. 3.10). Зовнішній шар оболонки немов би втискали з діаметрально протилежних боків у внутрішнє осердя і ці втиснені ділянки розташовувалися приблизно діаметрально протилежно одна відносно одної. Цю особливість пов'язали із специфікою технології виготовлення композиційних штанг. У тих перерізах осердь, які були максимально ослаблені виступами зі сторони оболонки, які найглибше врізалися в тіло осердя, виникали поздовжні тріщини (рис. 3.10а, б). Виглядало так, що ці заглибини в осерді, заповнені матеріалом скловолоконної оболонки штанги, створювали достатньо високу концентрацію напружень, щоб тріщина в ньому поширилася на весь його переріз. З розкриття берегів тріщини в осерді штанги очевидно, що росла вона в обидва боки як центральна тріщина. Адже розкриття її берегів зростало з наближенням до центра перерізу штанги (рис. 3.10а, б). При цьому очевидного пошкодження зовнішнього шару скло волоконної оболонки зразка-штанги не спостерігали. Відзначили також, що на ділянках, де сформувалися виступи з матеріалу вуглепластикового осердя, які клинами заглиблювалися в матеріал скловолоконної оболонки зразка-штанги, подібних осьових тріщин в осерді не виявили (рис. 3.10в, г). Звідси прийшли до висновку, що поздовжня макротріщина виникла у найслабшому з точки зору напружено-деформованого стану перерізі. А за її поширення відповідальна, скоріш за все, можливість

значних переміщень на діаметрально протилежних частинах зразка, які допускалися використаною схемою фіксації і навантаження зразка-штанги.

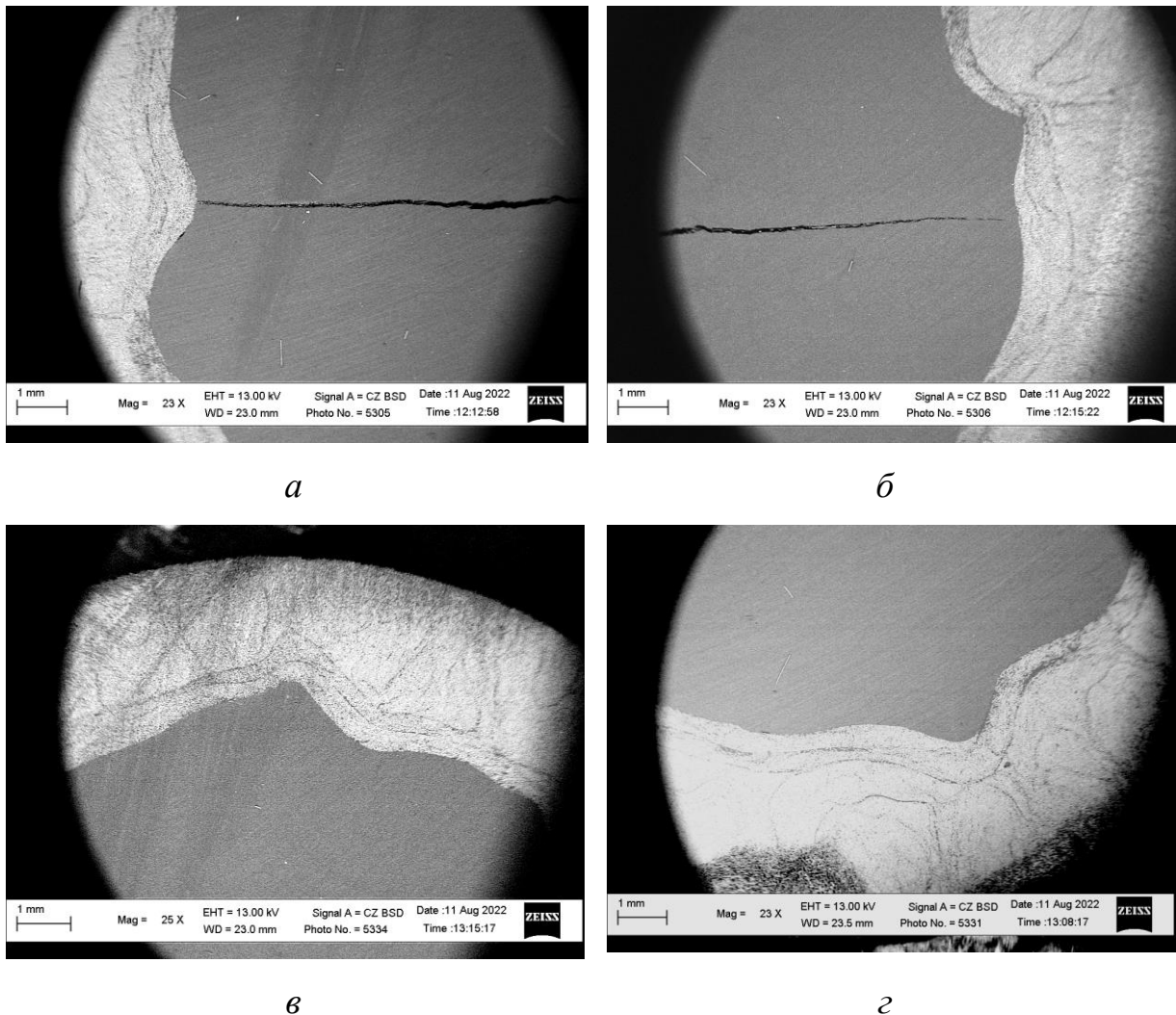


Рисунок 3.10 – Типові макроструктурні особливості двошарової композитної штанги на різних ділянках шліфа.

3.2.2 Мікроструктура двошарової композиційної штанги в її поперечному перерізі під втомним зламом

З використанням вищої роздільної здатності електронного мікроскопу виявили особливості поширення поздовжньої тріщини в околі меж розділу вуглепластикового осердя зі зовнішньою скловолоконною оболонкою (рис. 3.11).

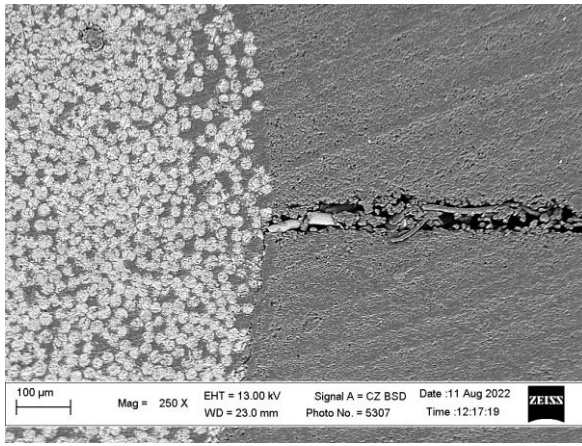
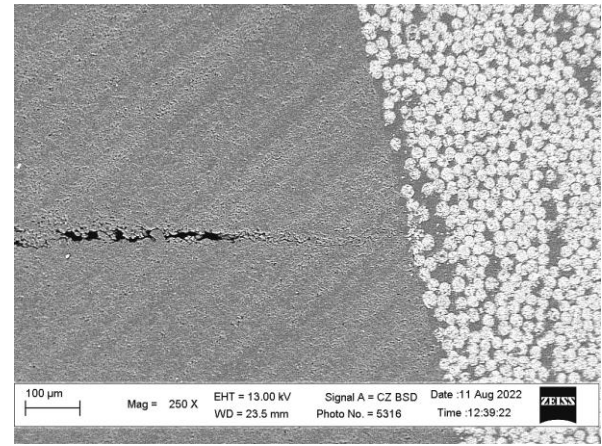
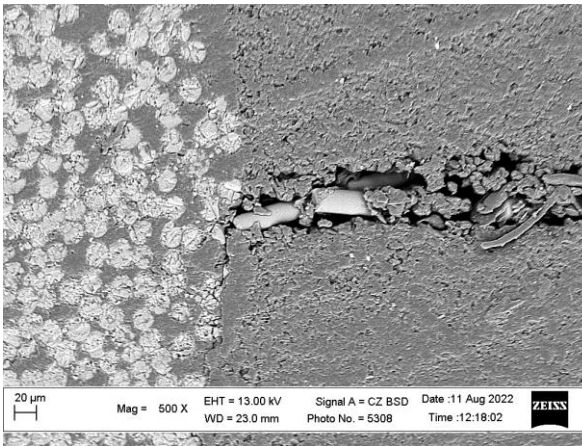
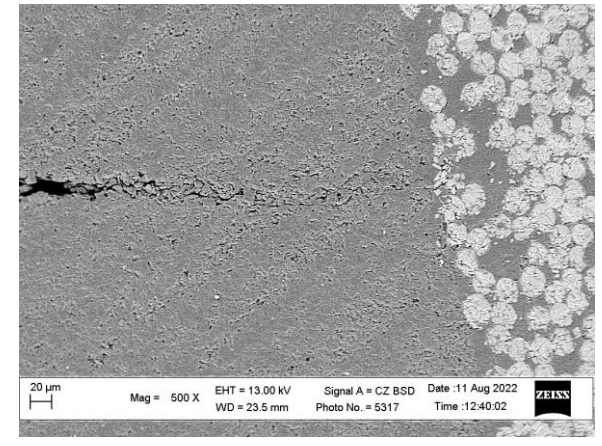
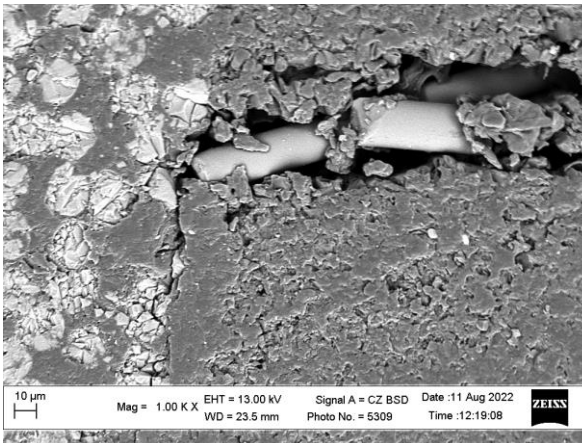
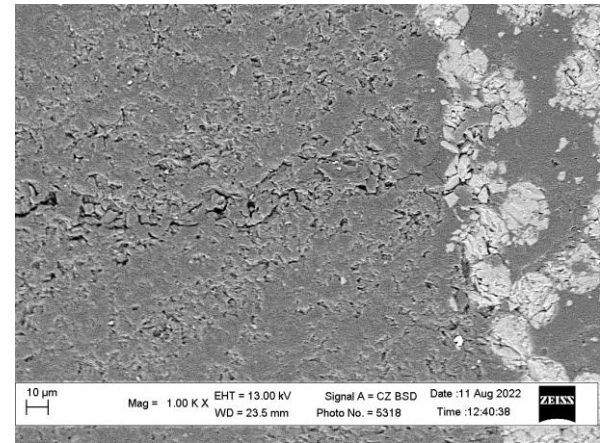
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 3.11 – Морфологічні особливості росту поздовжньої тріщини в околі межі розділу вуглепластикового осердя із зовнішньою скловолоконною оболонкою, виявлені на ділянці шліфа, орієнтованій на 9 (*a, в, д*) та 3 (*б, г, е*) годину циферблату умовного годинника.

Перш за все очевидно, що тріщина або не дійшла до межі розділу вуглепластикового осердя із зовнішньою скловолоконною оболонкою

(рис. 3.11 б, з, е), або, по крайній мірі, не перейшла в прошарок скловолоконної оболонки, призупинивши свій ріст на межі між ними (рис. 3.11 а, в, д). Причому за високої роздільної здатності видно, що тріщина, дійшовши до межі їх розділу почала поширюватися вздовж неї, підготовлюючи умови для їх відшарування (рис. 3.11д). Це ознака того, що адгезія обох шарів композитної штанги нижча ніж міцність її оболонки що запобігло поширенню в ній поздовжньої тріщини. Характерно, що скловолокна зовнішньої оболонки, які траплялися на шляху її поширення вздовж межі розділу, руйнувалися при цьому крихко. Ця особливість властива обом вершинам поздовжньої макротріщини, але для її лівої вершини, яка вже достатньо розкрилася, щоб розкрити пошкодження вздовж межі розділу обох шарів зразка-штанги, вона очевидніша.

В структурі скловолоконної зовнішньої оболонки зразка-штанги в околі межі її розділу з вуглепластиковим осердям чітко ідентифікували практично круглі в перерізі скловолокна, орієнтовані вздовж осі штанги (рис. 3.12). За невисокої роздільної здатності видно неоднорідність розташування цих волокон у перерізі оболонки (рис. 3.12а). За вищої роздільної здатності між волокнами ідентифікували прошарки з полімерного матеріалу (рис. 3.12б-г). Відзначили також нерівномірність заповнення полімерною зв'язкою прошарків між волокнами. Але найголовніше, що в більшості випадків спостерігали порушення зв'язків скловолокон з полімерними прошарками (рис. 3.12в, г). А окрім цього в перерізі багатьох з волокон виявили ознаки крихких відколів, які свідчать про практичне розсіпання скловолокон під дією циклічних навантажень. Зрозуміло, що через такі пошкодження в скловолоконному шарі оболонка штанги втратила здатність виконувати роль поверхнево-зміцненого шару. Адже попри макроцілісність штанги (на рівні виготовлення шліфа) у зміцненому шарі її робочого перерізу виникла велика кількість мікропошкоджень і тому руйнування у цьому перерізі було би лише справою часу.

Що стосується структури вуглепластикового осердя, то навіть після вакуумного напилювання на поверхню шліфа золота складові цієї частини перерізу зразка-штанги слабо виділялися на шліфі (рис. 3.13). Хоча за вищої

роздільної здатності виявили текстуру у вигляді смуг із гладких неструктурованих і більш рельєфних ділянок (рис. 3.13б, в). Лише в околі макротріщини в центральній частині вуглепластикового осердя можна було розрізнити складники структури завдяки розтріскуванню вздовж їх меж (рис. 13б-г).

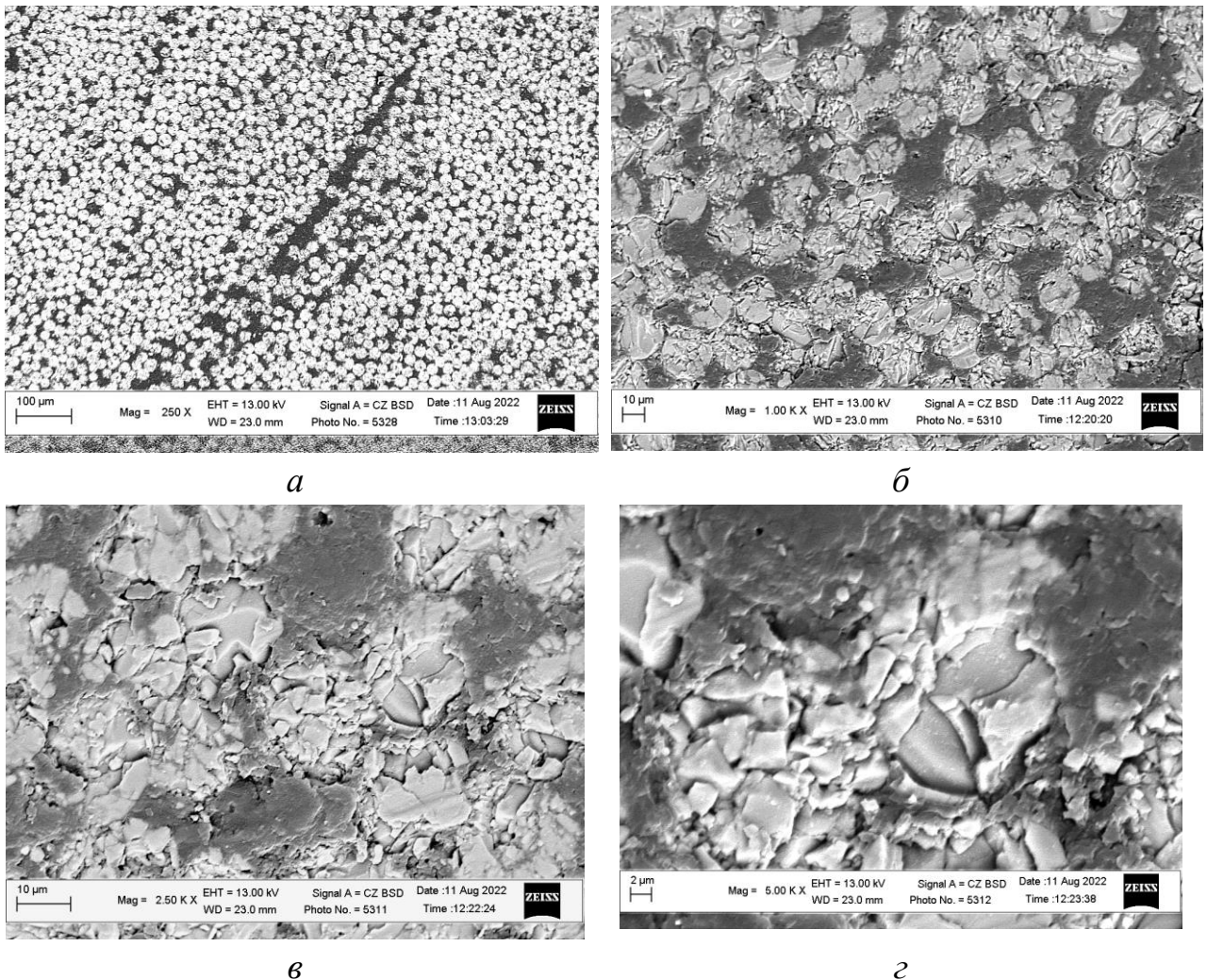


Рисунок 3.12 – Мікроструктура зовнішнього шару скловолоконної оболонки зразка-штанги в околі межі розділу з вуглепластиковим осердем за різних збільшень під зломом штанги.

Виглядало так, що розтріскування інтенсивніше відбувалося в межах смуг з вищою густиною армованих вуглецевих волокон. Завдяки наявності слідів розтріскування вздовж меж складників осердя на шліфі ці смуги ставали рельєфнішими.

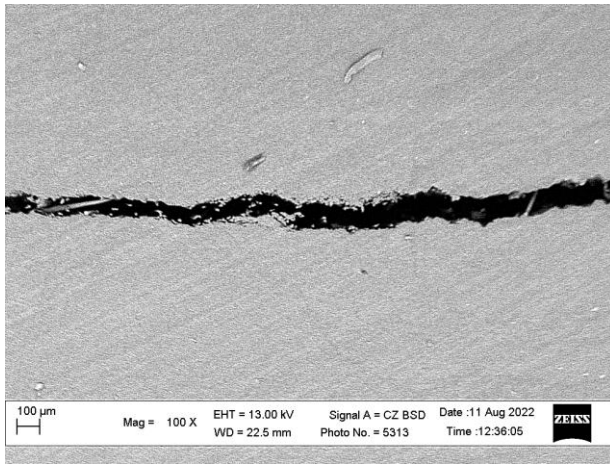
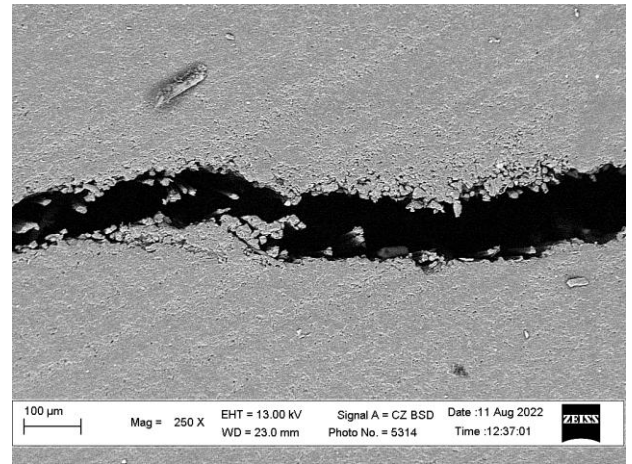
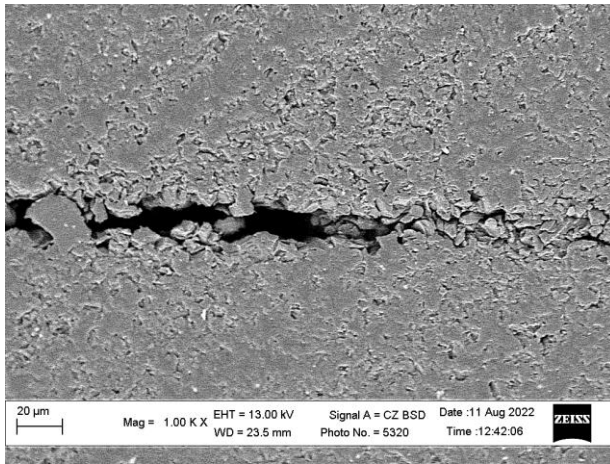
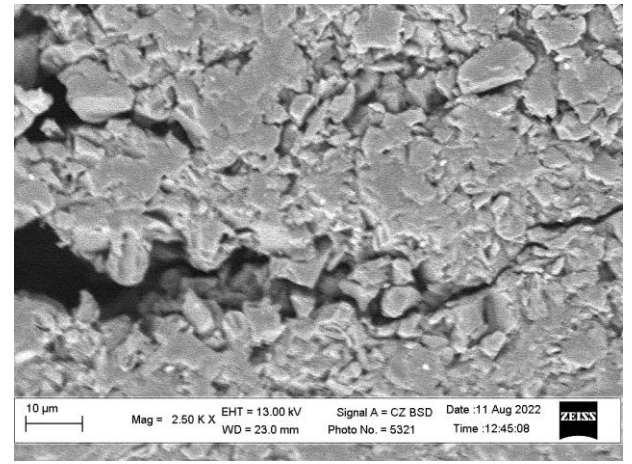
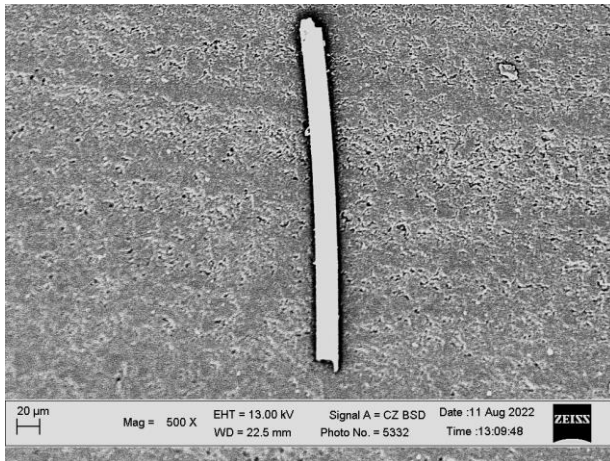
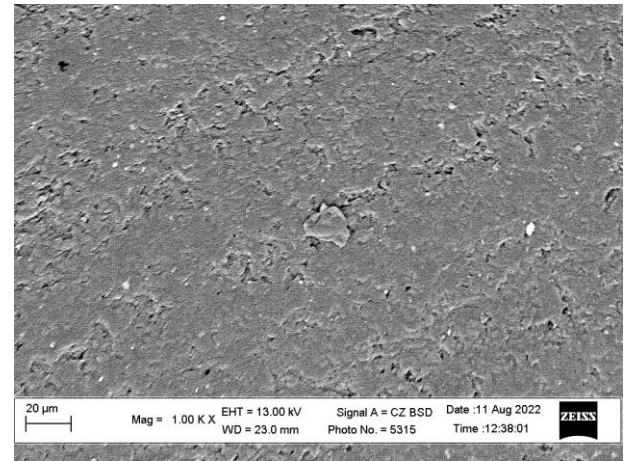
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 3.13 – Морфологія тріщин (*a-г*) та мікроструктура (*д, е*) в центрі вуглепластикового осердя композитної штанги за різних збільшень.

Проте, під час аналізу структуру вуглепластикового осердя на деякій віддалі від макротріщини, що пересікала його, практично значно важче було

встановити відмінності між смугами текстури в осерді (рис. 3.13д, е). Це вважали ознакою збереження на досить високому рівні адгезії компонентів вуглепластикового осердя штанги між собою і лише завдяки розтріскуванню вздовж їх меж вдавалось візуалізувати межі між ними.

На основі проведеного аналізу особливостей структури різних зон (оболонка і осердя) композитної штанги практично в околі її втомного зламу показали, що основний наслідок втомних навантажень проявився в скловолоконній оболонці штанги. Вважали важливим встановити закономірності появи структурних пошкоджень вздовж компонент обох шарів штанги у поперечному її перерізі за різних рівнів навантажень. І використана схема навантаження давала змогу здійснити це, провівши дослідження структури на шліфах, розташованих на різній віддалі від втомного зламу штанги.

Для візуалізації пошкоджень було важливо також проаналізувати структурні особливості композитної штанги на її поздовжньому шліфі.

3.2.3 Мікроструктура двохшарової композитної штанги в її поздовжньому перерізі в околі втомного зламу

Аналіз поздовжнього шліфа композитної штанги виявив особливості орієнтування скляних та вуглецевих волокон в її оболонці та осерді (рис. 3.14). Довжина скляних волокон досягала 500 мкм. В околі втомного зламу на поперечному шліфі штанги скловолокна в оболонці були практично зорієнтовані вздовж осі штанги (рис. 3.9, рис. 3.10). Загалом така їх орієнтація зберігалась також на більшій частині поздовжнього перерізу оболонки (рис. 3.14а), де зафіксували скловолокна, що практично паралельними рядами чітко виділялися на фоні полімерної матриці (рис. 3.14б, в). Крім того у цьому ж перерізі виявили ділянку з іншими орієнтаціями скловолокон, яка прилягала до вуглепластикового осердя. Як наслідок, на поверхні шліфа спостерігали округлі або овальні перерізи паралельних рядів скловолокон (рис. 3.14г, д). Ряди волокон

у вуглепластиковому осерді фіксувалися лише за вищої роздільної здатності і їх орієнтація відносно осі штанги відповідала поздовжній (рис. 3.14e).

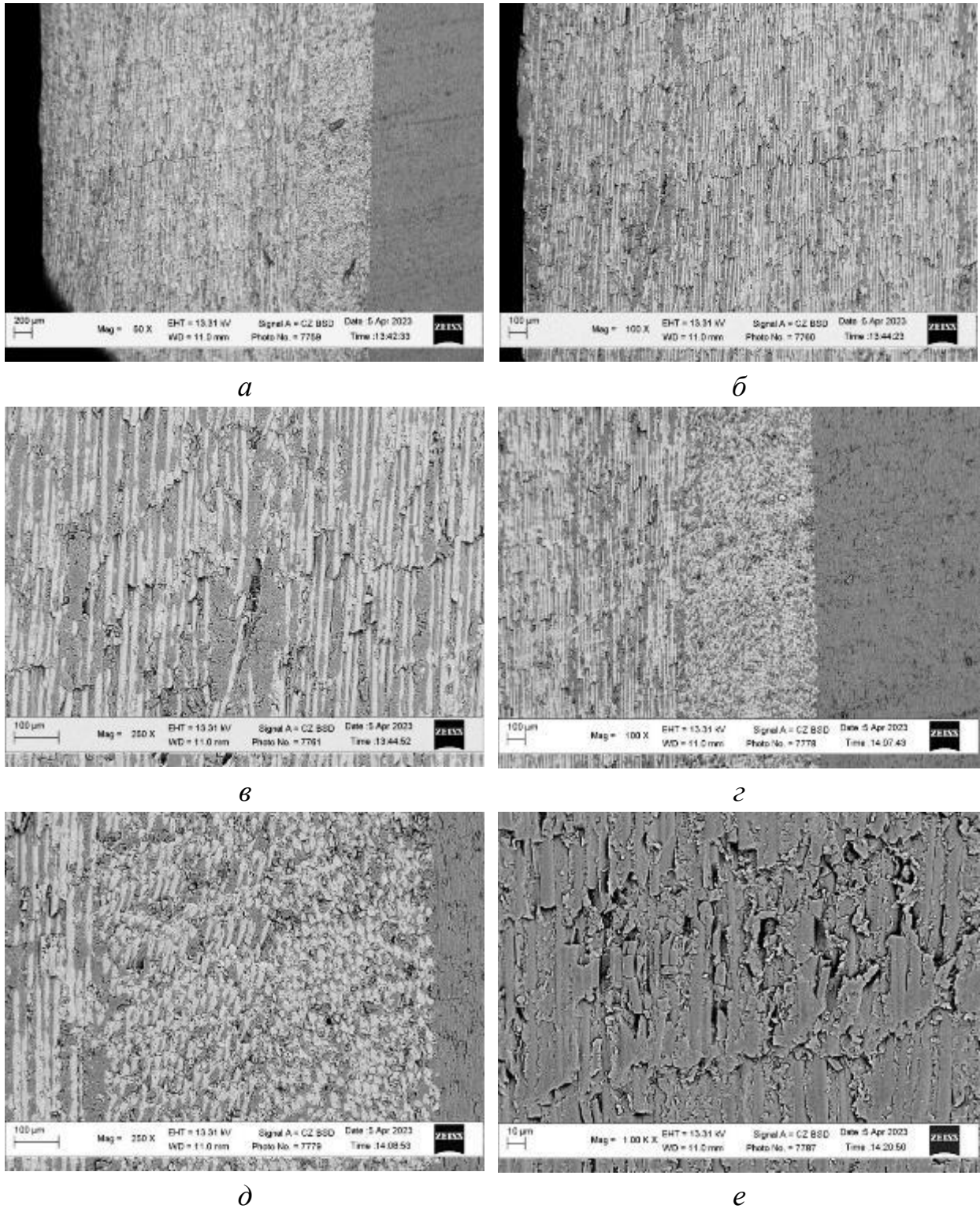


Рисунок 3.14 – Орієнтація армувальних волокон у поздовжньому перерізі композитної штанги.

Пошкодження скляних волокон в оболонці штанги детальніше проаналізували за вищої роздільної здатності (рис.3.15 та рис. 3.16). Звернуло на себе увагу те, що навіть на тій ділянці оболонки, де за нижчої роздільної здатності ряди скляних волокон видавалися паралельними, за більших збільшень чітко видно їх хоч і незначне, але розорієнтування одне відносно одного та нерівність товщини прошарків полімеру між ними (рис. 3.15а, б). В околі бічної поверхні штанги кількість пошкоджених відколом волокон і відшарувань між ними і полімерною матрицею була більшою (рис. 3.15в, д) ніж у глибших прошарках скло волоконної оболонки (рис. 3.15г, е). Пошкодження і самих скляних волокон і полімерних прошарків між ними стали ще очевиднішими за найвищої роздільної здатності мікроскопа (рис. 3.16). Відзначили пористу структуру полімерних прошарків (рис. 3.15д, е та рис. 3.16), що негативно вплинуло на їх адгезію до скляних волокон і полегшило їх відшарування одне від одного за дії циклічних навантажень. Більше того через наявність такої перфорованої порожнинами структури в полімерній матриці пришвидшилось поширення руйнування вглиб оболонки за появи вже перших надривів скляних волокон у її поверхневих шарах.

Таким чином завдяки такій структурі полімерної зв'язки легше формувалася нормально орієнтована до діючих напружень втомна тріщина і водночас легше відбувалось відшарування поверхневих шарів оболонки від штанги. За незмінних прикладених до штанги зовнішніх напружень зменшення її нетто перерізу супроводжувалося надмірним навантаженням ослабленого тріщиною перерізу штанги і подальшим навіть частковим відшаруванням скло волоконної оболонки, що пришвидшуватиме її остаточне руйнування. Звідси прийшли до висновку, що штанга як елемент конструкції (колони) зберігатиме свою роботу здатність до тих пір, поки скловолокна і полімерна матриця будуть єдиним цілим композитом, у якому зв'язка матриця армована міцними, але водночас крихкими волокнами. Порушення їх зв'язку і формування нормально орієнтованої втомної тріщини від бічної поверхні штанги сприяло локалізації

деформівних процесів у найслабшому перерізі штанги і пришвидшенню її руйнування.

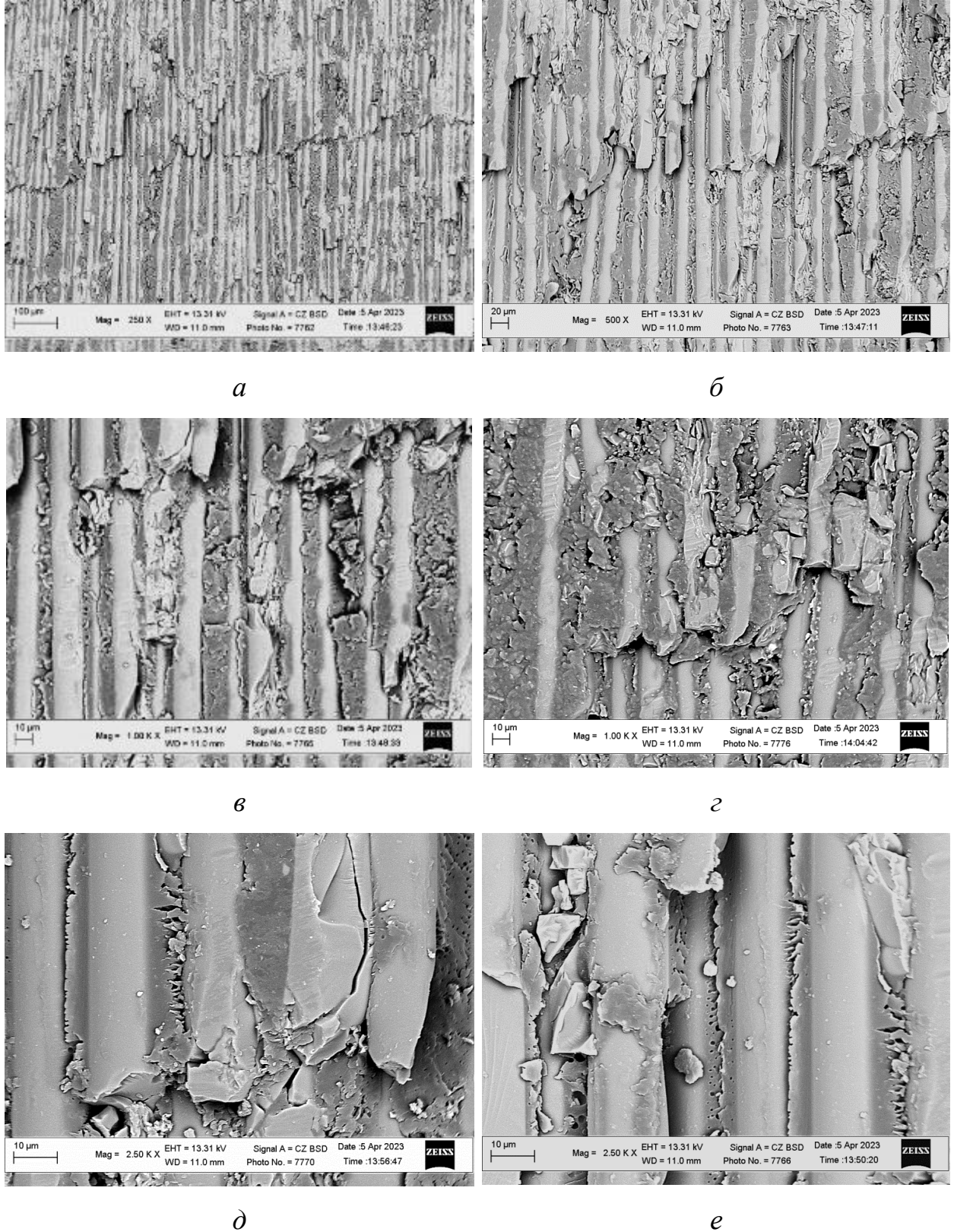


Рисунок 3.15 – Мікроструктура скло волоконної оболонки штанги у її поздовжньому перерізі за вищої роздільної здатності.

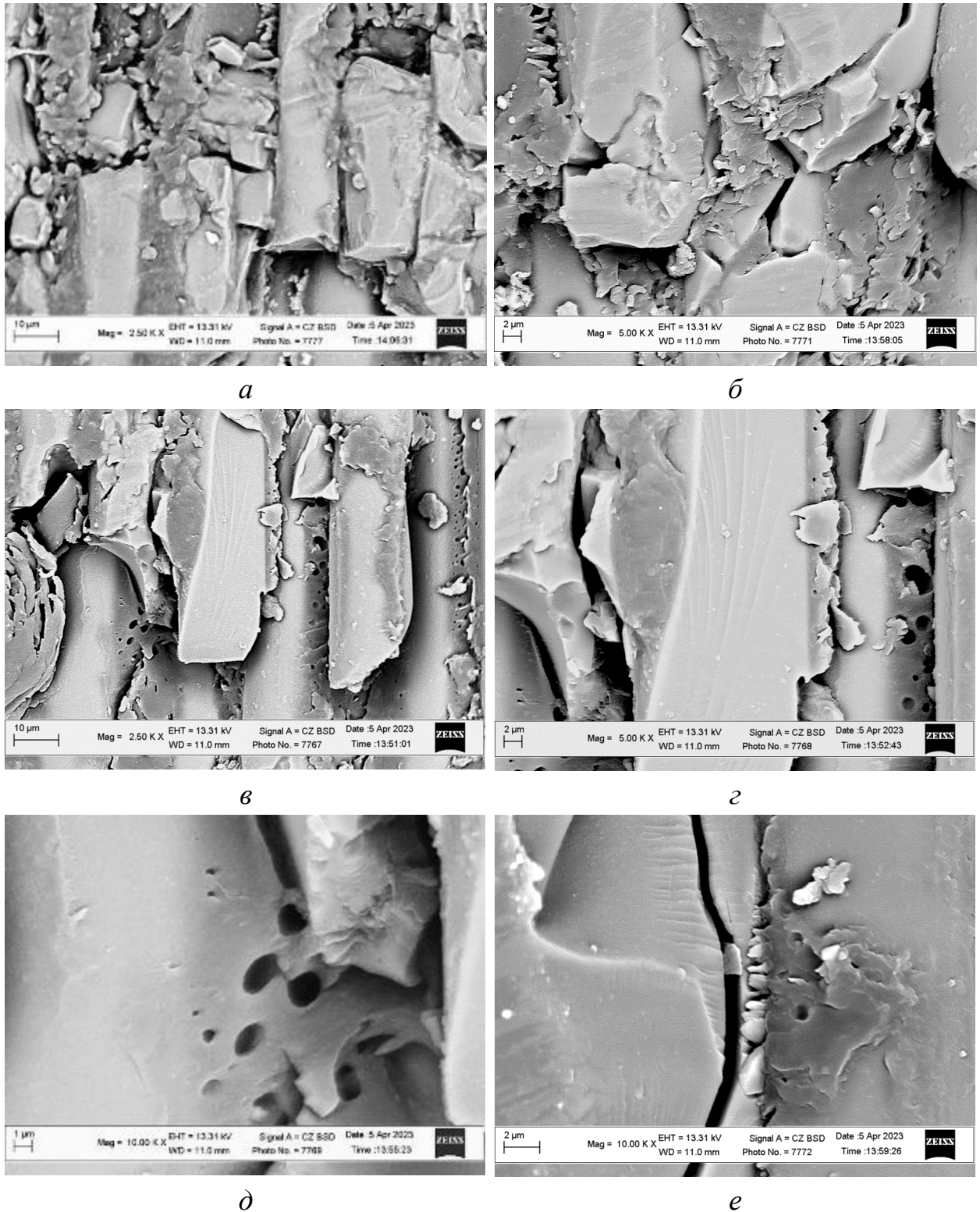


Рисунок 3.16 – Особливості порушення адгезії між скляними волокнами в оболонці штанги та полімерною матрицею у її поздовжньому перерізі за найвищої роздільної здатності в околі бічної поверхні штанги.

Оскільки у поздовжньому перерізі штанги виявили зміну орієнтації скляних волокон в околі переходу до осердя (рис. 3.17а, б), то важливо було

оцінити роль такої сприятливої для поширення руйнування орієнтації волокон на його поширення в оболонці.

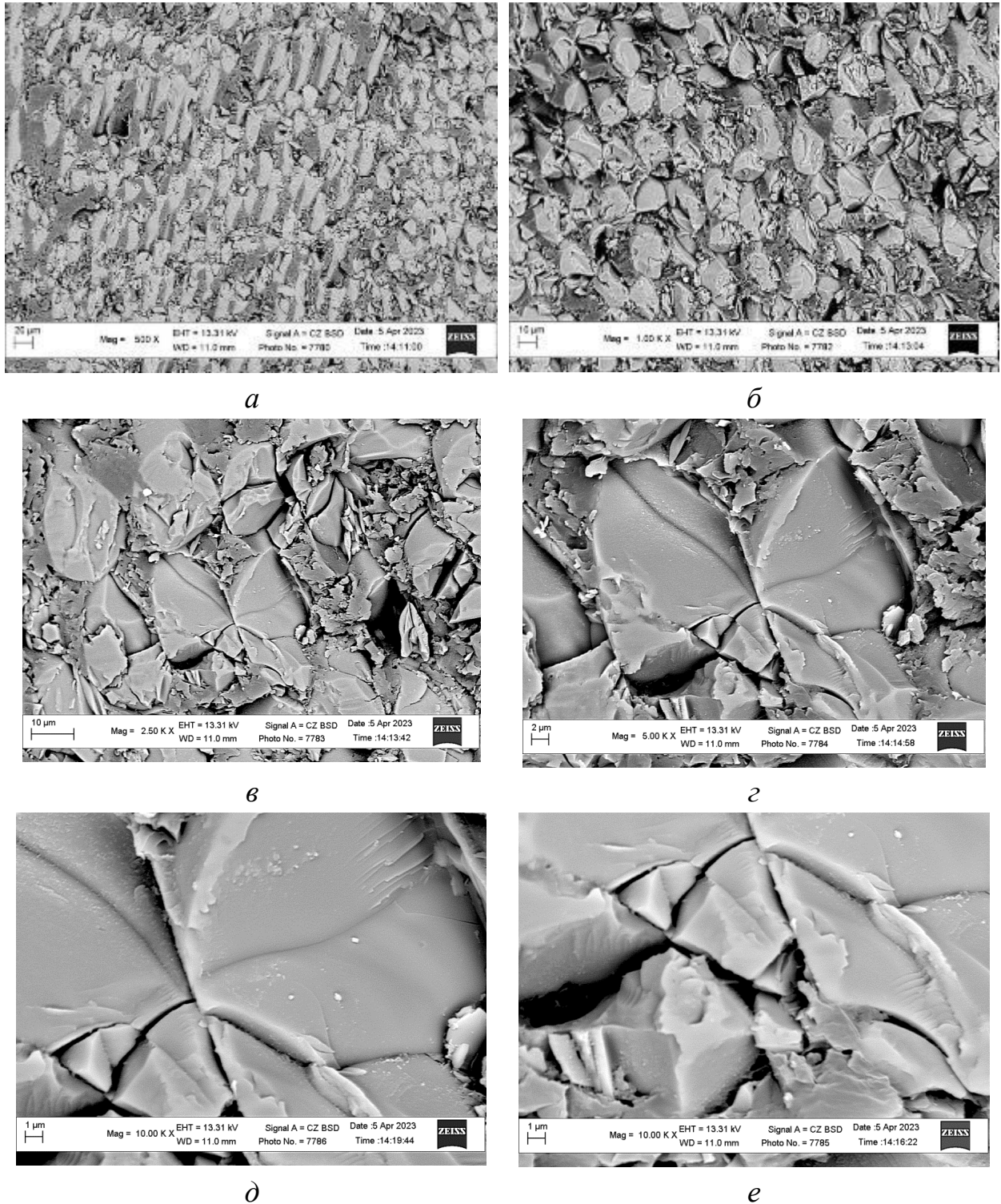


Рисунок 3.17 – Особливості руйнування скляних волокон, розташованих у площині майже паралельній поверхні зламу штанги і орієнтованих приблизно поперек осі штанги у тангенціальному напрямі, які виявили на поздовжньому шліфі штанги на ділянці скло волоконної оболонки поблизу межі з вуглепластиковим осердям.

Оскільки у поздовжньому перерізі штанги виявили зміну орієнтації скляних волокон в околі переходу до осердя (рис. 3.17а, б), то важливо було оцінити роль такої сприятливої для поширення руйнування орієнтації волокон на його поширення в оболонці. Отримані результати показали, що практично всі скляні волокна, що аналізували на цій ділянці зламу мали чіткі ознаки крихкого руйнування шляхом відколу (рис. 3.17). Оскільки зона розташування скляних волокон тангенціальної орієнтації близька до площини руйнування і прилягала до межі з осердям, то напруження, які діяли за випроб на втому на цій глибині від бічної поверхні штанги, виявились достатніми для руйнування цих волокон. І лише прошарки полімерної матриці з ознаками в'язкого руйнування за механізмом зсуву продовжували чинити певний опір поширенню руйнування (рис. 3.17в, г).

Таким чином встановили, що не залежало від орієнтації скляних волокон в оболонці композитної штанги вони руйнувались і подрібнювались, тому від їх руйнування залежала здатність штанги витримувати напруження від циклічних навантажень.

Щодо осердя штанги то його складові руйнувались за в'язким механізмом (рис. 3.18). Вуглецеві волокна виявили типові ознаки розшарування, а полімерна матриця в'язкого зсуву (рис. 3.18а, в). З наближенням аналізованої ділянки осердя до поздовжньої макротріщини в ньому кількість розшарувань між вуглецевими волокнами і полімерною матрицею на поздовжньому шліфі штанги істотно зростала (рис. 3.18б, г, д). Внаслідок їх декогезії і полімерна зв'язка, і вуглецеві волокна композитного осердя подрібнювалась, що було прямою ознакою значних циклічних деформацій на ділянках, що прилягали до тріщини. Зрозуміло, що таке подрібнення складових осердя виникало на заключному етапі руйнування штанги. Разом з тим не ці особливості є визначальними для забезпечення міцності штанг, а, отже, не вони визначають їх ресурс за

експлуатації в умовах кругового згину. Все таки оболонка штанг є визначальною за втоми при таких умовах.

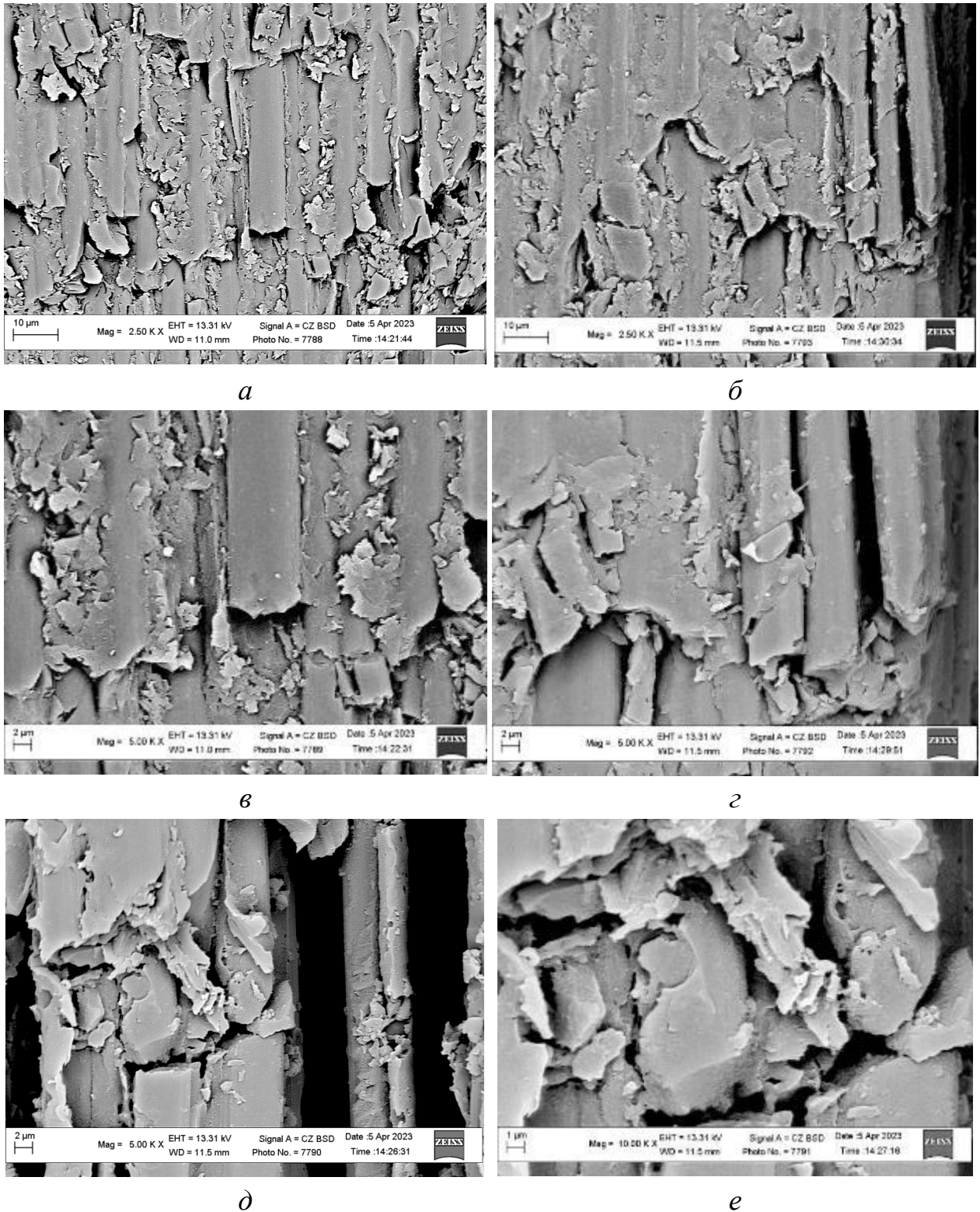


Рисунок 3.18 – Особливості пошкодження вуглецевих волокон, орієнтованими приблизно вздовж осі штанги, і полімерної зв'язки, які виявили на поздовжньому шліфі штанги на ділянці її вуглепластикового осердя.

3.2.4 Структура в поперечних перерізах композитної штанги на різній віддалі від втомного зламу

За прикладених напружень $\sigma = 175$ МПа аналізований зразок зруйнувався після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження. Відповідно до схеми навантаження максимальний момент згину був у перерізі поблизу його зламу. Щоб встановити вплив рівня згинальних напружень на специфіку виникнення структурних пошкоджень в композитній штанзі порівняли структурні особливості на поперечних шліфах композитної штанги на ділянках, розташованих на різній віддалі від поверхні зламу зразка після його випроб на втому. При цьому аналізували структуру і характер пошкоджень в оболонці, в якій полімер був армований поздовжніми паралельними рядами скловолокон, і в осерді, в якому для армування були використані по різному орієнтовані вуглецеві волокна. Пошкодження, що сформувалися в штанзі під час втомних випробувань, аналізували в перерізі поблизу площини дії найвищих напружень згину (на віддалі 10 мм від зламу) та на віддалі 150 мм від зламу, де ці напруження були значно нижчими (згідно епюри розподілу напружень за схеми навантаження консольним згином). Під час аналізу враховували і поверхневі дефекти в оболонці штанги, і прояви декогезії окремих волокон обох типів від полімерної матриці, і наявність внутрішнього розтріскування через їх декогезію в межах оболонки і осердя.

Відзначили, що незалежно від розташування по довжині композитного зразка на обох поперечних шліфах штанги спостерігали типову неоднорідність заповнення оболонки скловолокнами, яка з'являлася на шліфах у вигляді макросмуг з полімера, в межах яких скловолокон або взагалі не було, або ж густина їх розташування була значно меншою (рис. 3.19а-г). Саме в околі цих збіднених на скловолокно смуг спостерігали істотне відшарування волокон від полімерної матриці (рис. 3.19в, д, е), яке було значно більшим на шліфі, розташованому під зломом зразка (рис. 3.19д). Причому на шліфі,

розташованому на віддалі 10 мм від поверхні зламу, таке розтріскування спостерігали практично по всій товщині скло волоконної оболонки (рис. 3.19д).

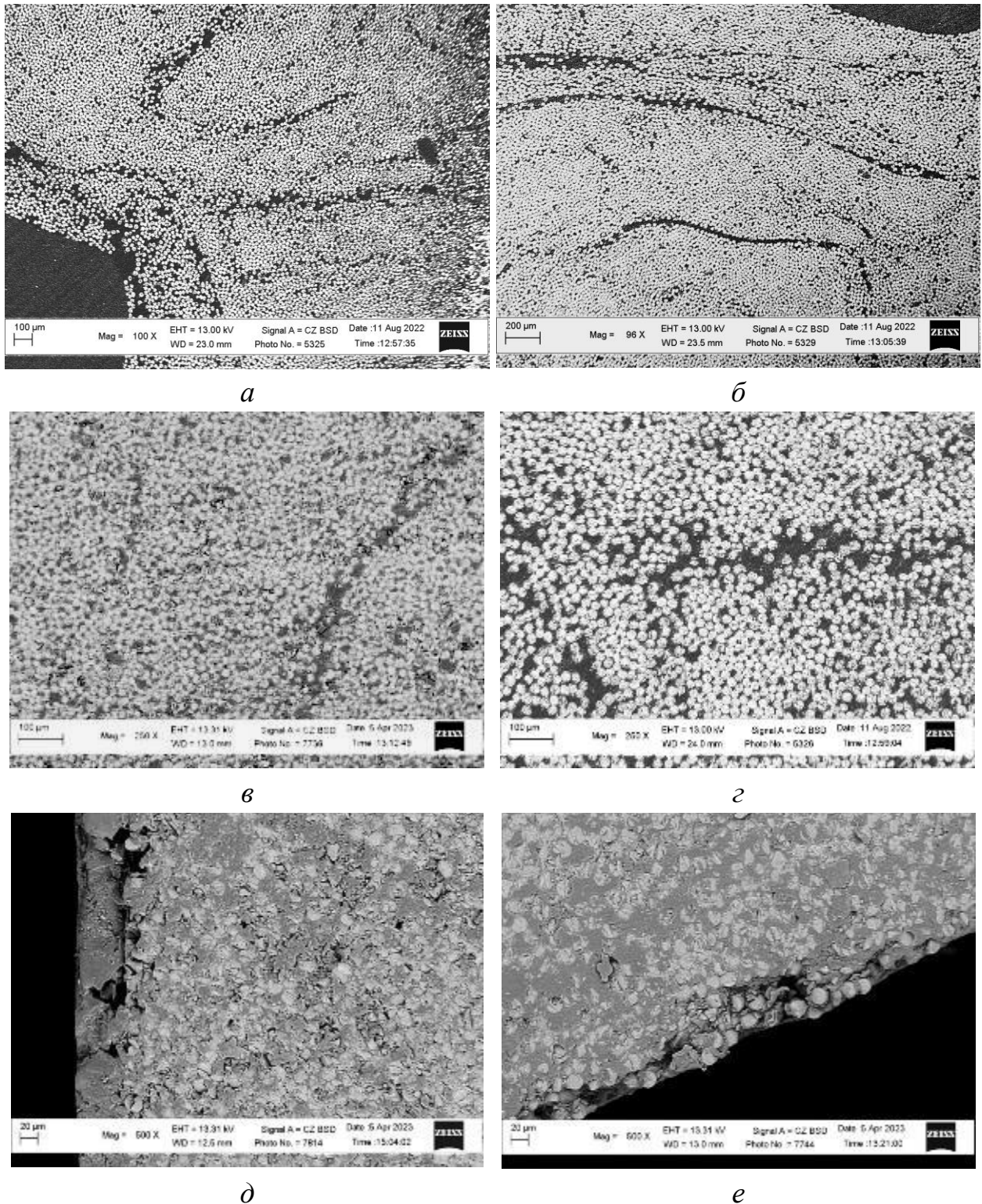


Рисунок 3.19 – Мікроструктура поверхневої скло волоконної оболонки композитної штанги за невисокої роздільної здатності, зафіксована на віддалі 10 (*a, в, д*) та 150 (*б, г, е*) мм від поверхні зламу зразка, випробуваного на втому за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованого після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

На ближчому до зламу шліфі зафіксували також початкові етапі поширеної декогезії зовнішніх шарів оболонки від їх внутрішніх шарів (рис. 3.19*d*), що розглядали як ознаку слабкої їх когезії. Тоді як на віддалі 150 мм розтріскування на шліфі виявили в основному лише в околі зовнішньої бічної поверхні зразка (рис. 3.19*e*). Крім того на цьому рівні вдалось зафіксувати зародження втомної тріщини, поверхня якої збереглася, бо була розташована нижче поверхні шліфа. Тому верхній берег тріщини був усунутий під час виготовлення шліфа, а нижній – залишився на ньому у вигляді сегменту зламу.

Аналіз виявлених поверхневих пошкоджень в скло волоконній оболонці за вищої роздільної здатності дає змогу розкрити роль і волокон, і полімеру у руйнуванні (рис. 3.20). Відшарування в скло волоконній оболонці найчіткіше проявились на шліфі поблизу поверхні зламу, де напруження в перерізі зразка були значно вищими ніж на віддалі від неї (рис. 3.20*a, в, d*). Руйнуванням самих скловолокон в поверхневому шарі зразка знеміцнювало його і сприяло зародженню втомної тріщини. Очевидно також, що значну роль у формуванні цих відшарувань відіграли між волоконні прошарки полімеру через їх відшарування від скляних волокон (рис. 3.20*a, в*). Через це у поверхневому шарі зразка виникали сприятливі умови для формування зсуву у полімерній матриці (рис. 3.20*d*). Адже відомо, що зародження втомних тріщин відбувається в основному шляхом зсувів у її вершині.

Щодо зародження від бічної поверхні зразка нормально орієнтованої втомної тріщини, то не дивлячись на те, що її зафіксували на віддалі 150 мм від зламу (рис. 3.20*б, г, e*), умови для її утворення можуть виникати у будь-якому перерізі зразка. Проте, по-перше, зародження втомної тріщини від поверхні зразка як правило відбувається в тих зонах, де мінімальна густина скло волокон в поверхневому шарі, а це чисто випадкова подія. А, по-друге, потрапляння нормально орієнтованої втомної тріщини в площину шліфа також є чисто випадковим збігом. Проте імовірність її фіксації буде знижуватися із

збільшенням віддалі між поверхнею руйнування та площиною аналізованого шліфа.

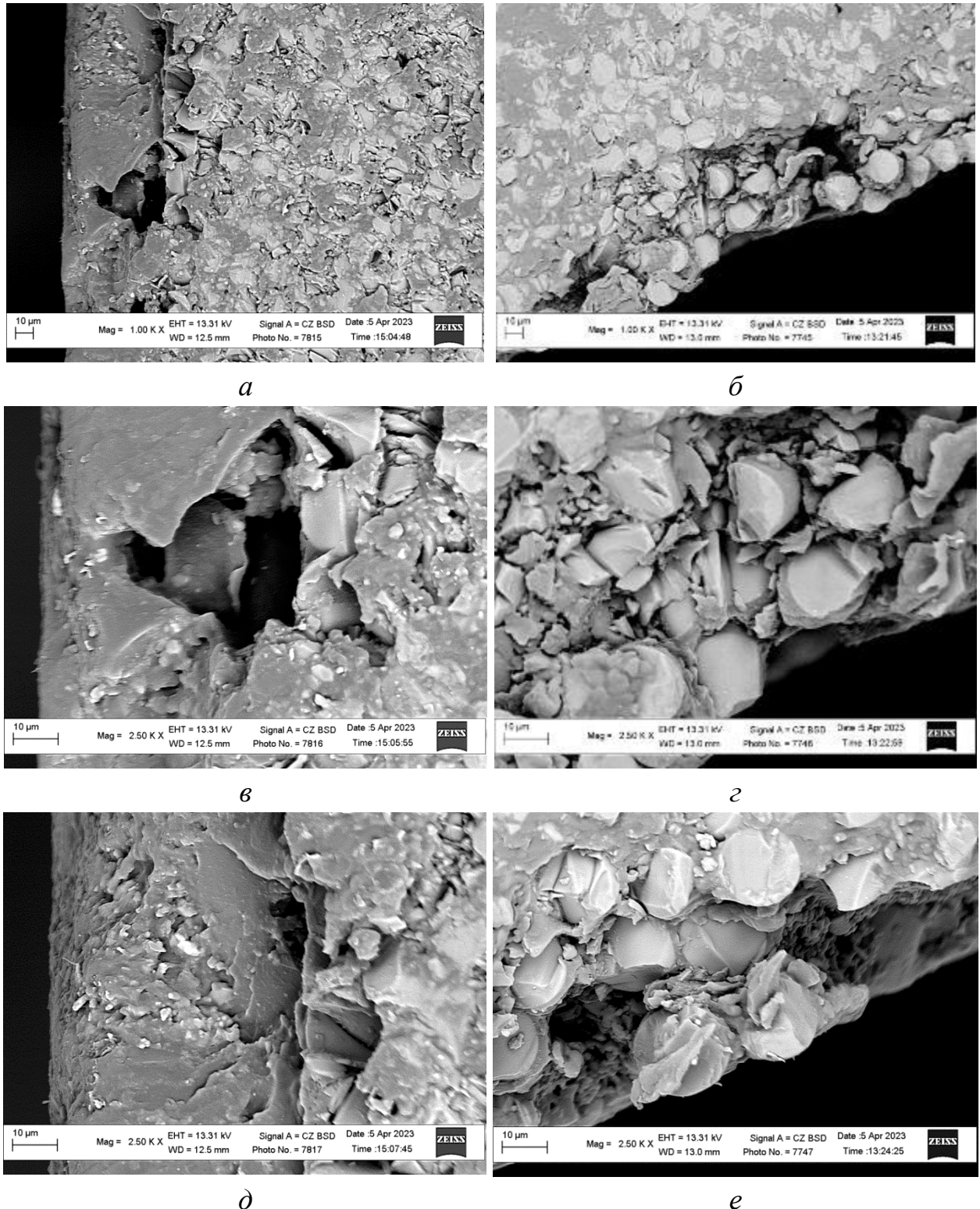
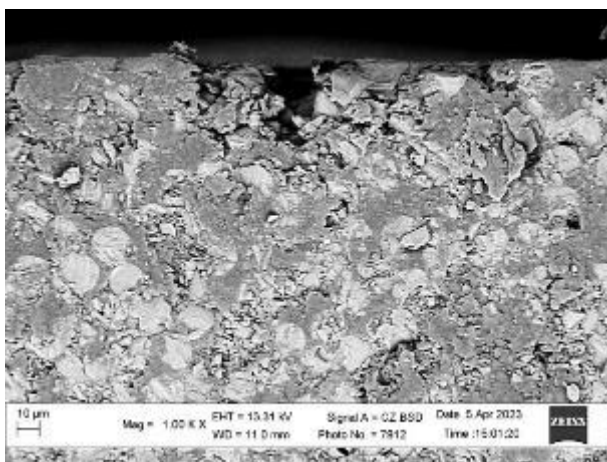


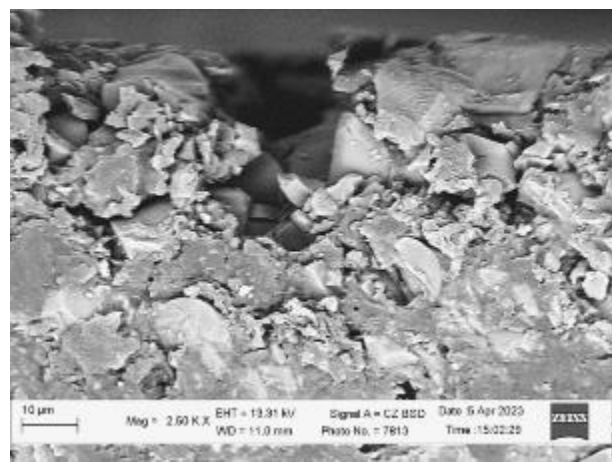
Рисунок 3.20 – Мікрособливості початкового етапу втомного руйнування скло волоконної оболонки композитної штанги, зафіксовані на віддалі 10 (*a*, *в*, *д*) та 150 (*б*, *г*, *е*) мм від поверхні зламу зразка, випробуваного на втому за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнуваного після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

Водночас втомне руйнування у будь-якому з поперечних перерізів зразка відбуватиметься за таким алгоритмом: руйнування скло волокон на ділянках з критично низькою для рівня напружень у цьому перерізі їх густиною → відокремлення волокон від полімерної матриці → руйнування полімерної матриці починаючи від прилеглої до бічної поверхні зразка і в перетинках між скловолокнами за в'язким механізмом витягування і зсуву. Як наслідок на зламі з'являються відколи скло волокон, перемережовані шматками розірваного полімеру (рис. 3.20г, е).

Окрім описаних варіантів поверхневих ушкоджень зразків на шліфі, розташованому поблизу його зламу, виявили також тріщини, які зароджувалися від бічної поверхні зразка і поширювались всередину його перерізу (рис. 3.21). Їх вважали слідом поздовжніх тріщин, які поділяли відшаровані поверхневі шари на окремі смуги, полегшуючи їх остаточне відшарування. Як наслідок, відшаровані поверхневі шари зменшували нетто переріз зразка по всій довжині цих поздовжніх тріщин і його опір зовнішнім напруженням знижувався. І чим глибше проникали поздовжні тріщини всередину перерізу зразка, тим нижчою ставала його утомна міцність (з урахуванням залишкового перерізу після відшарування зовнішнього скло волоконного шару).



а



б

Рисунок 3.21 – Початковий етап зародження руйнування від бічної поверхні скло волоконної оболонки композитної штанги, зафіксований на поперечному шліфі на віддалі 10 мм від поверхні зламу зразка, випробуваного на втому за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованого після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

Особливості структури обох варіантів шліфів композитної штанги в околі поверхні втомного зламу показані на рис. 3.22.

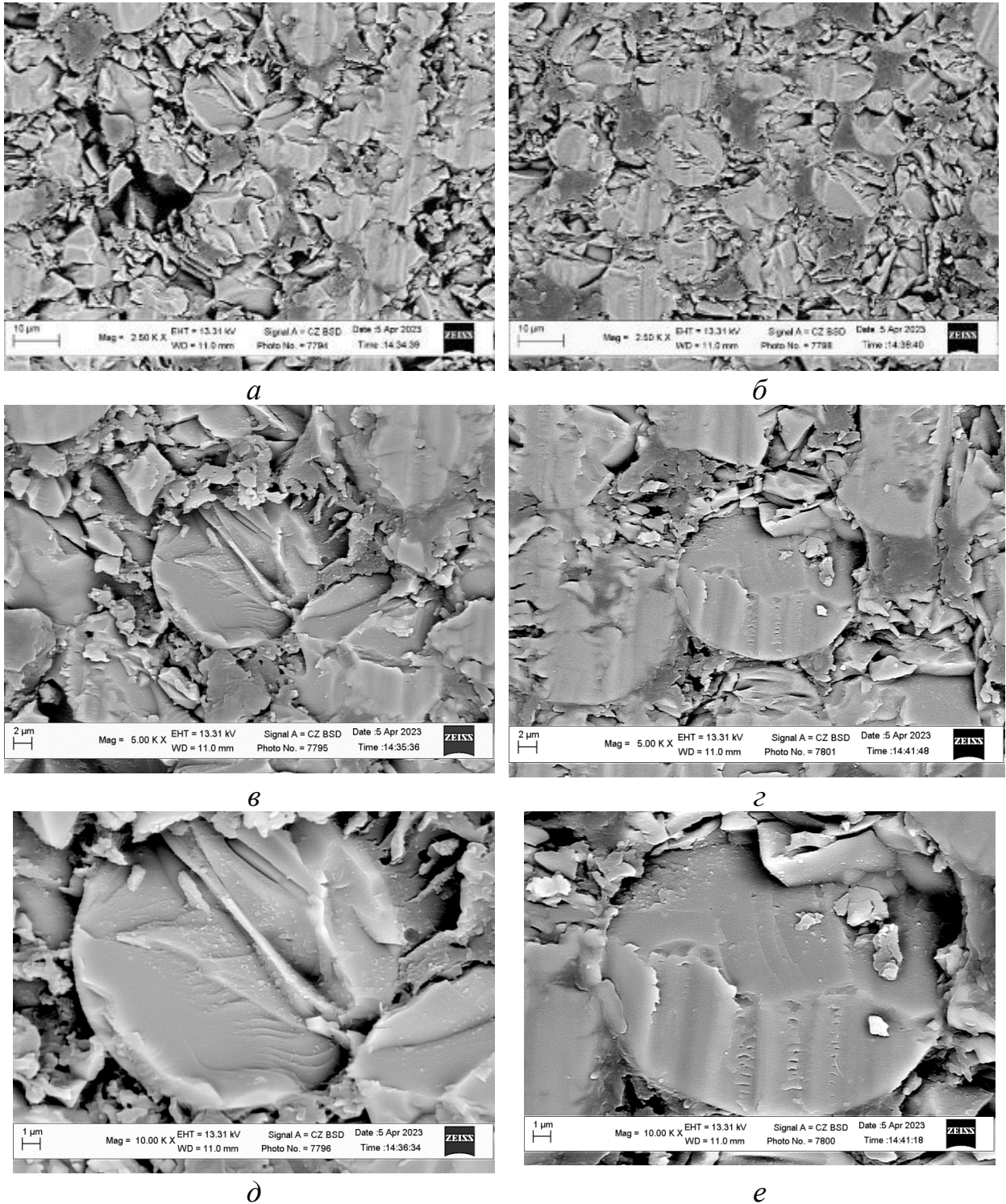


Рисунок 3.22 – Мікроструктурні особливості шліфів в центрі перерізу оболонки композитної штанги, зафіксовані на її поперечному шліфі, розміщеному на віддалі 10 (*a*, *c*, *e*) та 150 (*b*, *d*, *f*) мм від поверхні зламу зразка, випробуваного на втому за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованого після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

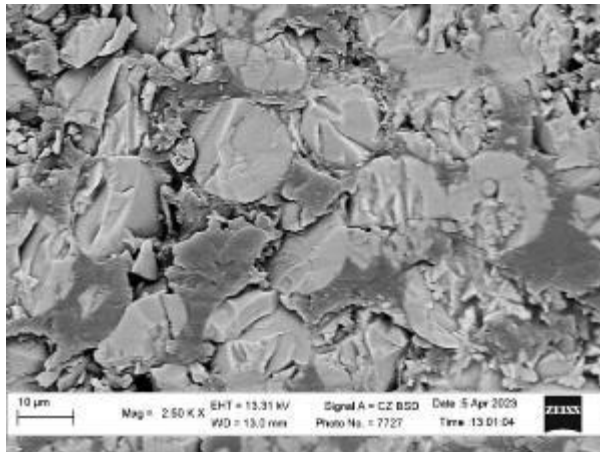
Загалом рельєф на поверхнях самих скловолокон виявився практично ідентичним, сформованим за механізмом відколу. Проте виявили відмінність зламів за кількістю відшарувань скловолокон від полімерної матриці. Причому чим ближче до втомного зламу був розташований шліф, тим більша частка волокон виявилась відшарованою від матриці (рис.3.22).

Таку саму тенденцію виявили також при аналізі структури по товщині оболонки (рис. 3.23 та рис 3.24). Про це свідчили великі за площею і неушкоджені ділянки полімеру між волокнами (рис. 3.23б, г, е). Отже, густина міжфазних ушкоджень вздовж меж волокон з полімером була вищою по всій товщині скло волоконної оболонки на ближньому до втомного зламу зразка шліфі порівняно із зафіксованою на дальньому шліфі.

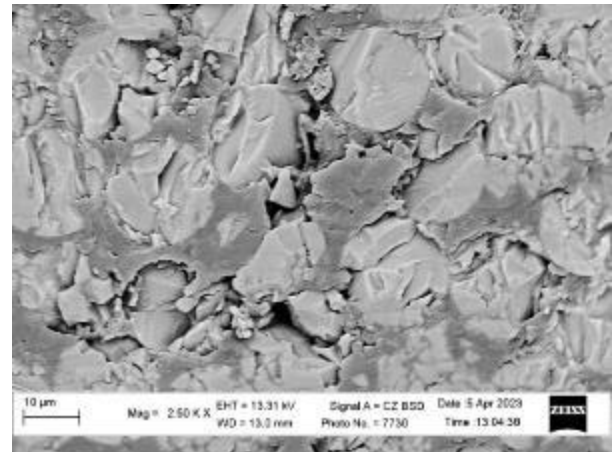
Як важливе відзначили також, що дослідження шліфів за високої роздільної здатності виявили ще одну особливість пошкодженості в скловолоконній оболонці композитної штанги. Ця особливість пов'язана з самим руйнуванням практично всіх скловолокон у поперечному перерізі штанги на всіх проаналізованих рівнях і по довжині зразка (на різній віддалі від втомного зламу) і по товщині шару оболонки. Скоріш за все за випроб при такому рівні напружень руйнування самих волокон відбувалося ще до їх відшарування від полімерної матриці. Адже майже на всіх волокнах (навіть на не відшарованих від матриці) виявляли крихкі відколи. Вважали, що виникали вони не під час поліровки шліфів, оскільки їх спостерігали не лише в площині шліфів, але й у його заглибинах з розвальцьованим по їх периметру полімером (рис. 3.23а, в). Попри те, що виступи звикло згладжуються під час поліровки, але на виявлених відколах гребені все ще залишалися доволі чіткими (рис. 3.20в, д).

Зрозуміло, що в міру зростання кількості зруйнованих волокон зміцнювальний ефект поверхневого шару (оболонки) штанги зменшувався. Поверхні зламу зруйнованих волокон продовжували пошкоджуватися внаслідок їх контактування в кожному циклі навантаження штанги з утворенням дрібних відколотих часточок. Причому найінтенсивніше це відбувалося у поверхневих шарах скло волоконної оболонки штанги (рис. 3.20 – рис. 3.22), менш інтенсивно

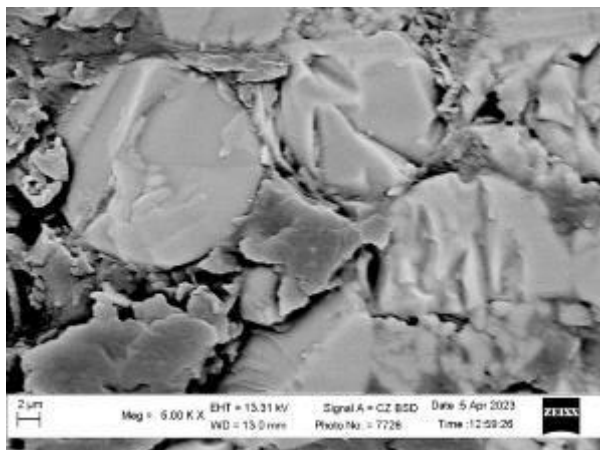
– у серцевині її перерізу (рис. 3.23) і найменш інтенсивно – в околі її переходу до вуглепластивого осердя (рис. 3.24). Між обома поверхнями зламу ці відколоті часточки подрібнювались (як між жорнами) і сприяли руйнуванню м'якої полімерної матриці і відшаруванню волокон від неї.



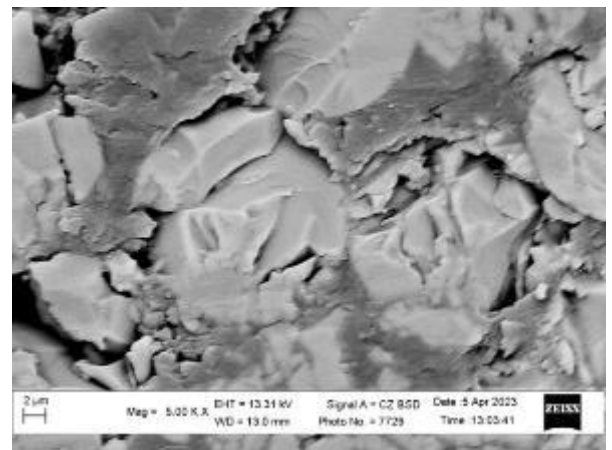
а



б



в



г

Рисунок 3.23 – Мікроструктурні особливості шліфів в центрі перерізу оболонки композитної штанги, зафіксовані на її поперечному шліфі, розміщеному на віддалі 10 (а, в) та 150 (б, г) мм від поверхні зламу зразка, випробуваного на втому за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованого після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

3.2.5 Вплив напружень в аналізованому перерізі композитної штанги на міру пошкодженості її оболонки

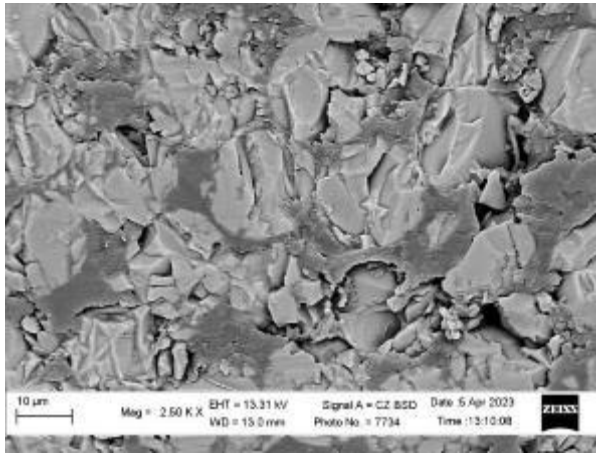
Кількісний аналіз структурного показника пошкодженості K (за кількістю скло волокон на одиниці площі аналізованих шліфів, які мали ознаки відшарування від полімерної матриці) дав можливість оцінити його зв'язок з розрахованим рівнем напружень σ , який діяв у відповідному перерізі композитного зразка під час його випроб на втому (рис. 3.24).

Для визначення показника пошкодженості K на кожному з шліфів на віддалі L від зламу аналізували не менше 15 цифрових зображень структури композитної штанги на кожному з трьох рівнів по товщині скло волоконної оболонки штанги (біля зовнішньої її поверхні, в центрі перерізу скло волоконної оболонки та в околі переходу до вуглепластикового осердя) і знаходили середньоарифметичне значення кількості волокон з пошкодженнями вздовж їх меж з матрицею на кожному з аналізованих рівнів. При цьому розкид отриманих даних не перевищував 5-7%.

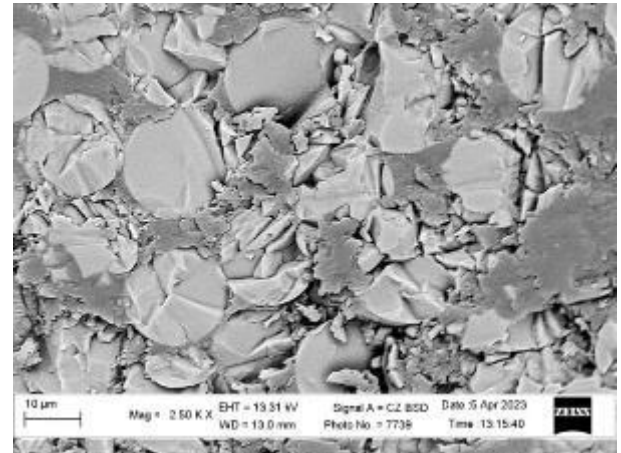
За результатами кількісного структурного аналізу встановили, що середня густина скло волокон у поперечному перерізі шліфів становила 2130 мм^{-2} . З них на шліфі біля втомного зламу в околі зовнішньої поверхні зразка, де напруження були найвищими, сліди відшарування у вигляді вторинних тріщин вздовж меж скловолокон з полімерною матрицею виявили на 66,5% всіх волокон, що виявляли на одиниці площі шліфа, а на шліфі, розташованому на віддалі 150 мм від втомного зламу – 33% відповідно. Додатково проаналізували ще й шліф, розташований на віддалі 75 мм від зламу і виявили що кількість відшарованих від матриці волокон у цьому випадку досягла 41%.

Таким чином фрактографічний показник пошкодженості K скло волоконної оболонки, визначений в околі бокової поверхні зразка, однозначно знижувався в міру віддалення від втомного зламу штанги, де рівень напружень досягав максимального значення, і, відповідно, зменшувалась кількість скловолокон, адгезія яких з матрицею порушувалася (рис. 3.25). Якісно подібну

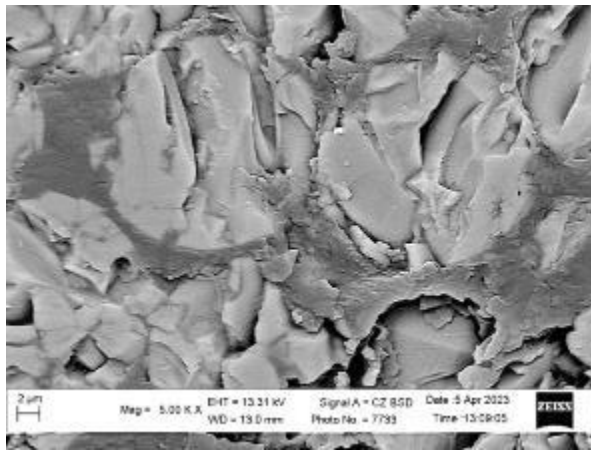
залежність $K - L$ (або $K - \sigma$) підтвердили і для центральної частини поперечного перерізу скло волоконної оболонки, і в околі її межі з вуглепластиковим осердям



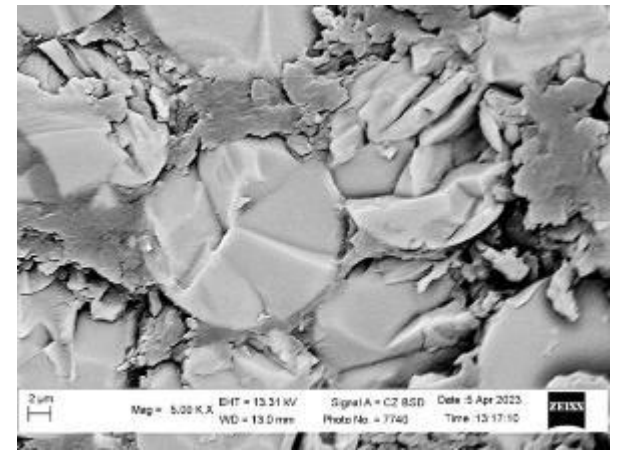
а



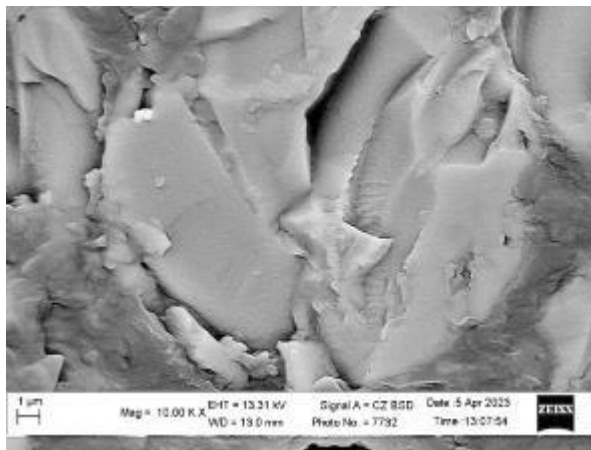
б



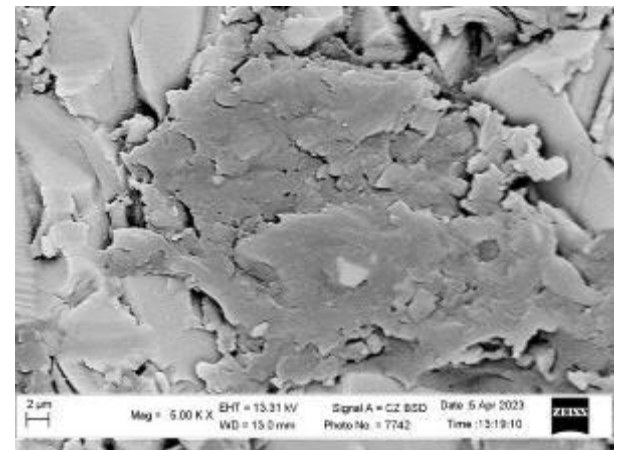
в



г



д



е

Рисунок 3.24 – Мікроструктурні особливості оболонки композитної штанги біля переходу до вуглепластикового осердя, зафіксовані на поперечному шліфі, розташованому на віддалі 10 (а, в, д) та 150 (б, г, е) мм від поверхні зламу зразка, випробуваного на втому за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованого після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

При цьому за абсолютними значеннями показник K знижувався в напрямі до осердя зразка, що узгоджувалось із зниженням напружень в напрямі до центру його перерізу.

Отже, виявлена тенденція зі зменшенням кількості відшарувань скловолокон від полімерної матриці зберігалась в усьому перерізі оболонки штанги практично аж до її межі з вуглепластиковим осердем (рис. 3.25). Як наслідок, навіть за руйнування самих скловолокон, що відбувалося практично по всій товщині скло волоконної оболонки (особливо на шліфі в околі поверхні втомного зламу), їх адгезія з полімерною зв'язкою зберігалася значно частіше на шліфі, розташованому на більшій віддалі від цього зламу.

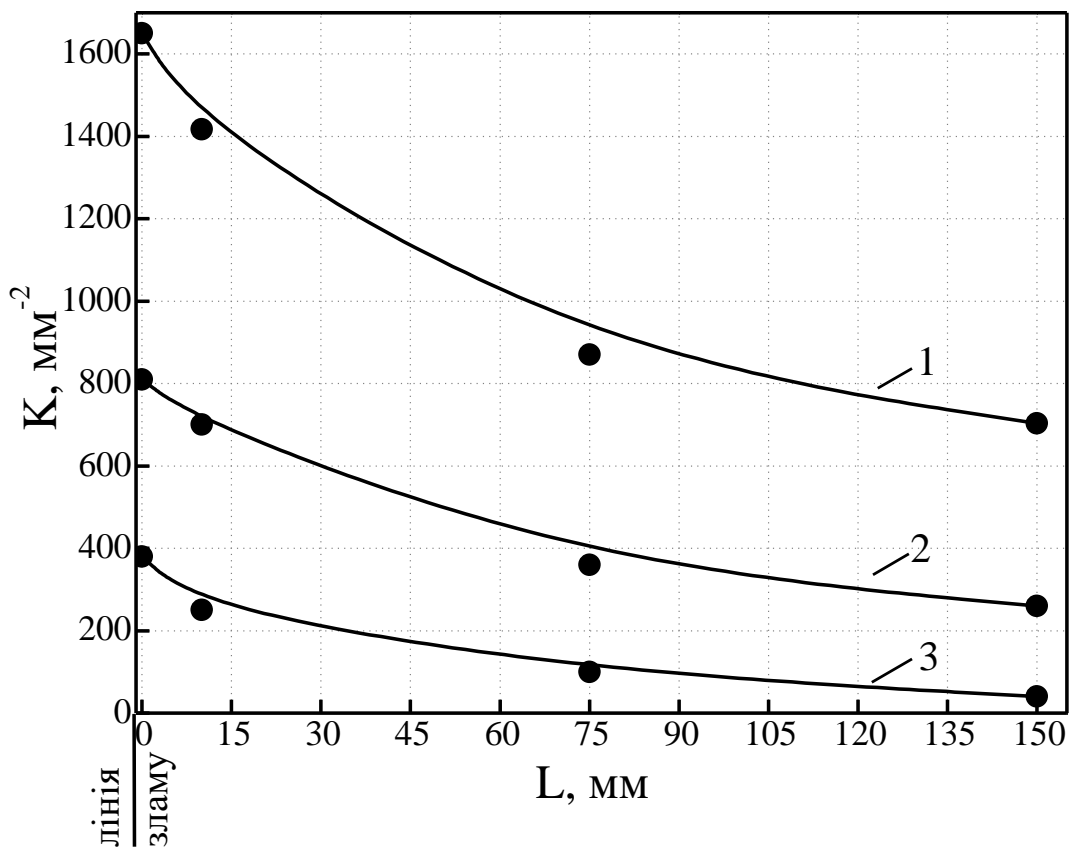


Рисунок 3.25 – Зміна кількісного фрактографічного показника пошкодженості K скловолоконної оболонки композитного зразка на трьох рівнях по її товщині (1 – в околі бічної поверхні зразка; 2 – в центрі перерізу оболонки; 3 – біля лінії розмежування з вуглепластиковим осердем) залежно від віддалі аналізованого перерізу від поверхні втомного зламу L , від яких залежали напруження σ в штанзі на рівні аналізованого шліфа.

З урахуванням того, що саме характеристики міцності оболонки штанги визначають її опір зародженню в ній утомної тріщини, екстраполювали отримані залежності на рівень поверхні зламу зразка. Це дало можливість оцінити критичний рівень пошкодженості K_c скло волоконної оболонки на поверхні композитного зразка, яка передувала його втомному руйнуванню (рис. 3.25). Такий підхід відкриває перспективу розвитку неруйнівного методу контролю технічного стану експлуатованих композитних штанг за розподілом пошкоджень на їх поверхні в околі сталевих захоплювачів штанг чи перехідних з'єднань на них. Адже, якщо густина відшарованих скловолокон від полімерної матриці на поверхні штанги в зоні дії максимального рівня напружень під час експлуатації в реальному технологічному процесі буріння свердловини перевищуватиме критичне значення пошкодженості K_c для цього рівня напружень, то подальша експлуатація цього елемента за таких навантажень загрожує його дочасним руйнуванням. Якщо ж ця густина суттєво менша за K_c , то з урахуванням відповідно визначеного коефіцієнта втрати ресурсних можливостей можна певною мірою продовжити експлуатувати штангу, але за напружень нижчих, ніж використовувались на попередньому етапі її експлуатації. Звісно, що практичне застосування пропонованого підходу щодо продовження ресурсу експлуатованих штанг потребує масштабніших досліджень, проте навіть проведені дослідження показали перспективи для розвитку такого підходу.

3.2.6 Особливості структури вуглепластикового осердя на різній віддалі від утомного зламу композитної штанги

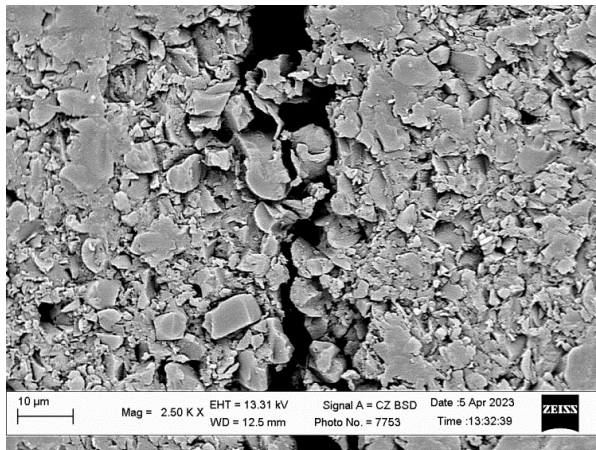
Призначення зовнішнього шару композитної штанги (оболонки) забезпечити її здатність чинити опір напруженням розтягу, які прикладаються до усіх елементів колони, задіяних у процесі буріння. Тоді як її вуглепластикове осердя визначає здатність штанги витримувати значні деформації без остаточного руйнування найбільш навантаженого перерізу. Це важливо з огляду на проходження складних ділянок буріння зі значним відхиленням орієнтації

свердловини від нормалі, так і демонтажу колони, за появи ознак пошкодження її елементів. Врахувавши це, вважали, що в осерді мали би також проявитися особливі пошкодження, пов'язані із циклічним навантаженням зразка. Аналіз структури вуглепластикового осердя на поперечних шліфах, розташованих на різній віддалі від утомного зламу штанги, виявили відмінності між ними (рис. 3.26).

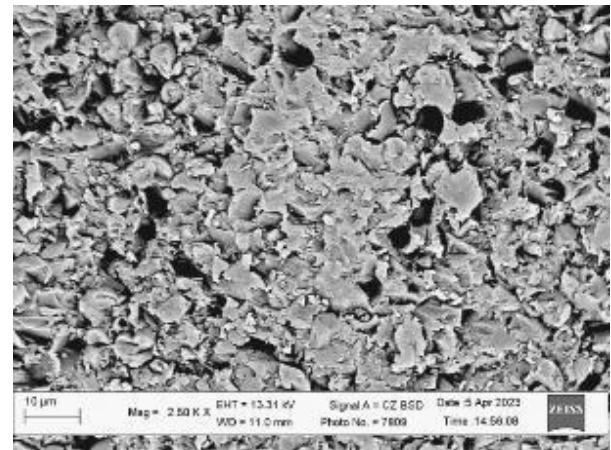
Виявилось, що щільна структура осердя зберігалась практично по всій площі осердя навіть на шліфі, розташованому в околі зламу, що свідчило про те, що рівень деформації штанги під час втомних випроб був не достатньо високим для відшарування вуглецевих волокон від полімерної матриці. Разом з тим весь переріз осердя на шліфі біля зламу перетинала макротріщина (рис. 3.10а, б). Саме в її околі спостерігали деталі руйнування вуглепластикового осердя (рис. 3.26а, в, д). А деталі руйнування вуглецевих волокон, яким був армований полімер осердя, показали важливість їх адгезії між собою (рис. 3.27а), і наявність ознак шаруватої структури самих вуглецевих волокон (рис. 3.27б). Крім того важливим аспектом пошкодженості осердя було те, що навіть в околі зламу, де виникали руйнуючі напруження, не спостерігали явних слідів пошкодження полімерної матриці. З цього прийшли до висновку, що міцність осердя визначається адгезивною міцністю вуглецевих волокон до полімерної матриці.

Що ж до шліфа, розташованого на віддалі 150 мм від зламу, то масштабних відшарувань між складниками осердя практично не спостерігали (рис. 3.26б, г, е). Вважали, що окремі вуглецеві волокна, які втратили зв'язок з полімером (рис. 3.26г, е), загалом не впливають на роботоздатність штанги. Таким чином, проведений аналіз структурних особливостей вуглепластикового осердя лише підтвердив попередньо зроблений висновок про відповідальність склопластикової оболонки за роботоздатність штанги при циклічних навантаженнях. Адже міцність поверхневого шару штанги власне і визначає її втомну довговічність. І за порівняльних рівнів напружень чим вища міцність оболонки штанги, тим більший її ресурс. Адже корозійна інертність композитної

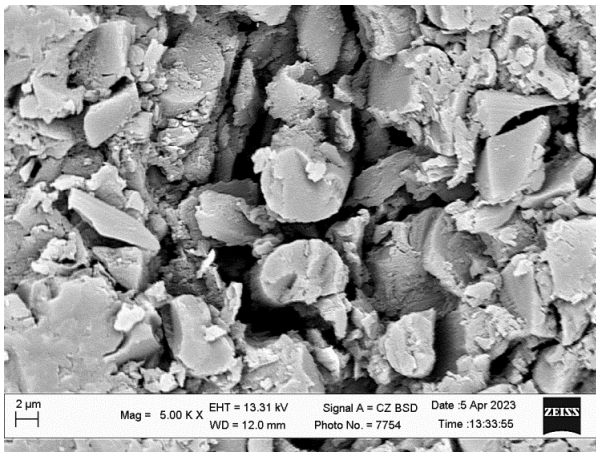
штаги усуває вплив технологічного середовища на її роботу здатність і механічний чинник стає доміантним.



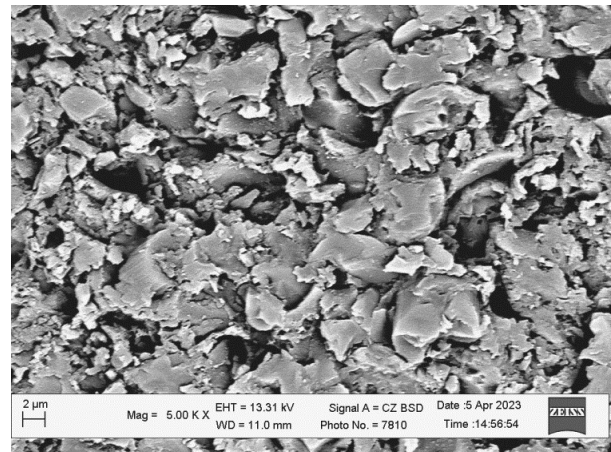
a



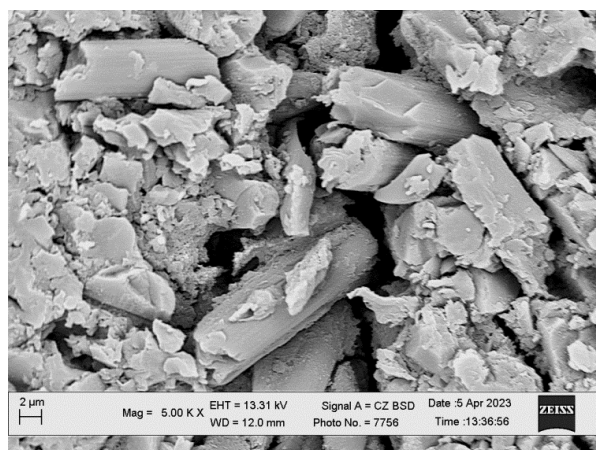
б



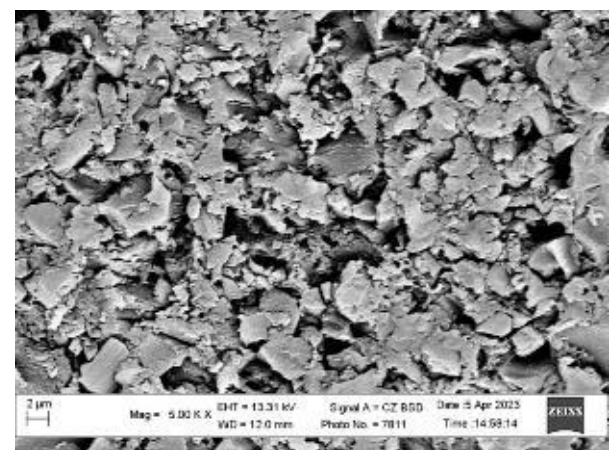
в



г



д



е

Рисунок 3.26 – Мікрофрактографічні особливості руйнування вуглепластикового осердя штанги, зафіксовані на поперечному шліфі, розташованому на віддалі 10 (*a, в, д*) та 150 (*б, г, е*) мм від поверхні зламу зразка, випробуваного на втому за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованого після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

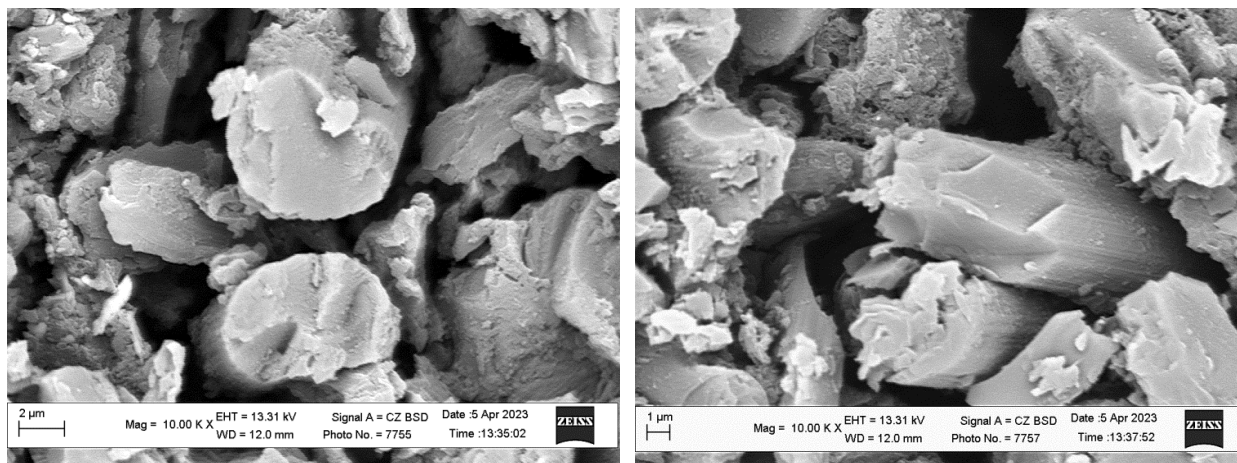


Рисунок 3.27 – Мікроструктурні особливості волокон у вуглепластиковому осерді, виявлені за високої роздільної здатності на шліфі, розташованому біля втомного зламу композитної штанги.

3.3 Фрактографічні особливості втомного руйнування гібридної насосної штанги

Особливості руйнування досліджували на зламі композитного двошарового стрижня, що складався з вуглецевих волокон всередині осердя і скляних волокон в оболонці. Пошкодженість стрижнів залежно від кількості циклів навантаження обертовим консольним згином оцінювали за втратою жорсткості, а їх втомну міцність – за руйнуванням внаслідок появи тріщин. В роботі [74] описано дані для композитної насосної штанги за втомного руйнування. Число циклів до пошкодження штанги визначали за прикладеного напруження 175 МПа. Пошкодження в штанзі зароджувалися і поширювалися в результаті розтріскування і руйнування полімерної матриці, яка зв'язувала скляні волокна в оболонці як єдине ціле. Втома від навантаження згином починалася тоді, коли прогин гібридної штанги перевищував 42 % від прогину, який відповідав рівню міцності штанги за її активного консольного згину. Пошкодження від втоми досягало точки насичення уздовж лінії контактування скловолоконної оболонки і вуглецево волоконного осердя через концентрацію напружень, що виникала на межі розділу композиту, що призводило до

асимптотичної поведінки штанги в циклі навантаження через несиметричність втрати її жорсткості. Оскільки пошкодження в штанзі не поширювалося у вуглецево-пластикове осердя, то механічні властивості за статичного навантаження були на рівні $\sim 85\%$ від границі міцності або ще і в більшій мірі.

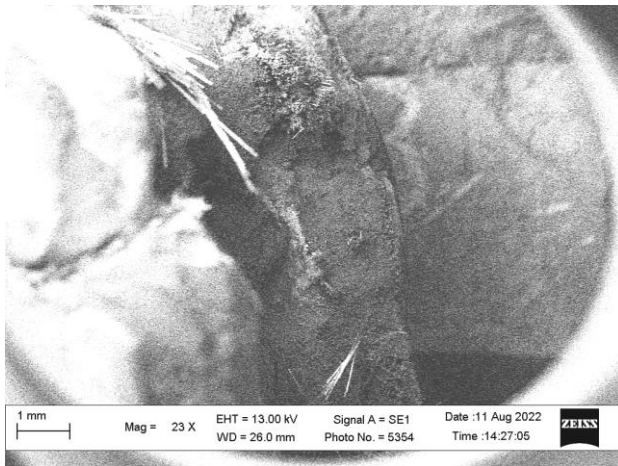
В результаті втомних випробувань спостерігали зародження та ріст осьових тріщин, аж до руйнування оболонки композитного зразка. В результаті випробувань на втому отримали злам зразка, показано на рис. 3.28.



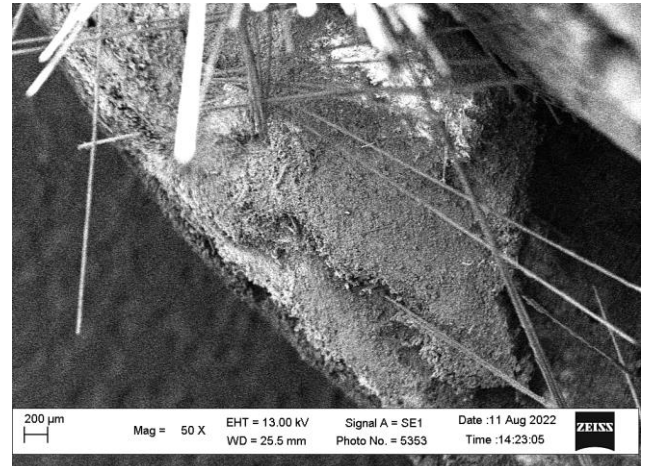
Рисунок 3.28 – Зруйнований зразок гібридної штанги

Проаналізували фрактографічні особливості на макро- та мікроскопічному рівнях. Вже на макрозламі зразка відзначили відмінності рельєфу зламу на ділянках зародження втомного руйнування в скловолоконній зовнішній оболонці та його подальшого поширення у вуглепластикове осердя гібридного зразка-штанги (рис. 3.28). З аналізу макроособливостей руйнування очевидно, що руйнування розпочиналося від зовнішньої поверхні гібридних зразків на їх ділянці, де досягався максимальний момент від консольного згину (рис. 3.28). Як правило ділянки зародження руйнування були орієнтовані нормально до осьових зусиль розтягу, які (згідно з використаною схемою навантаження) досягали максимальних значень саме в зовнішньому скловолоконному шарі оболонки. Осередки зародження втомних тріщин довільним чином розташовувались вздовж периметра зразка-штанги. Про це свідчили ледь помітні вторинні тріщини, які виявляли на нормально орієнтованій частині зламу. Отже на етапі зародження руйнування на зламі чітко зафіксували нормально орієнтовану ділянку в межах скло волоконної оболонки гібридного

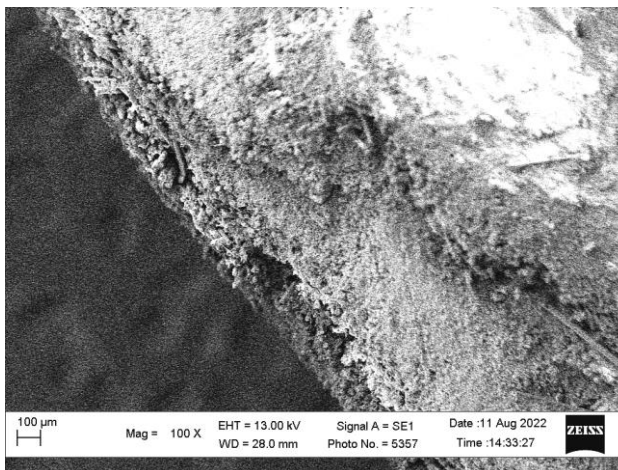
зразка у вигляді кільцевої тріщини, яку трактували як руйнування пов'язане з циклічним навантаженням.



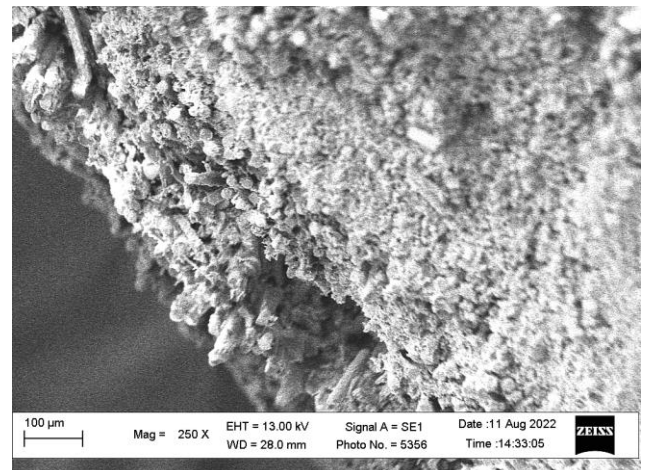
а



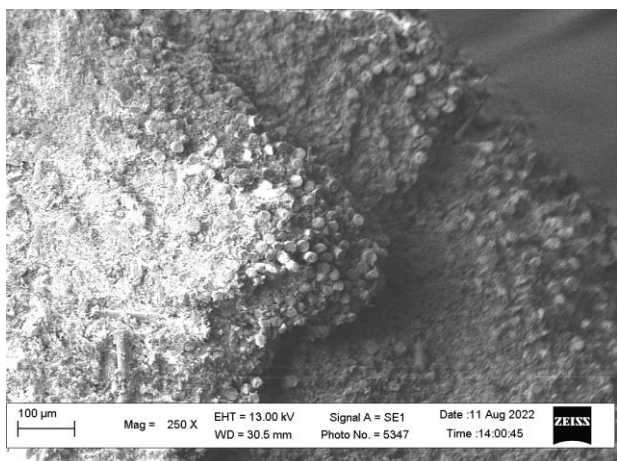
б



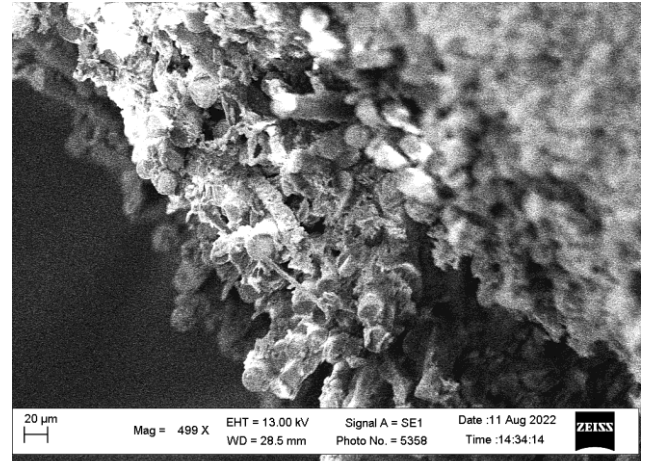
в



г



д



е

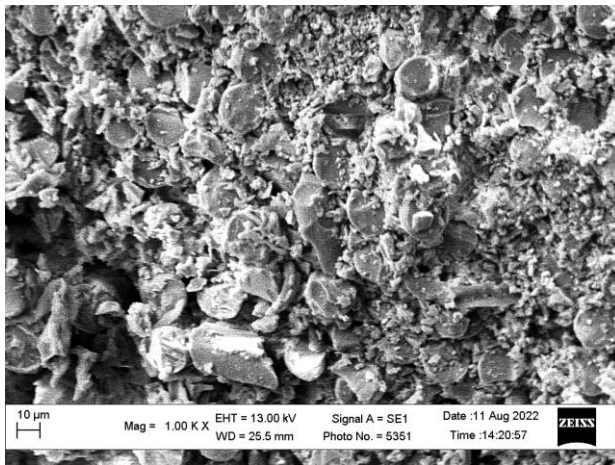
Рисунок 3.29 – Макрофрактограми ділянок зародження втомного руйнування у скло волоконній оболонці штанги, випробуваної круговим консольним згином за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованої після $N = 1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

Разом з тим практично відразу після формування колової тріщини (починаючи з глибини до 0,5 мм) подальше поширення руйнування на весь переріз зразка відбувався за іншим механізмом. Значну роль у цьому відіграли поздовжні розшарування скловолоконної оболонки від вуглепластикового осердя, які поділили периметр зразка на окремі сектори руйнування. Завдяки ним відбулася переорієнтація зламу з наростанням впливу напружень розтягу, коли вже весь переріз зразка починав працювати внаслідок активного розтягу. Цікаво, що концентрація напружень від появи нормально орієнтованої втомної тріщини (внаслідок злиття всіх осередків зародження втоми вздовж всього периметра гібридного зразка), виявилась не достатньою для поширення руйнування вглиб зразка саме у цьому його перерізі.

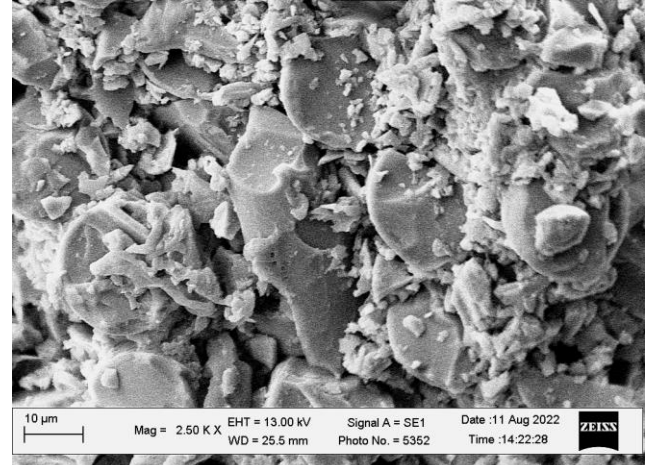
Поверхню зламу одного із відшарованих фрагментів зародження втомної тріщини від бічної поверхні зразка-штанги проаналізували засобами електронної мікроскопії з використанням різних збільшень (рис. 3.29). Очевидна етапність поширення руйнування в скловолоконній оболонці зразка-штанги, пов'язана із зародженням та поширенням руйнування і вглиб перерізу зразка, і назустріч сусіднім осередкам зародження руйнування аж до об'єднання їх фронтів з формуванням колової втомної тріщини (рис. 3.29а-г). Навіть за невисокої роздільної здатності на ділянці зародження втомного руйнування на зламі ідентифікували окремі скловолокна (рис. 3.29д, е). Як особливість скловоконного зовнішнього шару відзначили, що скловолокна в осерді композитної штанги не завжди були нормально орієнтовані до прикладених напружень (рис. 3.29в). Як наслідок, руйнування на ділянках з дещо нахиленими до осі стержня волокнами відбувалося шляхом відшарування волокон від матриці з формуванням відповідного сходинкоподібного рельєфу на зламі.

За використання вищої роздільної здатності стало очевидним їх крихке руйнування (рис. 3.30). І хоча сам злам був істотно засмічений часточками відколів від скловолокон, які яскраво світилися через порушений зв'язок зі зломом і сприймалися як сміття, але завдяки напиленому шару золота на

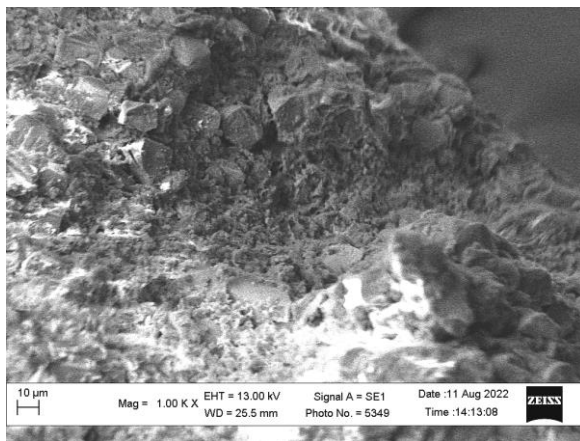
поверхні зламу доволі чітко виділялися фрагменти окремих скловолокон, які звикло пов'язують з крихким механізмом відколу (рис. 3.30б, г-е).



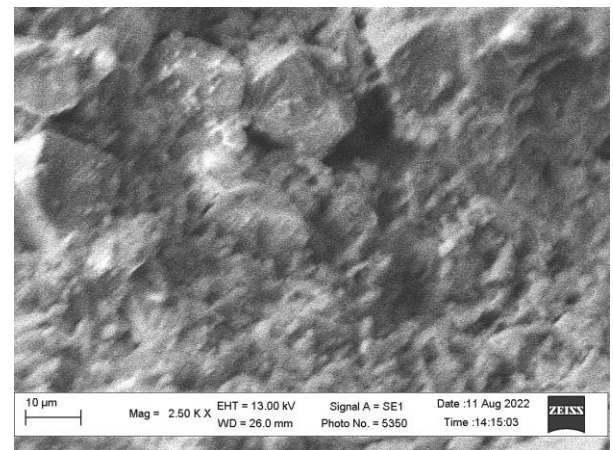
а



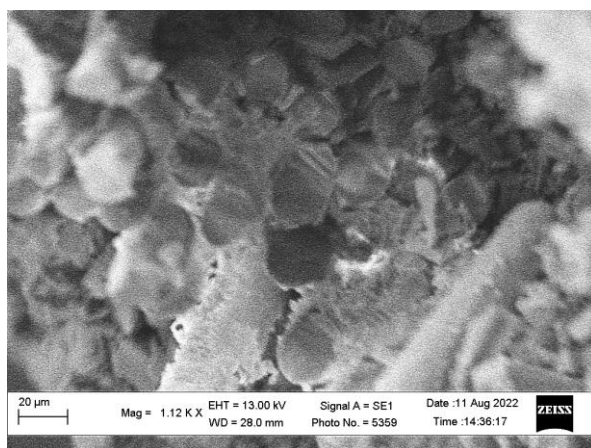
б



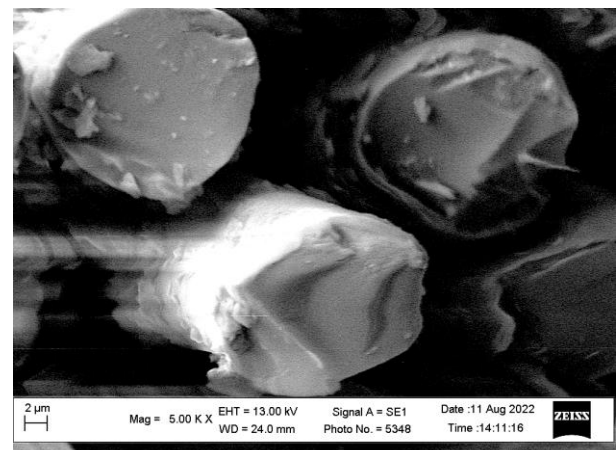
в



г



д



е

Рисунок 3.30 – Мікрофрактограми ділянок зародження втомного руйнування у скло волоконній оболонці штанги, випробуваної круговим консольним згином за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованої після $N = 1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

Загалом, це вважали ознакою навантаження окремих скловолокон розтягом до критичного рівня, яке завершувалось їх крихким руйнуванням. Адже скло як аморфний матеріал звикло і руйнується за механізмом відколу. Попри це полімерна зв'язка зразка-штанги в межах оболонки руйнувалася за в'язким механізмом шляхом утворення дрібних ямок (рис. 3.30в, з). Ці результати підкреслили важливість адгезії в'язкої складової оболонки (полімер, що зв'язував між собою скловолокна в єдине ціле) і високоміцних, але крихких скловолокон, діаметр яких досягав 10 мкм. Адже оболонка композитного стрижня мала би витримувати навантаження аж до крихкого руйнування скловолокон. Відзначили також, що руйнуванню і скловолокон, і матриці передувало їх відшарування одне від одного, про що свідчили вторинні тріщини вздовж їх меж (рис. 3.30з). Тому адгезія між обома складовими (полімерною зв'язкою і скловолоконним наповнювачем) була визначальною у зародженні нормально орієнтованих втомних тріщин від поверхні композитного стрижня.

В міру поширення утомного руйнування вглиб перерізу стрижня композитної штанги зв'язок між скловолокнами і полімером продовжувала порушуватися. Але при цьому через зростання концентрації напружень у вершині втомної тріщини і зростання вкладу активного розтягу від нормальних напружень. Як наслідок починав формуватися косий злам з руйнуванням скловолокон за механізмом зсуву (рис. 3.30д).

З переходом до осердя стрижня злам ставав дуже дрібнодисперсним і на ньому було важко ідентифікувати межі вуглецевих волокон з полімером, який зв'язував їх в єдине ціле (осердя) (рис. 3.31). Лише окремі обривки вуглецевих волокон, які подекуди виділяли на фоні одноманітного дрібнодисперсного рельєфу, давали змогу судити про їх справжні розміри. Встановили, що на зламі їх діаметр не перевищував 4 мкм (рис. 3.31в).

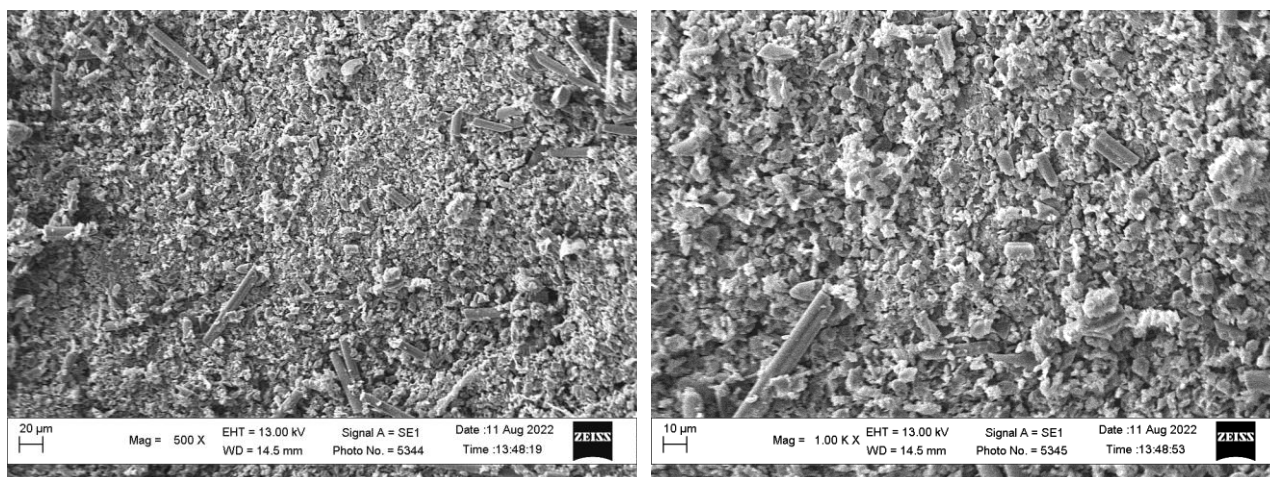
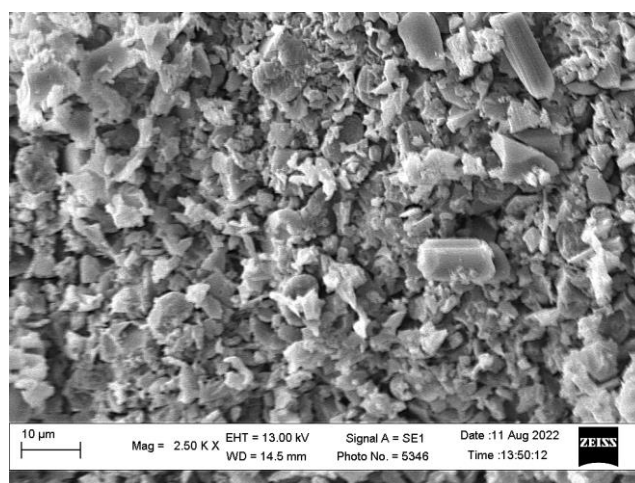
*a**б**в*

Рисунок 3.31 – Мікрофрактограми ділянки поширення втомного руйнування у вуглепластиковому осерді зразка-штанги, випробуваного круговим консольним згином за напружень 175 МПа і зруйнованого після $1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

Аналіз за вищої роздільної здатності центральної частини зламу композитного стрижня, яка відповідає зоні доламу гібридного зразка, показав, що вуглецеві волокна в центрі вуглець-полімерного осердя відокремились від матриці внаслідок відриву, утворивши своєрідну колонію з обірваних волокон (рис. 3.32а-в). За високих збільшень чітко підтвердили, що діаметр вуглецевих волокон значно менший (по крайній мірі у 2,5 рази) порівняно із скловолокнами у поверхневому шарі композиційного зразка (рис. 3.32г). Візуально їх можна порівняти за розмірами на рис. 3.30б. Більше того очевидно є шарувата

структура вуглецевих волокон, яка проявилася і на бічній їх поверхні, і на їх зламі (рис. 3.32а).

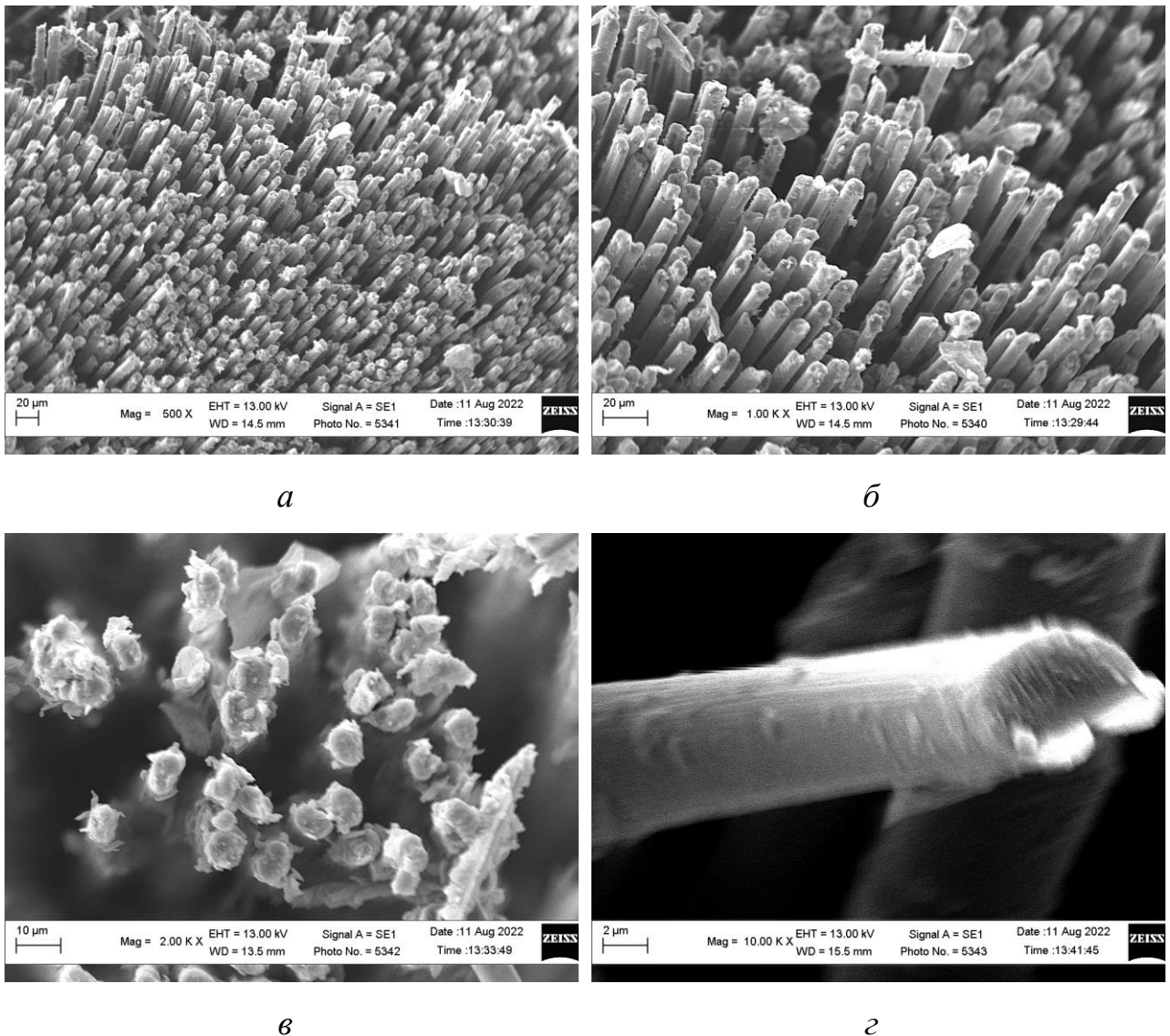


Рисунок 3.32 – Мікрофрактограми ділянки поширення втомного руйнування у центрі вуглепластикового осердя зразка-штанги, випробуваного круговим консольним згином за напружень $\sigma = 175$ МПа і зруйнованого після $N = 1,3 \times 10^6$ циклів навантаження.

Таким чином фрактографічні дослідження зламу композиційного стрижня гібридної штанги показали, що визначальним у її втомній довговічності є поверхнево зміцнений шар з скловолоконним наповнювачем. Під впливом циклічних навантажень частина волокон в околі поверхні стрижня

відшаровувалася від матриці (про це свідчило вторинне розтріскування вздовж їх меж). Після цього відшаровані волокна могли розтягуватися у кожному з циклів навантаження незалежно від матриці аж до їх руйнування. Впродовж наступного етапу розвитку руйнування стрижня відбувалося в'язке руйнування перетинок з полімерної зв'язки, розташованих між відшарованими волокнами. Концентрація напружень у вершині втомної тріщини, сформованої в такій послідовності окремих актів руйнування, створювала передумови для поширення руйнування вглиб перерізу стрижня внаслідок розтягу скловолокон попереду її вершини з формуванням косоного зламу. Осердя стрижня, армоване вуглецевими волокнами, руйнувалося внаслідок розтягу, яке завершувалося висмикуванням частини вуглецевих волокон з полімерної матриці. Це свідчить про сумірність напружень розтягу на завершальному етапі втомного руйнування стрижня з адгезією вуглецевих волокон із матрицею.

Отже, втомна міцність композитної насосної штанги має вирішальне значення для її довговічності. Руйнування стрижня при циклічному навантаженні є поступовим, і відбувається шляхом чергування етапів пошкодження, а саме зародження нормально орієнтованої поздовжньої втомної тріщини у місці максимального моменту згину зразка супроводжувалось зародженням осьових тріщин на поверхні скловолоконної оболонки, ріст яких спричинив відшаруванням частини поверхневих шарів скловолоконної оболонки зразка-стрижня та їх розтягування до руйнування та пластичного руйнування полімерної зв'язки в склопластиковій оболонці. Під дією циклічних розтягуючих напружень, що супроводжувалиють завершальну стадію втоми, вуглецеві волокна руйнувалися або висмикувалися із звязуючого їх полімера.

3.4 Ударна в'язкість та фрактографічні особливості руйнування композитної насосної штанги

Оскільки колони штанг часто працюють в умовах значних динамічних навантажень, то важливо, окрім втомних характеристик [74–76] важливо оцінити

опір крихкому руйнуванню. Тому визначено ударну в'язкість кожного із складників (оболонка та осердя) композитної насосної штанги та проаналізовано механізм руйнування як вуглець-пластикового осердя, так і скловолоконної оболонки.

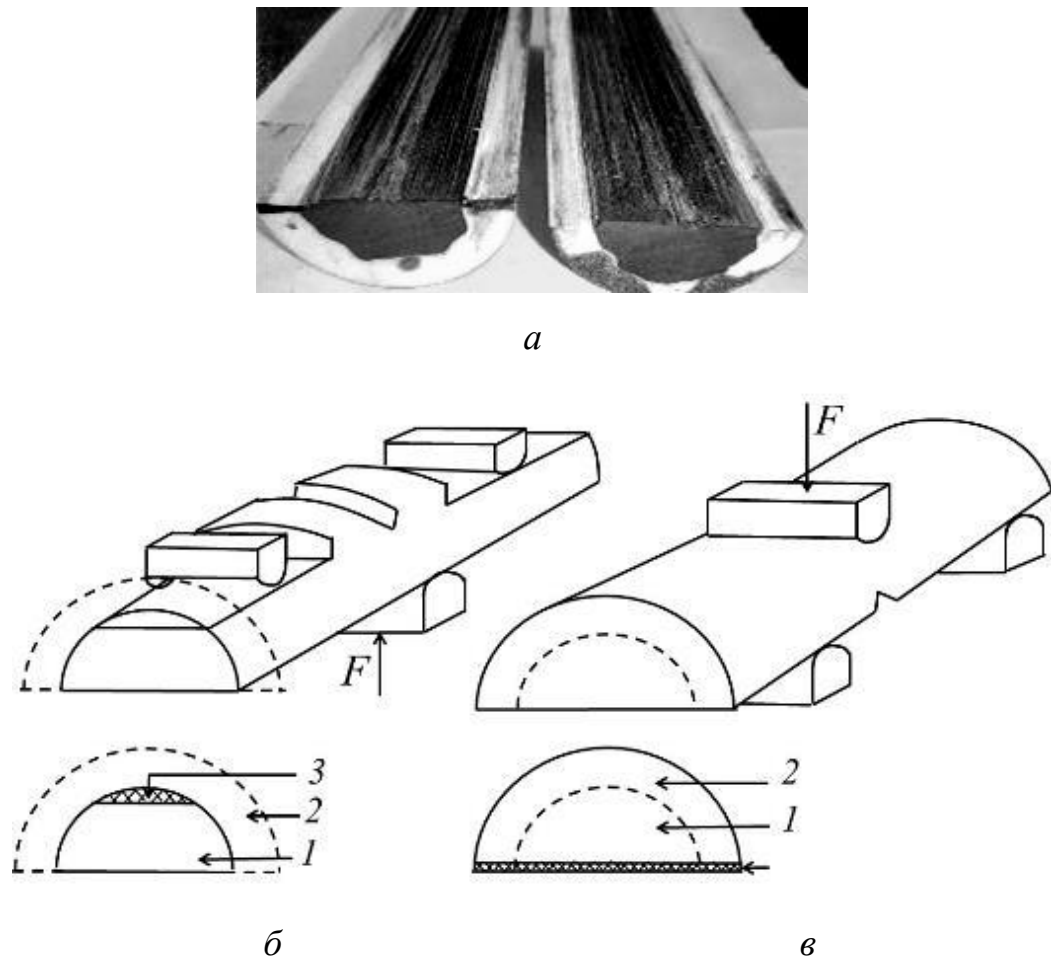


Рисунок 3.33 – Загальний вигляд половинок композитної штанги, розрізаної вздовж осі (а), та схеми навантаження зразків для визначення ударної в'язкості вуглецевого осердя (б) та її сукупного значення разом зі скловолоконною оболонкою (в): 1 – вуглець-пластикове осердя, 2 – скловолоконна оболонка; 3 – розташування концентратора напружень на зразках.

Для оцінювання опору крихкому руйнуванню дослідили композитну насосну штангу діаметром 19 мм, яка складалася з пластикового осердя \varnothing 12 мм, армованого вуглецевими волокнами та скло волоконної оболонки товщиною 3.5 мм. Відрізки композитної штанги завдовжки 60 мм розрізали вдовж їх осі

(рис. 3.33a). З отриманих половинок штанги виготовили зразки для випробувань на ударну в'язкість. На одній половинці зі сторони опуклої поверхні штанги нанесли концентратор напружень так, щоб його вершина розташувалась всередині вуглецевого осердя. Для стійкості зразка під час випроб на ударну в'язкість з обох його країв зняли фаски (під нерухомі опори для копра), усунувши для цього зміцнений скловолокном поверхневий шар штанги та мінімізувавши вплив на ударну в'язкість (рис. 3.33b). На іншій половинці штанги концентратор нанесли зі сторони поверхні поздовжнього зрізу штанги (рис. 3.33c). Глибину концентраторів на обох зразках розраховували таким чином, щоб забезпечити рівність їх поперечних нетто перерізів у вуглецевому осерді. Таким чином, під час руйнування зразка першого типу визначали ударну в'язкість армованого вуглецем пластичного осердя (рис.3.33b), а другого – сукупний ефект від руйнування осердя і зміцненої скловолокном оболонки штанги (рис. 3.33c). Площа осердя на обох зразках однакова, тому за різницею отриманих значень ударної в'язкості можна визначити значення, властиве скловолоконній оболонці штанги.

3.4.1 Результати випробувань на ударну в'язкість

Випробували дві серії по три зразки кожного типу, виготовлені відповідно до схем на рис. 3.33b, c. Отримали, що середнє значення ударної в'язкості зразків першого типу становило $0,32 \text{ МДж/м}^2$, а другого – $0,47 \text{ МДж/м}^2$. Під час її визначення враховували, що обидва типи зразків мали однакову площу перерізу, що припадала на вуглець-пластикове осердя (47 мм^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 МДж/м^2 . Отже, вклад вуглець-полімерного осердя в опір крихкому руйнуванню штанги перевищив внесок скловолоконної оболонки.

3.4.2 Фрактографічні особливості руйнування оболонки композитної штанги, армованої скляними волокнами.

Аналіз зламу отриманих фрагментів зруйнованої оболонки за вищої роздільної здатності мікроскопа показав, що на початковому етапі її руйнування поперек осі штанги на зламі домінувала значна кількість подрібнених руйнуванням елементів полімерної зв'язки, яка заповнювала проміжки між скловолокнами (рис. 3.34а). Порівняно із скляними волокнами дрібні елементи зв'язки мали ознаки відносно в'язкого руйнування шляхом витягування їх прошарків аж до розриву з повною деструкцією на дрібні фрагменти, які завуальювали злами самих скловолокон (рис. 3.34б). Проте навіть та кількість волокон, яка потрапила в поле зору на початковому етапі руйнування зразка свідчила про крихкий характер їх руйнування. В міру просування руйнування далі від концентратора напружень фрагменти зв'язки зникали і аналізувати особливості руйнування самих скляних волокон ставало простіше. Їх руйнування відбувалось за крихким механізмом відколу з характерними елементами гребенів відриву, утворених внаслідок поширення руйнування в різних площинах відколу (рис. 3.34в-е). Перш за все відзначили нормальну орієнтацію зламів скловолокон. Всі вони мали доволі правильну форму круга, діаметр якого в середньому становив 17 мкм. Крім того на зламі скло полімерної оболонки були майже відсутні залишки в'язкої полімерної зв'язки, які розглядали як артефакти на початковому етапі руйнування зразка. Очевидно, деструкція полімеру ставала щодалі сильнішою і дрібні його часточки, повністю втративши зв'язок із зломом, усувалися під час остаточного розриву оболонки на обох половинах зразка.

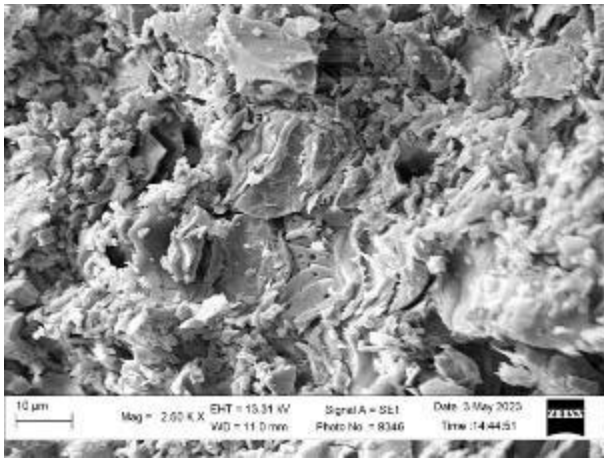
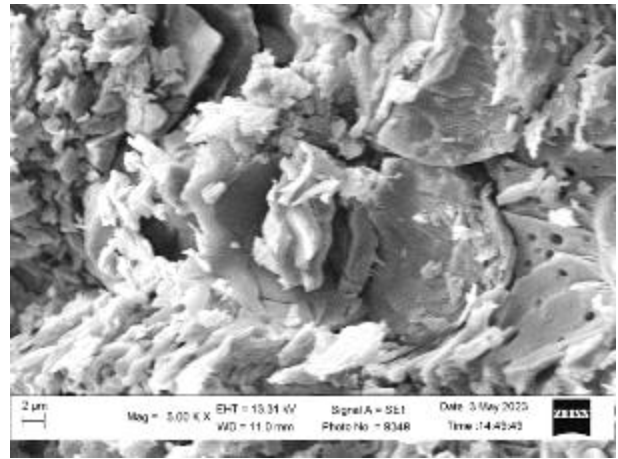
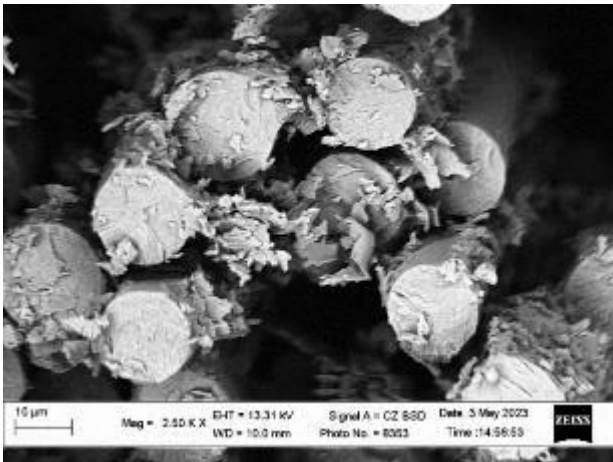
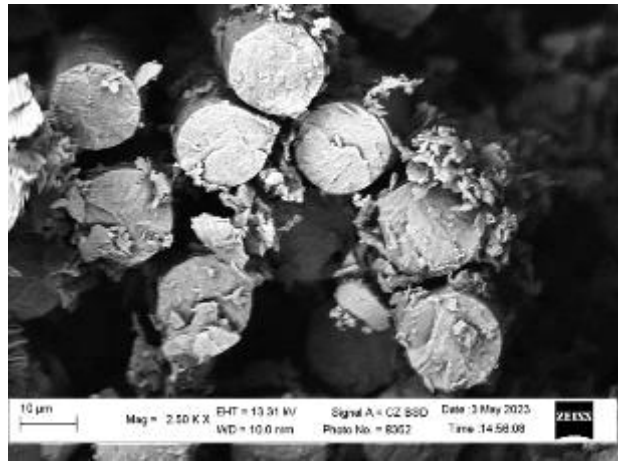
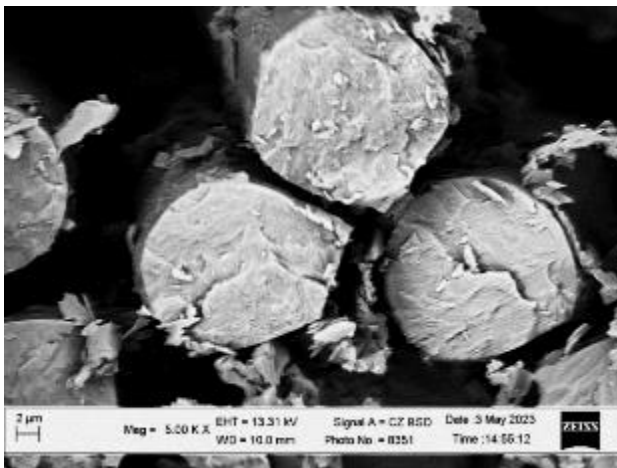
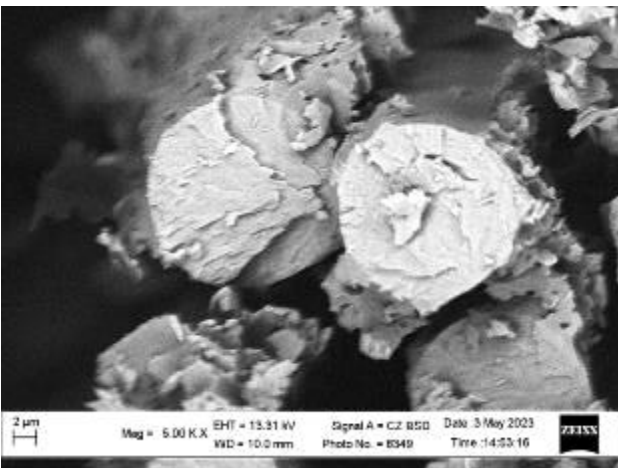
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 3.34 – Мікрофрактограми деталей зламу на ділянці скло волоконної оболонки зразка із штанги, випробуваного на ударну в'язкість.

Аналіз зламу скловолокна за ще вищої роздільної здатності дав змогу ідентифікувати на ньому досить високі сходинки між паралельними площинами

відколу з вторинними тріщинами, які декорували їх (рис. 3.35). Сходинки дрібних відколів розпочинались від бічної поверхні скловолокна (практично вздовж більшої половини його периметру) і сходились практично в одній точці, засвідчуючи напрямок поширення руйнування у ньому на мікрорівні. Цей напрямок істотно відрізнявся в різних волокнах і в більшості випадків не співпадав з магістральним напрямком поширення руйнування. Це означає, що в оболонці композитної штанги відбувались складні процеси перерозподілу напружень і деформацій між волокнами і полімерною зв'язкою, між самою оболонкою і осердям з полімеру, заповненим вуглецевими волокнами. Крім того не можна виключити наявності мікродфектів у самих волокнах, які слугували концентраторами напружень і могли ініціювати мікротріщини. У будь-якому випадку механізм крихкого відколу елементів зміцнення (скловолокна) в оболонці штанги буде визначальним за її руйнування під час динамічних навантажень згином, уникнути якого під час глибинного буріння зі значними відхиленнями свердловини від нормалі дуже не просто.

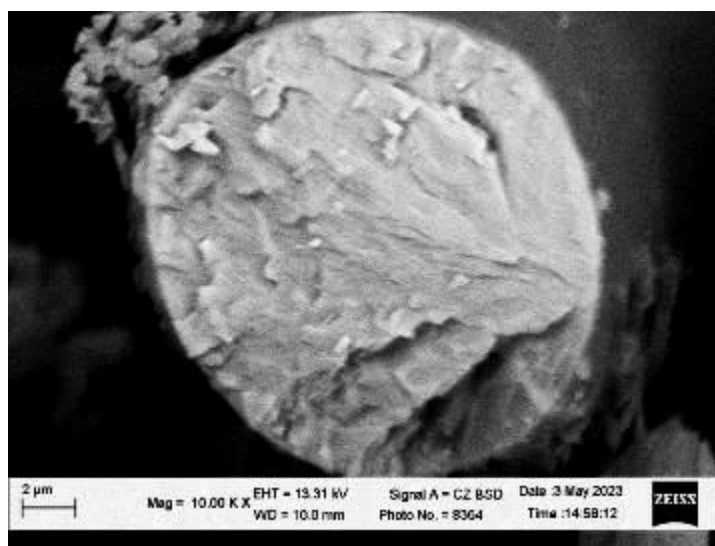
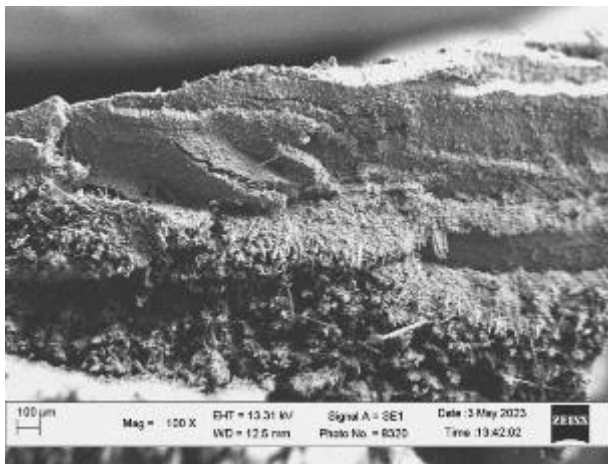


Рисунок 3.35 – Мікрофрактограма за високої роздільної здатності скляного волокна, використаного в оболонці композитної штанги для її зміцнення, отримана після випробувань на ударну в'язкість.

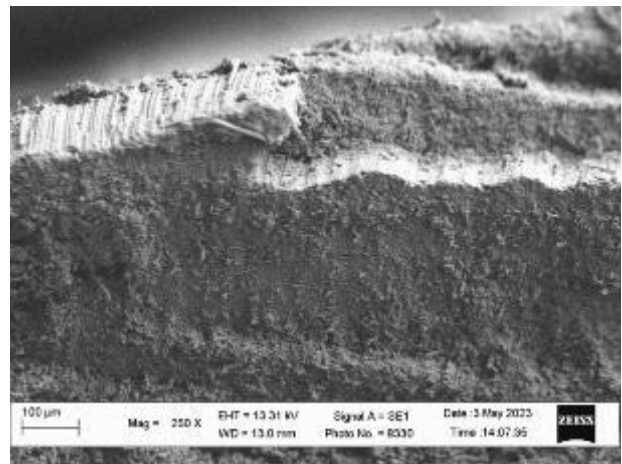
3.4.3. Фрактографічні особливості руйнування осердя композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами

Аналіз зламу зразка за невисокої роздільної здатності виявив каскадний характер його формування (рис. 3.36). Навіть на макрорівні було очевидно, що ця особливість зламу була зумовлена різною відносно осі штанги орієнтацією вуглецевих волокон, якими була армована полімерна зв'язка в її осерді. За сприятливої орієнтації вуглецевих волокон руйнування вуглепластикового композиту відбувалось шляхом формування доволі широких (до 80 мкм) ділянок відшарувань вздовж меж вуглецевих волокон з полімерною зв'язкою. Ці смуги повторювались на зламі випадковим чином і завдяки ним відбувалась значна переорієнтація напрямку поширення руйнування в осерді. В межах цих ділянок спостерігали паралельні ряди вуглецевих волокон, довжина яких і визначала ширину смуг розшарувань. Чим ближчою була орієнтація вуглецевих волокон до макроскопічного напрямку руйнування зразка тим ширшою була смуга розшарувань на зламі.

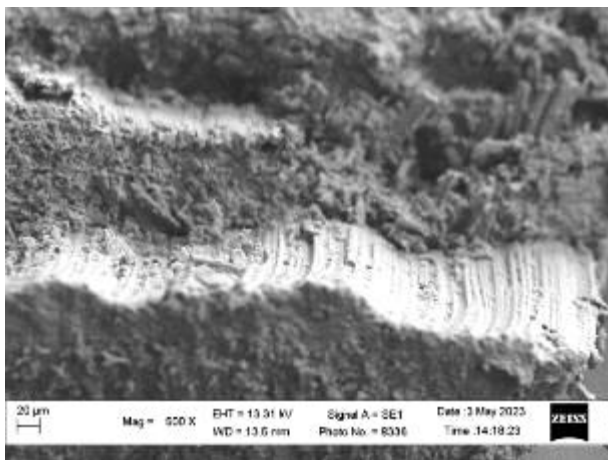
Ділянки зламу, що розмежовували смуги розшарувань на ньому, були значно ширшими. На різних ділянках зламу орієнтація вуглецевих волокон в їх межах була різною і залежно від неї змінювався нахил поверхні. Звідси прийшли до висновку, що за динамічних навантажень енергоємність руйнування осердя штанги значною мірою залежатиме від оптимального вибору орієнтації вуглецевих волокон стосовно її осі. Загалом найбільшого запасу за опором руйнуванню під дією ударних навантажень додаватиме штанзі така орієнтація вуглецевих волокон, яка буде близькою до орієнтації осі штанги, а найменшого – перпендикулярна до неї.



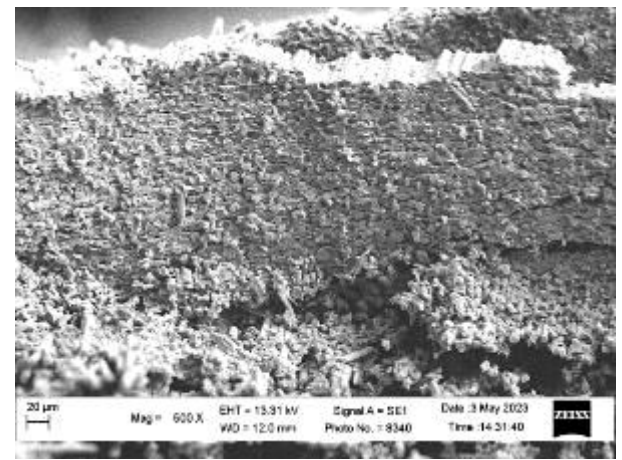
а



б



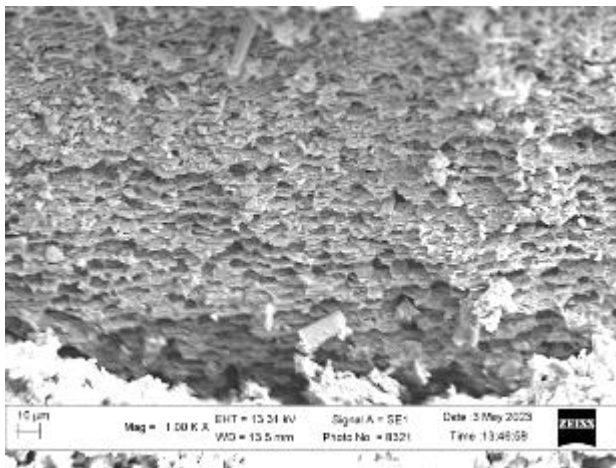
в



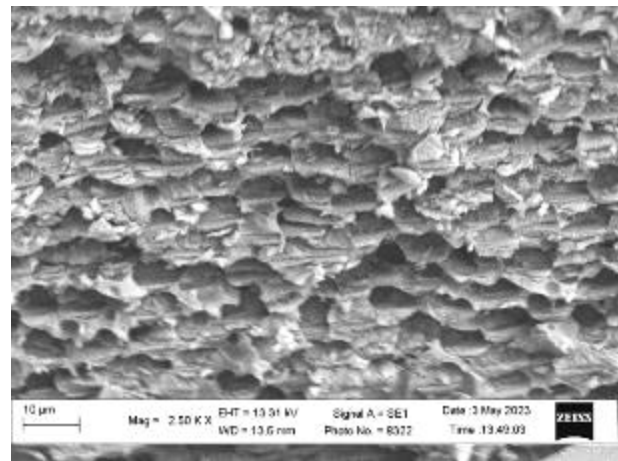
г

Рисунок 3.36 – Макрофрактографічні особливості зламу зразка на ділянці армованого вуглецевими волокнами осердя композитної штанги.

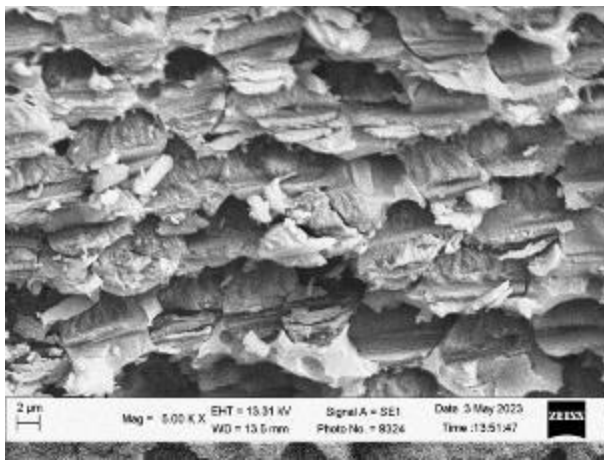
На початковому етапі руйнування зразка із осердя штанги каскадний характер зламу зберігався також і на мікроскопічному рівні (рис. 3.37). Ряди вуглецевих волокон у цьому випадку розташовувалися практично паралельно фронту поширення руйнування, але були нахилені до осі осердя штанги під незначим кутом. Як наслідок за вищої роздільної здатності зафіксували еліптичні за формою злами вуглецевих волокон (рис. 3.37в, г). Характерно, що практично на кожному із зламів волокон виявили ознаки шаруватої структури вуглецевих волокон вздовж їх осі, яка у аналізованому випадку сприяла появі паралельних фронту тріщини слідів мікророзшарувань.



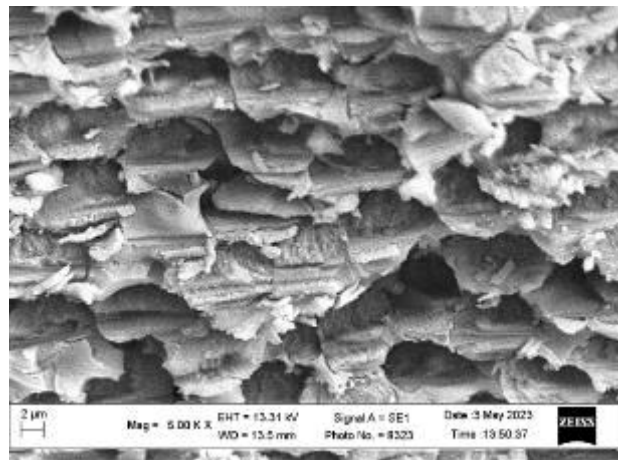
а



б



в



г

Рисунок 3.37 – Мікрофрактографічні особливості зламу зразка, отриманого після випроб на удар, на початковому етапі руйнування осердя композитної штанги, армованого вуглецевими волокнами. Напрямок руйнування зразка знизу догори.

Поява каскадного типу руйнування на мікроскопічному рівні пов'язана із доволі великою зоною перед руйнування у вершині надрізу на зразку з матеріалу осердя, що звикло свідчить про високий опір руйнуванню. Як наслідок поверхня зламу на початковому етапі руйнування орієнтована під кутом до дії нормальних напружень (в напрямі розвитку максимальних деформацій).

За подальшого поширення в глибину перерізу зразка руйнування відбувалося на ділянках з іншою орієнтацією вуглецевих волокон, що армували полімер, і, як результат, на зламі почергово з'являлись ділянки з хаотично різною

орієнтацією волокон (рис. 3.38). При цьому істотно зростала засміченість зламу залишками полімеру, який перешкодив ідентифікації вуглецевих волокон (рис. 3.38а, б).

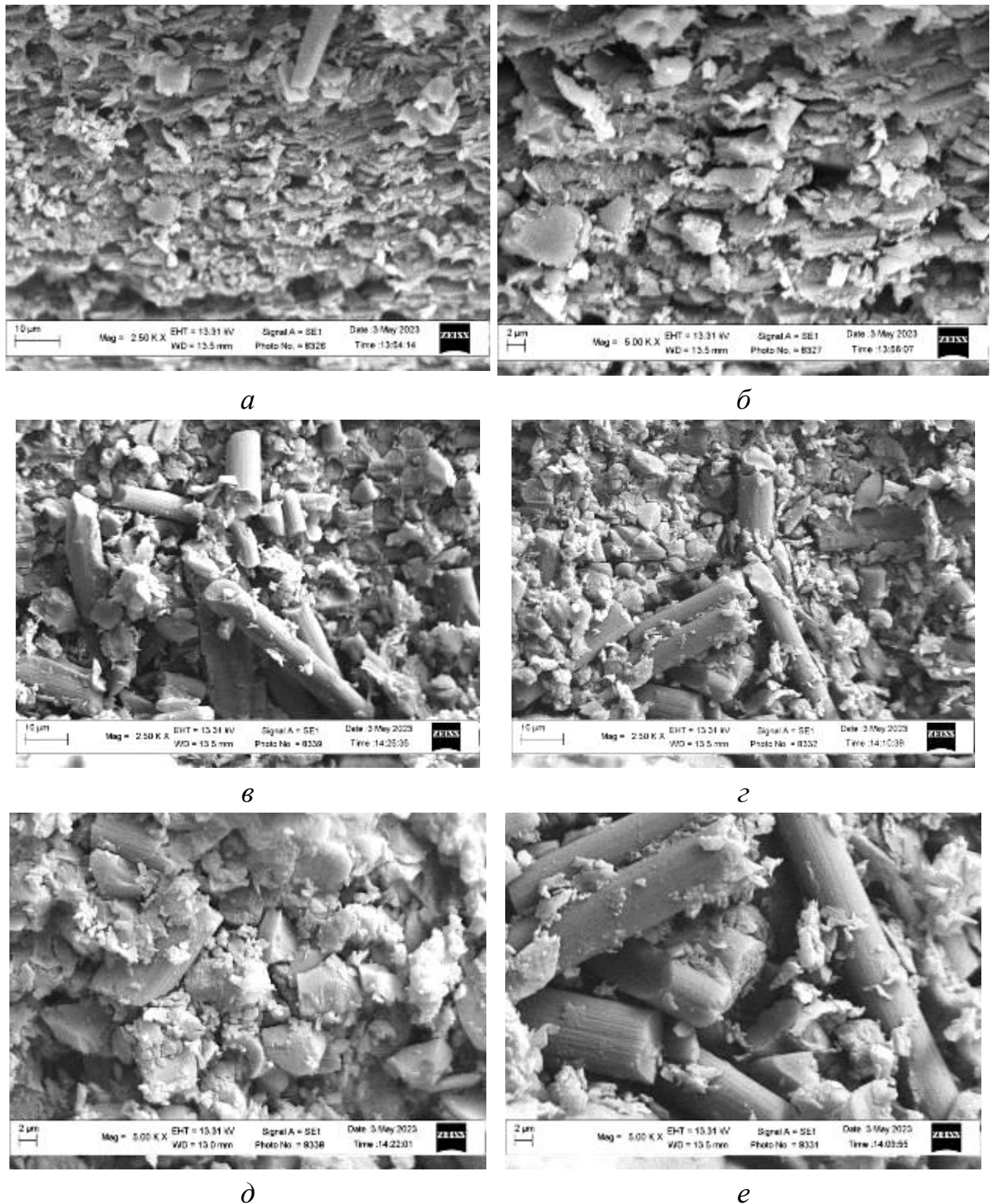
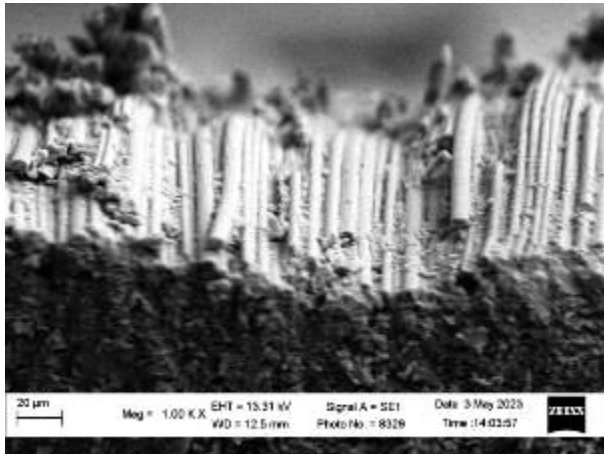


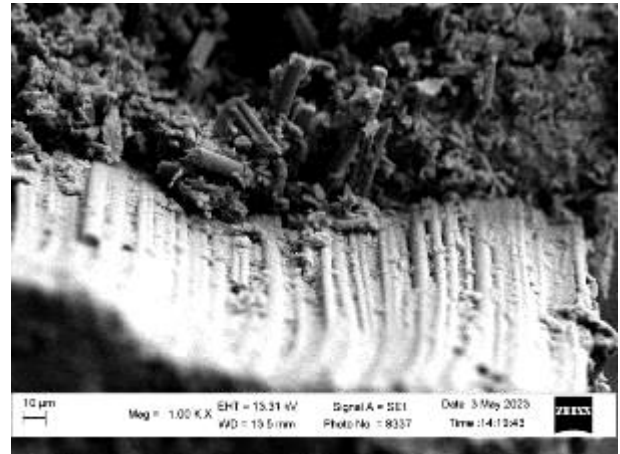
Рисунок 3.38 – Мікрофрактографічні особливості зламу зразка після випроб на удар, на етапі поширення руйнування в осерді композитної штанги, армованому вуглецевими волокнами. Напрямок руйнування зразка знизу догори.

Як наслідок, на зламі найчастіше виявляли частини зруйнованих волокон, які виділялися на фоні уламків полімеру (рис. 3.38*в, з*). Відзначили, що у випадку наближення орієнтації вуглецевих волокон до напрямку поширення руйнування під час випроб зразка на удар окремі волокна немов би були витягнені з полімерної матриці під час випроб і тоді довгі їх частини виступали над поверхнею зламу (рис. 3.38*в, з*). При цьому злами цих волокон були косими, а наявність незначного їх звуження в околі зламів свідчила про дію прикладених до них напружень розтягу, які передували їх руйнуванню. У випадку орієнтації вуглецевих волокон паралельно напрямку дії напружень розтягу на їх зламах спостерігали ознаки руйнування від дії тангенціальних зусиль. Це проявилось наявністю косих ділянок зламу, які розпочинались від бічної поверхні вуглецевих волокон вздовж їх периметру і сходились всередині їх зламу (рис. 3.38*д*). Отже, навіть за нормальної (стосовно напрямку діє прикладених зусиль) орієнтації волокон їх злами формувалися за механізмом в'язкого руйнування. За високої роздільної здатності виявили також ребристість на бічній поверхні вуглецевих волокон (рис. 3.38*д, е*). Причин її появи може бути декілька. Перш за все це може бути чисто технологічна особливість виготовлення вуглецевих волокон. По-друге, ця ребристість може бути слідами тертя між полімером і волокнами під час їх силового висмикування з матриці під час випроб на удар. По-третє, з урахуванням шаруватої структури графіту, можна припустити також, що це сліди виходу шаруватої структури вуглецевих волокон на їх бічну поверхню. Проте, незалежно від причини їх виникнення ця ребристість відтворюється на деяких зламах волокон смугастістю, що дає підстави стверджувати, що вона впливає на опір руйнуванню вуглецевих волокон. І залежно від орієнтації волокон відносно напрямку дії навантажень такі розшарування на мікроскопічному рівні можуть як підвищувати цей опір, так і знижувати його. Тому під час виготовлення серцевини композитних штанг важливо оптимізувати співвідношення різних за опором руйнуванню орієнтацій вуглецевих волокон, якими армують полімер.

Звісно, що морфологію бічної поверхні вуглецевих волокон найкраще було б аналізувати на ділянках зламу з їх відшаруванням від полімерної матриці (рис. 3.39). Проте значний нахил зламу до пучка електронів перешкодив якісній ідентифікації їх поверхні. Лише за високої роздільної здатності вдалось підтвердити наявність поздовжньої ребристості на поверхні вуглецевих волокон (рис. 3.39г).



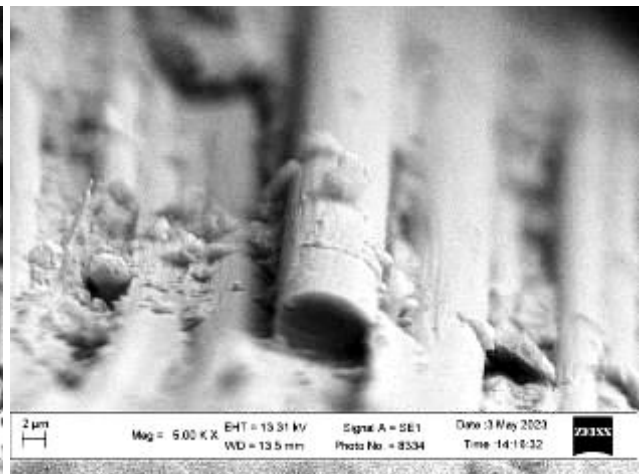
а



б



в



г

Рисунок 3.39– Мікрофрактографічні особливості зламу зразка, отриманого після випроб на удар, на етапі поширення руйнування в осерді композитної штанги, армованому вуглецевими волокнами. Напрямок руйнування зразка знизу догори.

Проте цей аналіз дав змогу чіткіше показати, що під час виготовлення осердя штанги для армування полімеру використовувались вуглецеві волокна різного діаметра (рис. 3.39*в*). В основному це були волокна діаметром 3 та 7 мкм. Такий технологічний прийом дав змогу отримати щільніше заповнення осердя вуглецевими волокнами і мінімізувати частку полімерних прошарків з нижчою здатністю витримувати значні деформації. Адже композитні штанги найчастіше використовують на складних ділянках буріння зі значними відхиленнями від нормально орієнтованої осі свердловини, які передбачають значні деформації, а, отже, і можливість дочасного руйнування і блокування свердловини.

Що стосується ділянок зламу, які були практично нормально орієнтовані до напрямку дії напружень розтягу під час ударних випробувань, то в їх межах вдалося найчіткіше виявити особливості руйнування вуглецевих волокон в осерді штанги (рис. 3.40).

Найперше це ознаки відносно крихкого руйнування полімерної зв'язки, що найчіткіше проявилось лише за високої роздільної здатності (рис. 3.40*б, г, е*). По-друге, це значна роль у руйнуванні вуглецевих волокон їх шаруватої структури, що проявилось характерною смугастістю на зламах, орієнтованою паралельно фронту поширення руйнування у зразку (рис. 3.40*б-е*). Причому на аналізованій ділянці зламу ця смугастість виявила позитивний вплив на опір матеріалу осердя руйнуванню. Адже на кожній вузькій мікроділянці зламу між паралельно розташованими гребенями між суміжними смужками руйнування в кожному з волокон орієнтація площини поширення змінювалась, що, як правило, уповільнювало їх руйнування. По-третє, на більшій частині зламів вуглецевих волокон спостерігали гребені відриву, які віялом розходились від осередку зародження руйнування на бічній поверхні волокон і гальмувалися на переході через шарувато-смугасту їх структуру.

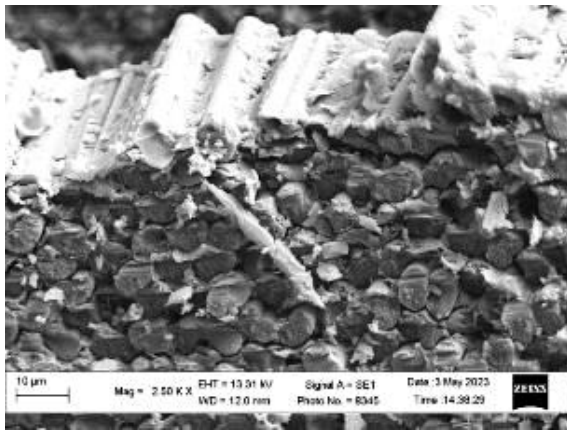
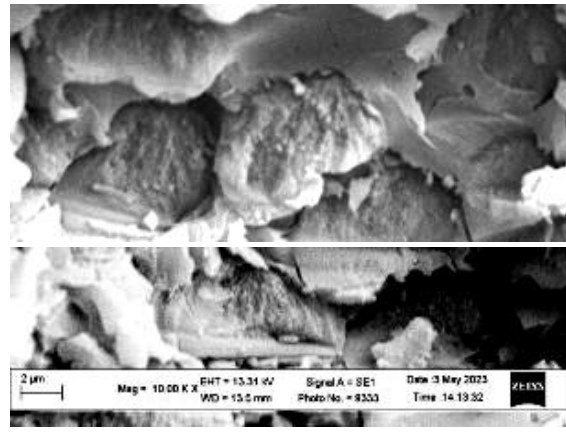
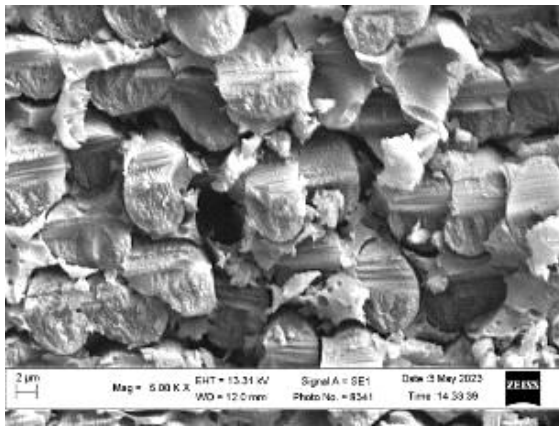
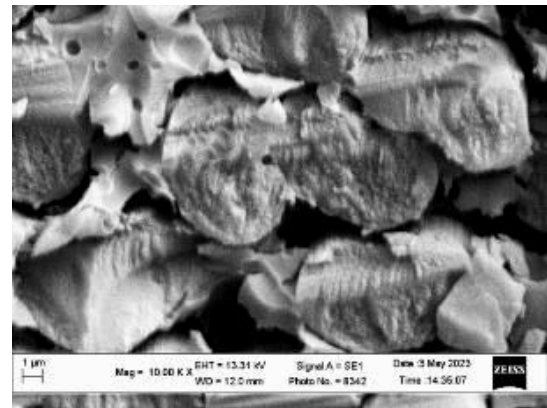
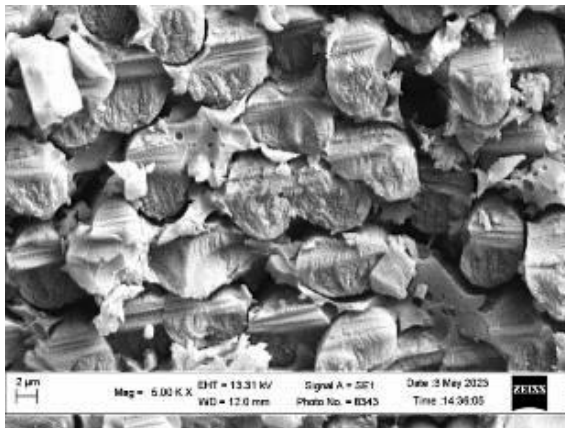
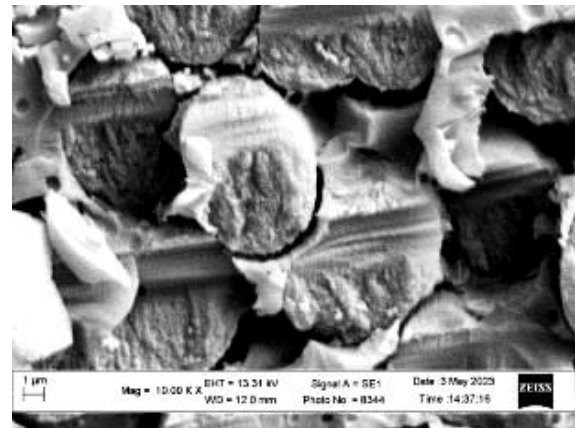
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 3.40 – Мікрофрактографічні особливості зламу зразка, отриманого після випроб на удар, на етапі поширення руйнування в осерді композитної штанги, армованому вуглецевими волокнами. Напрямок руйнування зразка знизу догори.

Висновки до розділу 3

1. Фрактографічний аналіз зламів зразків композитної штанги, випробуваних на втому, показав, що руйнування зразка з композитної штанги

розпочиналось з відшарування оболонки, армованої скло волокнами, від осердя, армованого вуглецевими волокнами, з утворенням вузьких відшарованих смужок з матеріалу самої оболонки. Це вважали прямим наслідком невідповідності здатності до пластичного деформування оболонки і осердя та невисокої адгезії між ними. Відокремлення зовнішньої оболонки штанги від осердя робить її вразливою до дії напружень розтягу, що важливо для забезпечення її роботоздатності.

2. Мікрофрактографічним аналізом показано, що поверхнево зміцнений шар з скловолоконним наповнювачем є визначальним у втомній довговічності композиційного стрижня гібридної штанги. Під впливом циклічних навантажень частина скляних волокон в околі поверхні стрижня відшаровувалася від матриці вздовж всього периметра, що підтверджувалось вторинним розтріскуванням вздовж їх меж. Після цього відшаровані волокна могли розтягуватися у кожному з циклів навантаження незалежно від матриці аж до їх руйнування. Далі відбувалося в'язке руйнування перетинок з полімерної зв'язки, розташованих між відшарованими волокнами. Концентрація напружень у вершині втомної тріщини, сформованої в такій послідовності окремих актів руйнування, створювала передумови для поширення руйнування вглиб перерізу стрижня внаслідок розтягу скловолокон попереду її вершини з формуванням косоного зламу, нахилоного в напрямі, де за консольного згину досягаються вищі напруження. Осердя стрижня, армоване вуглецевими волокнами, руйнувалося внаслідок розтягу, яке завершувалося висмикуванням частини вуглецевих волокон з полімерної матриці. Це свідчить про сумірність напружень розтягу на завершальному етапі втомного руйнування стрижня з адгезією вуглецевих волокон із матрицею.

3. Встановлено, що в міру віддалення від утомного зламу штанги кількість скловолокон в оболонці гібридної штанги, відшарованих від полімерної зв'язки, зменшується, а в околі поверхні зламу їх кількість досягає максимальної величини. На цій основі запропоновано кількісний фрактографічний показник критичної пошкодженості K_c скловолоконної оболонки гібридних штанг, який характеризує критичну кількість волокон, відшарованих від полімерної зв'язки і досягається в околі зламу штанги в момент

її руйнування спричиненого дією циклічних навантажень. Використання запропонованого показника пошкодженості скловолоконної оболонки гібридних штанг відкриває перспективу контролю за їх станом на основі аналізу кількості відшарованих від матриці волокон.

4. Розроблено методику оцінювання властивостей складових гібридної штанги (скловолоконної оболонки та вуглепластикового осердя) за дії динамічних навантажень. Показано, що ударна в'язкість скло волоконної оболонки штанги майже в півтора рази нижча за властиву вуглепластиковому осердю. Отже за дії ударних навантажень головну роль в запобіганні руйнуванню відіграватиме вуглепластикове осердя штанги.

5. Розкрито механізм руйнування гібридних штанг за динамічних навантажень. Показано, що поверхня зламу вуглець полімерного осердя штанги формувалась у вигляді каскаду з окремих ділянок, в межах яких орієнтація вуглецевих волокон суттєво змінювалась – від перпендикулярної до осі штанги до паралельної їй. На ділянках з перпендикулярною орієнтацією волокон зафіксували різку зміну площини руйнування внаслідок відшарування волокон від полімерної матриці. Для підвищення роботоздатності штанг кількість таких ділянок в перерізі штанги слід мінімізувати, оскільки їх сприятлива орієнтація до напрямку поширення руйнування і, відповідно, низький опір поширення руйнування вздовж таких пакетів з вуглецевих волокон сприяє їх дочасному руйнуванню. На ділянках з паралельною орієнтацією чи близькою до неї руйнування композиту з вуглецевих волокон та полімеру, відбувалось за в'язким механізмом деструкції полімеру та волокнистого відносно в'язкого руйнування волокон. Особливістю руйнування волокон стали поперечні до напрямку поширення руйнування смуги, в межах яких відбувалась зміна напрямку поширення руйнування в кожному із волокон. Це пригальмовувало руйнування кожного з волокон і штанги в цілому. Їх появу пов'язали із здатністю вуглецевих волокон до розшарування вздовж окремих паралельних площин, про наявність яких свідчила також ребриста бічна поверхня волокон. Крім того в структурі осердя для армування було використано вуглецеві волокна двох різних діаметрів (3 і 7 мкм). Це збільшувало щільність їх упакування і, відповідно, зменшувало

прошарки полімерної зв'язки. В такий спосіб забезпечувалась висока деформівна здатність штанг і убезпечувались їх від дочасного крихкого руйнування.

6. За динамічних навантаження штанги на ділянці її оболонки, виконаної з полімеру, армованого одно напрямленими скловолокнами, руйнування самих волокон відбувалось за крихким механізмом відколу, а полімерної матриці – за в'язким механізмом з деструкцією зв'язки на дрібні фрагменти. Розпочиналось руйнування кожного з волокон дрібними ділянками мікровідколів в різних точках вдовж їх периметру, які зливалися, формуючи більші поверхні відколу, поширення руйнування вздовж яких завершувалось в одній точці. Напрямок поширення цих відколів визначав напрямок руйнування окремих волокон, який істотно відрізнявся від волокна до волокна і не співпадав з магістральним напрямком поширення руйнування у зразку. Це ознака перерозподілу напружень і деформацій між скловолокнами і полімерною зв'язкою та між оболонкою і вуглеполімерним осердям. Крім того не можна виключити наявності мікродефектів у самих волокнах, які ставали осередками зародження мікровідколів. Тому за динамічних навантаження штанг (особливо при значному відхиленні напрямку буріння від нормалі) дуже важливо забезпечити міцну адгезію скловолокон і полімерної матриці, щоб вони працювали як єдине ціле. Бо за згину їх відокремлення одне від одного робить скловолокна уразливими до відколу, а штанги – до руйнування в цілому.

7. Проведені фрактографічні дослідження зламів зразків з композитних штанг показали, що вдосконалення технології їх виготовлення з точки зору ущільнення волокон оболонки, збільшення адгезії оболонки і осердя та оптимізації частки перерізу осердя за нахилом вуглецевих волокон до осі штанги є важливим для підвищення опору їх руйнування за динамічних навантажень згином, необхідного для безпечної експлуатації штанг на значних глибинах із значним відхиленням свердловин від нормальної орієнтації.

РОЗДІЛ 4

АТЕСТАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ НАСОСНИХ ШТАНГ ЗА ВТОМНОЮ ДОВГОВІЧНІСТЮ ТА РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ З'ЄДНАННЯ ТІЛА ГІБРИДНОЇ НАСОСНОЇ ШТАНГИ ЗІ СТАЛЕВОЮ ГОЛОВКОЮ

4.1 Порівняння втомних характеристик та особливостей росту тріщин в гібридних, склопластикових та сталевих насосних штангах

Роботоздатність насосних штанг залежить від впливу різних експлуатаційних чинників, що спричиняють появу дефектів. Такі дефекти виконують роль концентраторів напружень та стають осередками зародження руйнування. На практиці найчастіше втрата роботоздатності штанг відбувається внаслідок обриву колони. Вплив цих дефектів на опір втомному руйнуванню насосних штанг стає особливо небезпечним за експлуатації в технологічних середовищах, до складу яких входять агресивні компоненти. Важливо враховувати вплив і технологічних (утворених на етапі виготовлення, транспортування і монтажу штанг), і експлуатаційних (сформованих під час експлуатації внаслідок впливу реальних чинників технологічного процесу добування нафти) дефектів на опір корозійному руйнуванню насосних штанг.

Для зменшення впливу корозійного середовища при видобуванні нафти, все ширше використовують насосні штанги з полімерних композитів – склопластикові, вуглепластикові та гібридні [2, 3]. Проте закономірності зародження і росту втомних тріщин в тілі композитних штанг та оцінювання їх залишковий ресурс залишаються не розкритими.

На рисунку 4.1 представлені криві витривалості за різної ймовірності неруйнування бальзатопластикових [37], гібридних і склопластикових НШ за їх навантаження обертовим консольним згином. В результаті випробовувань у пластовій воді встановлено, що характеристики витривалості склопластикових НШ в корозійних середовищах вищі ніж сталевих [5], і ця перевага проявлялася

за багатоциклової втоми, коли кількість циклів навантаження перевищувала $1,2 \times 10^7$ циклів. Характеристики опору втомі гібридних штанг значно вищі, ніж склопластикових.

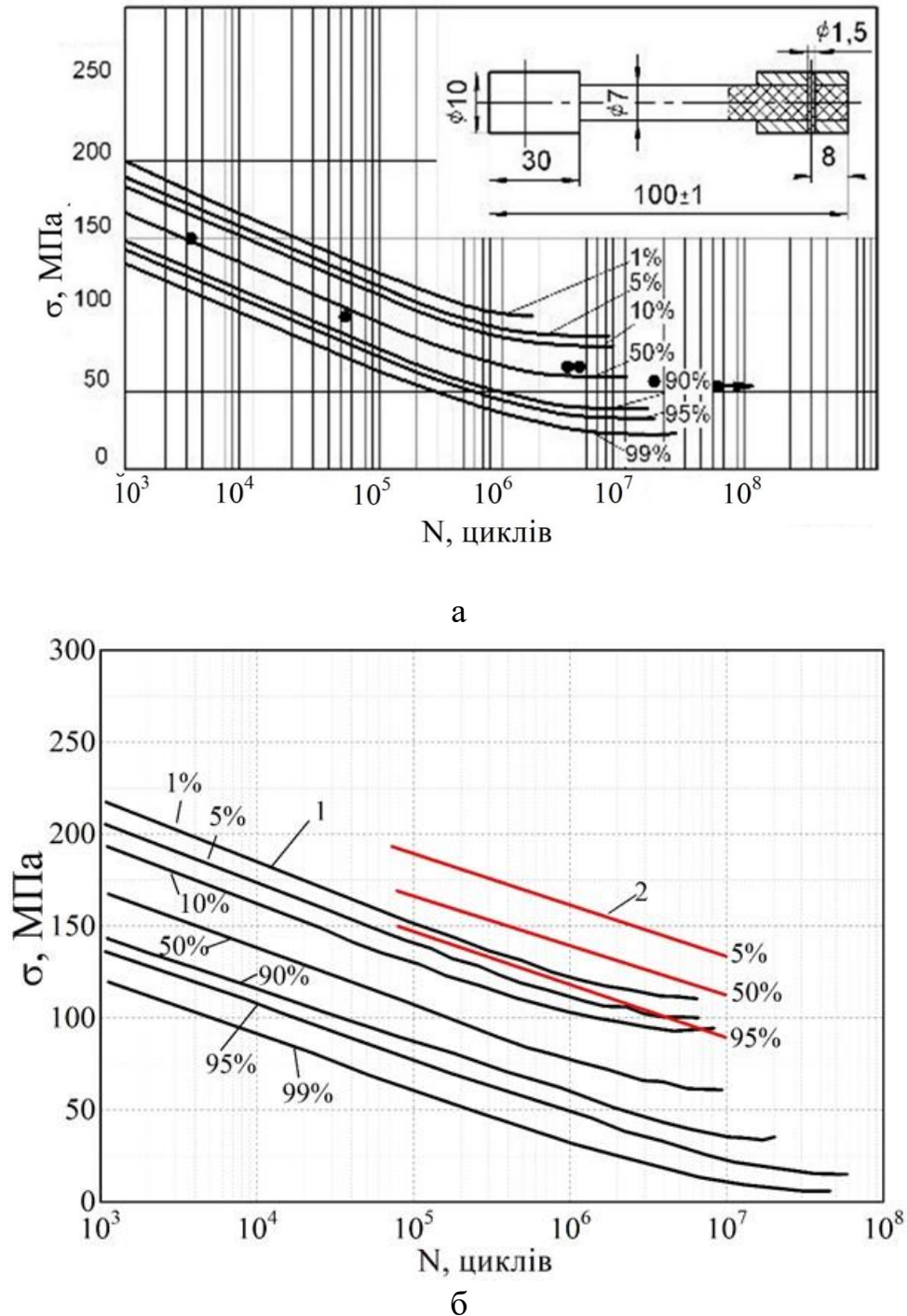


Рисунок 4.1 – Криві втомної витривалості базальтопластикових (а), склопластикових (1) та гібридних (2) стрижнів насосних штанг діаметром 22 мм та 19 мм, відповідно (б) за їх навантаження круговим консольним згином в пластовій воді, отримані за різної ймовірності неруйнування (%).

За високих напружень обертового консольного згину руйнування в гібридних штангах поширювалося аж на відстань до 80–100 мм від їх головок, і характеризувалося інтенсивним розшаруванням волокон у склопластиковій оболонці. Зі зниженням амплітуди змінних напружень згину зона пошкодженості у вигляді розшарувань локалізувалася безпосередньо в околі з'єднання тіла НШ з головкою, і обумовлено це інтенсивним перебігом фретінг процесів через істотну відмінність модулів пружності сталі і композита. За напружень рівних чи нижчих визначеної границі витривалості, руйнування тіла гібридних штанг не фіксували (впродовж бази випробувань 5×10^7 циклів), хоча в окремих місцях штанги часом траплялися повздовжні тріщини.

Криві витривалості за різної ймовірності неруйнування $P(N)$ базальтопластикових стрижнів, склопластикових та гібридних насосних штанг діаметром 22 мм та 19 мм показують, що за ймовірності неруйнування гібридні штанги в діапазоні 5–50% фактично перевершують стрижні штанг із склопластику та базальтопластику і за втомною витривалістю, за втомною міцністю (рис. 4.1). Зокрема за рівня напружень 100 МПа під час втомних випробувань з імовірністю 95% можна стверджувати, що гібридні штанги не будуть руйнуватися навіть після $7 \cdot 10^6$ циклів навантаження. Тоді як за таких самих умов навантаження і ймовірності неруйнування склопластикові штанги не будуть руйнуватися лише впродовж $2 \cdot 10^5$, а базальтопластикові лише впродовж 10^4 циклів навантаження. Таким чином вважали, що перевага гібридних НШ за втомних навантажень очевидна.

Для порівняння проаналізували також результати, отримані за втомного навантаження обертовим консольним згином частотою 15 Гц зразків насосних штанг зі сталі 20Н2М діаметром 19 та 22 мм. Зразки були випробувані в середовищі 3% водного розчину NaCl, який періодично (1 раз на добу) насичували сірководнем до граничної концентрації (~2500 мг/л) [11]. Порівняли закономірності зміни втомної витривалості сталевих штанг з відповідними кривими, отриманими на аналізованих зразках, виготовлених із склопластикових та гібридних штанг (рис. 4.2).

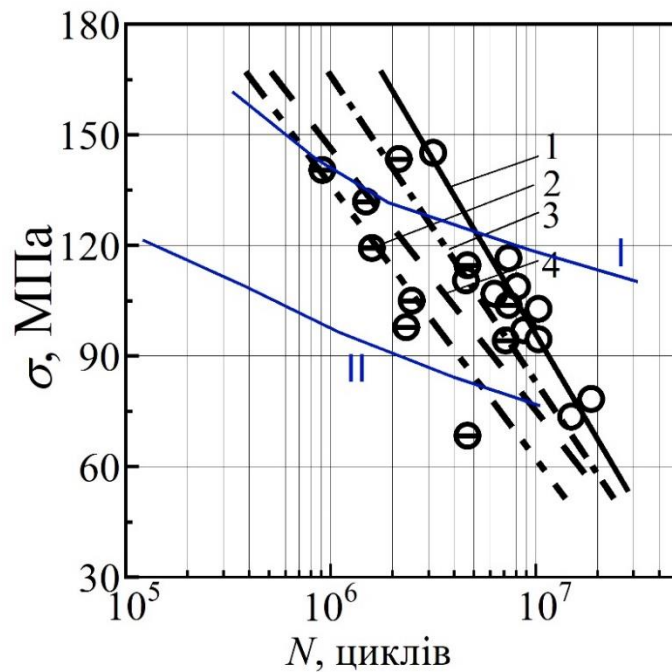


Рисунок 4.2 – Криві корозійно втомної витривалості, отримані на зразках зі сталі 20Н2М [11] вирізаних із насосних штанг діаметром 19 (1, 2) та 22 (3, 4) мм з технологічними (1, 3), або експлуатаційними (2, 4) дефектами, виявленими неруйнівним контролем, отримані за випробувань у 3% водному розчині NaCl, насиченому сірководнем, та на зразках, вирізаних із гібридних (I) та склопластикових (II) штанг.

Загалом вплив поверхневих технологічних дефектів на корозійно-втомну витривалість сталевих насосних штанг виявився несуттєвим (залежності 1 та 3, рис. 4.2). Довговічність штанг без дефектів і з технологічними дефектами майже однакова. Відмінності між ними зумовлені скоріш за все розкидом даних за втомних випробувань сталі. Загалом відзначили лише незначне зниження втомної витривалості зі збільшенням діаметру сталевих НШ. Зокрема, за бази випробувань 10^7 циклів навантаження для штанг діаметром 19 мм найвищі допустимі напруження становили 95 МПа, а для штанг діаметром 22 мм – 85 МПа. Експлуатаційні дефекти в зразках із штанг, такі як утомні тріщини, корозійні виразки, пітінги формувалися в штангах ще під час їх тривалої експлуатації в свердловинах. Звісно, що ці дефекти дещо відчутніше знижують

утомну витривалість штанг за впливу агресивного середовища. Аналіз утомних кривих засвідчив, що показники втоми для зразків із штанг з експлуатаційними дефектами виявились значно нижчими, порівняно з властивими для штанг з технологічними дефектами.

З аналізу та порівняння даних для сталевих та гібридних і склопластикових штанг (I і II відповідно на рис. 4.2) прийшли до висновку, що за бази випроб 10⁷ циклів навантаження аж до напружень близьких 90 МПа склопластикові штанги (II) не мали переваг перед сталевими, тоді як гібридні штанги (I) вже від напружень нижчих за 150 МПа починали перевершувати за втомною витривалістю сталеві. Отже, проведене порівняння однозначно показує доцільність використання гібридних штанг замість сталевих, якщо дотримуватись при цьому обмеження за напруженнями згину (вони не повинні досягати 120 МПа). У цьому випадку штанги можна буде експлуатувати мало не до 10⁷ циклів навантаження до руйнування (рис. 4.2). Тоді як сталеві штанги за таких силових умов експлуатації руйнуватимуться вже після (3...6)·10⁶ циклів навантаження (залежно від наявних на їх поверхні технологічних та експлуатаційних пошкоджень, криві 1–4 на рис. 4.2).

Порівняли між собою криві втоми $\sigma - N$, отримані при випробуванні на обертовий консольний згин зразків із склопластикових, гібридних та сталевих насосних штанг (рис. 4.3). За бази випробувань 2·10⁷ циклів гібридні насосні штанги з серцевиною, армованою вуглецевим волокном, і оболонкою, армованою скловолокном, показали найвищі характеристики [76]. За результатами випробувань умовна границя витривалості гібридних штанг становила 115 МПа (крива I на рис. 4.3), тоді як склопластикова штанга виходила на рівень 75 МПа (крива II), а сталева (крива III) – досягала рівня 40 МПа.

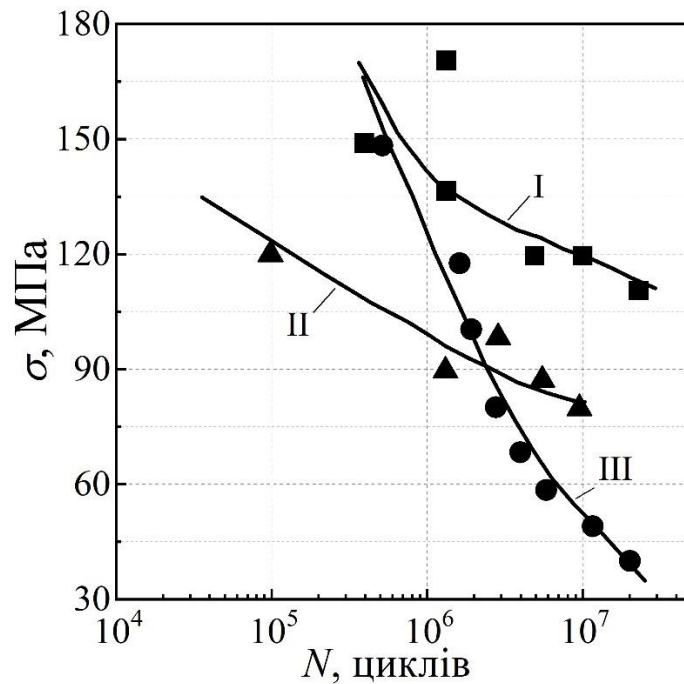


Рисунок 4.3 – Криві втомної витривалості $\sigma - N$ склопластикових (II), гібридних (I) та сталевих штанг (III).

Важливим аспектом забезпечення безвідмовної роботи колон насосних штанг є врахування діаметра кожного з її елементів, який визначає його спроможність витримувати різнотипні напруження під час експлуатації. Експериментальні дослідження за обертового згину показали, що ресурс штанг діаметром 19 мм знижується значно швидше, ніж штанг більшого діаметра. Так з аналізу кривих $a_c - \sigma$, отриманих з відповідних даних для промислових штанг діаметром 19, 22 та 25 мм (суцільні лінії на рис. 4.4), зруйнованих в експлуатаційних умовах, та для зразків із штанг діаметром 19 та 22 мм, зруйнованих в лабораторних умовах (пунктирні лінії на рис. 4.4) очевидно, що критичні значення довжини тріщини, які передували спонтанному поширенню руйнування на весь переріз штанг чи зразків з них, були більшими в штангах діаметром 22 мм порівняно з штангами діаметром 19 мм. Причиною такої різниці вважали вищу чутливість штанг меншого діаметру до дефектів. Адже за приблизно однакової глибини дефектів, які можуть виникати на поверхні сталевих штанг під час їх експлуатації в свердловині, чим більший діаметр

штанги, тим більша площа його перерізу і тому менша частина його пов'язана з пошкодженням.

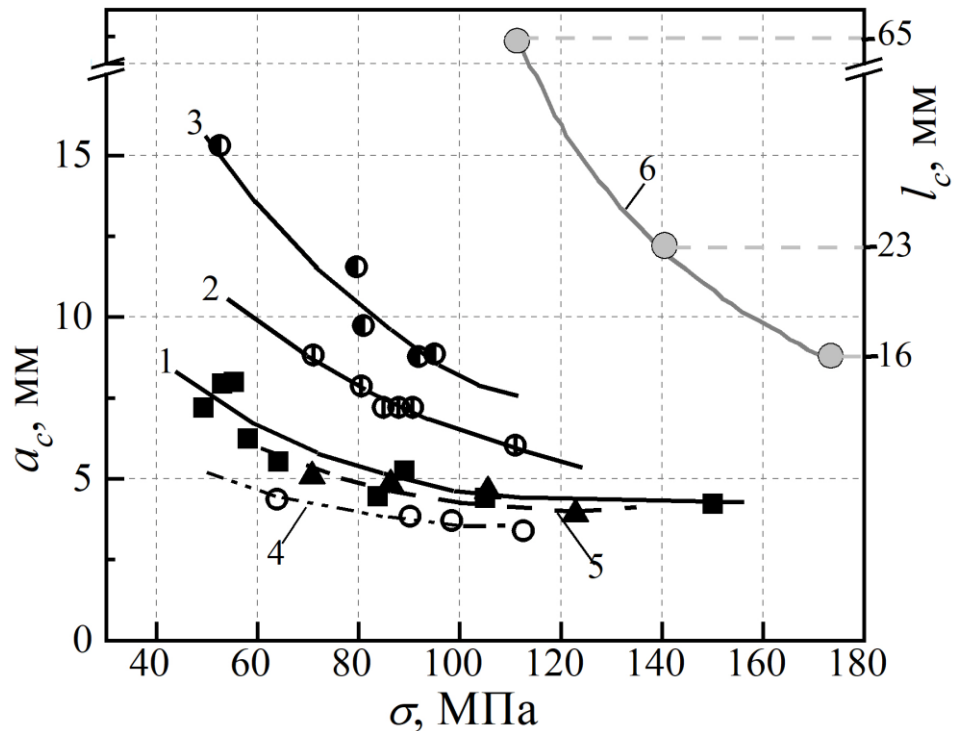


Рисунок 4.4 – Зміна критичної довжини корозійно-втомної тріщини a_c (1–5), що передувала спонтанному руйнуванню сталевих штанг, зруйнованих в експлуатаційних умовах (суцільні лінії), чи зразків зі штанг (пунктирні лінії), залежно від напружень σ , що виникали в їх робочих перерізах за діаметра штанг 19 (1, 4), 22 (2, 5) і 25 (3) мм та в гібридних штангах (6) діаметром 19 мм (6). Критичну довжину колових корозійно-втомної тріщини l_c заміряли на бічній поверхні сталевих штанг та зразків з них та уточнювали за зламами на переході до зон їх спонтанного руйнування (1–5), а для гібридних штанг заміряли максимальну довжину повздовжньої тріщини на їх бічних поверхнях l_c (6).

Слід зазначити, що у випадку сталевих штанг, коли тріщина, яка зароджувалася в найбільш напруженому перерізі зразка чи штанги і поширювалася вглиб їх перерізу, полишаючи на поверхні слід у вигляді траєкторії свого росту, на основі замірів її довжини вздовж периметру зразків чи штанг на їх бічній поверхні, можна прогнозувати глибину цих тріщин в їх

діаметральному перерізі. Проте у випадку гібридних штанг такий підхід виявився непридатним.

Попри якісно подібний характер зміни критичної довжини тріщини залежно від рівня прикладених до зразків напружень зберігався і у випадку гібридних штанг. Звідси припустили, що поширення відшарувань у склопластиковій оболонці гібридних штанг аж до критичного розміру однієї із поздовжніх тріщин l_c мало би корелювати із збільшенням довжини колової тріщини в нормально орієнтованому перерізі штанги. Проте множинні розшарування в склопластиковій оболонці розгалузили вершину нормально орієнтованої втомної тріщини, яка зародилася у перерізі з максимальними напруженнями (за консольного згину це відповідає лінії защемлення тіла гібридної штанги у сталевій головці) і тим самим посприяли її уповільненню. Адже згідно з підходами механіки руйнування напружено-деформований стан у вершині кожного з відгалужень тріщин знижується в $2^{1/2}$ рази. Такому уповільненню руйнування в нормально-орієнтованому перерізі штанги і його пришвидшенню в напрямі відшарування сприяла також шарувата структура розташування скляних волокон в оболонці штанги. Адже важко забезпечити високий рівень когезивної міцності з'єднання між гладкими скловолкнами та полімерною матрицею. У будь-якому разі цим експериментом було показано, що існує гранична залежність $l_c - \sigma$. І якщо максимальна з довжин усіх наявних на бічній поверхні насосно-стрілевої штанги поздовжніх тріщин потрапляє нижче цієї граничної залежності, то під контролем штангу можна продовжити експлуатувати. Особливо, якщо використовувати штангу за нижчого рівня напружень.

Проаналізували також експериментально отримані залежності швидкості росту тріщини da / dN від кількості циклів навантаження N зразків зі сталі 20Н2М, вирізаних зі штанг діаметром 22 мм (рис. 4.5). З їх аналізу прийшли до висновку, що за напружень 100 МПа, які сумірні з експлуатаційними навантаженнями штанг, критична швидкість росту тріщини у середовищі 3% водного розчину NaCl, досягалася в штангах після $9 \cdot 10^7$ циклів навантаження

(крива 2 на рис. 4.5), а за додаткового насичення розчину сірководнем критичний стан досягався після $5,5 \cdot 10^7$ циклів їх навантаження (крива 1). Ці швидкості досягалися, коли довжина тріщини по периметру штанги і її глибина досягали відповідно 15...16 та 4,5...5,6 мм. Для штанг інших типорозмірів критична глибина тріщини, яка передуює практично спонтанному руйнуванню зразків із сталевих штанг, становила 3...4 мм (за діаметра штанги 16 мм), 4...5 мм (19 мм) і 5...6 мм (25 мм).

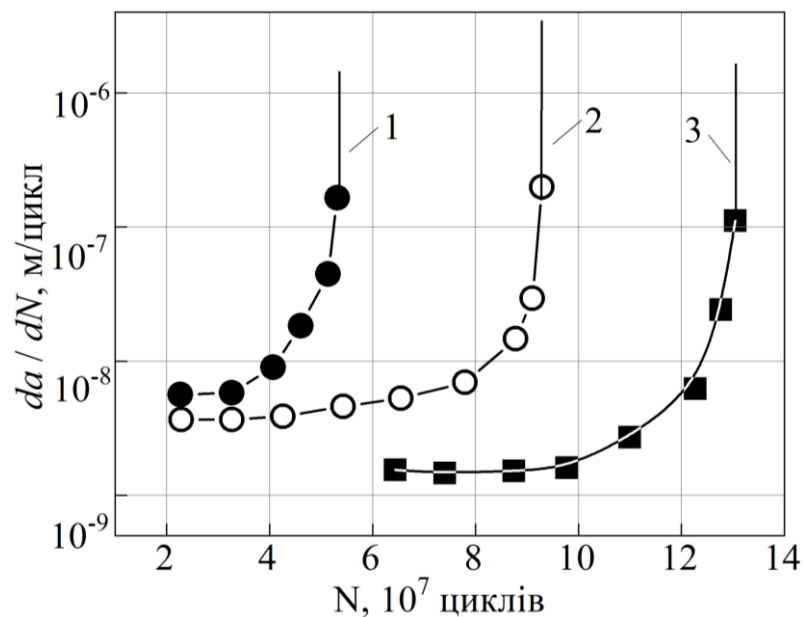


Рисунок 4.5 – Залежність швидкості росту втомних тріщин da/dN від числа циклів навантаження N зразків із насосних штанг діаметром 22 мм зі сталі 20Н2М без (1, 2) та після їх попереднього зміцнення металевими щітками (3), отримані за напружень 100 (1, 2) та 150 (3) МПа у середовищі 3% водного розчину NaCl (2) та за його додаткового насичення сірководнем (1, 3).

Слід відзначити також, що після оброблення поверхні сталевих штанг з використанням металевих щіток критична швидкість росту тріщини за випробувань у розчині насиченому сірководнем причому навіть за вищих напружень (150 МПа) досягалася після ще більшої кількості циклів навантаження $N = 1,3 \cdot 10^8$ (крива 3, рис 4.5).

Проаналізували швидкість росту тріщини da / dN в гібридних штангах та встановили, що за напружень 110 МПа характер її зміни змінюється немонотонно в залежності від частки використаного ресурсу штанги N / N_f (де N та N_f відповідають кількості циклів навантаження зразка чи штанги на потічний момент випробувань та в момент їх руйнування відповідно) (крива 1, рис. 4.6). Тоді як за вищих рівнів напружень (140 і 175 МПа) (криві 2 і 3, рис. 4.6) характер зміни цієї залежності зберігав тенденцію до монотонного зростання da / dN в міру вичерпування ресурсу гібридної штанги. Виявлену невідповідність характеру зміни цієї залежності за низького значення σ пов'язали з потребою у накопиченні пошкоджень у склопластиковому поверхневому шарі гібридної штанги на мікроструктурному рівні (декогезія скляних волокон від полімерної матриці) перш ніж виникнуть передумови для зародження і поширення руйнування. Тоді як за впливу напружень 140 і 175 МПа ці передумови на мікроструктурному рівні можуть існувати в багатьох місцях, що сприяло доволі рівномірності росту тріщин відшарувань після їх зародження [76].

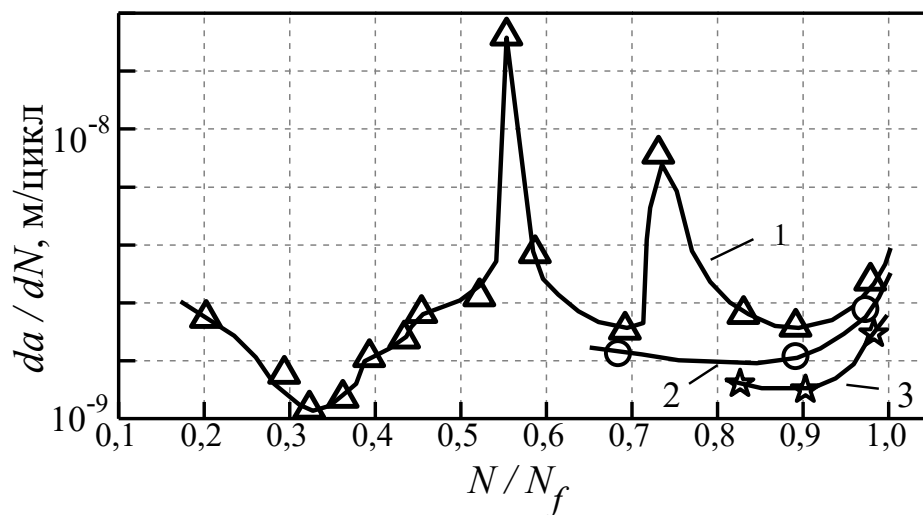


Рисунок 4.6 – Зміна швидкості росту тріщин da / dN в гібридних насосних штангах за напружень 110 (1), 140 (2) та 175 (3) МПа в залежності від частки виробленого ресурсу N / N_f .

Інкубаційний період до зародження тріщин за напружень 110 МПа не перевищував 20 % повного ресурсу штанги (крива 1, рис. 4.6) і досягався після $2,5 \cdot 10^7$ циклів навантаження. Під час випробувань на втому за дії напружень 140 МПа поздовжні тріщини починали зароджуватися після вичерпання 65% ресурсу штанги (крива 2, рис. 4.6). Ці тріщини були довгими, а швидкість їх росту вищою, ніж утворених за напружень 175 МПа. В останньому випадку до зародження тріщини вичерпувалося до 80% ресурсу (крива 3, рис. 4.6), а самі тріщини на цьому етапі були найкоротшими і поширювалися вони найповільніше, тоді як на завершальному етапі їх ріст стрімко пришвидшувався.

Отже, втомні випробування насосних штанг з технологічними і експлуатаційними дефектами в агресивних середовищах дозволили визначити небезпечні розміри цих дефектів, і на підставі цього проводити раціональне відбракування штанг. Відбракування насосних штанг можна проводити також і під час їх докритичного росту (з урахуванням критичних розмірів тріщин залежно від рівня напружень, за яких експлуатувалися штанги з цими тріщинами), але це вже може бути небезпечним, оскільки тріщини на цьому етапі їх поширення ростуть досить швидко.

4.2 Розвиток підходів до оцінювання залишкового ресурсу насосних штанг

4.2.1 Теоретичні підходи до розрахунку залишкового ресурсу насосних штанг з утомними тріщинами

Під час роботи в свердловині НШ часто виходять з ладу внаслідок зародження та росту втомної тріщини. Тому оцінювання залишкового ресурсу штанг залишається актуальним завданням, яке незмінно привертає увагу дослідників і експлуатаційників. На натурному стенді випробовували гібридні штанги та для порівняння штанги діаметром 19 мм зі сталі 20Н2М без та з поліуретановим покриттям їх поверхні [77]. Контроль і фіксацію доажини

повздожніх тріщин у гібридних та колових тріщин у сталевих штангах здійснювали на поверхні НШ в околі їх з'єднання зі сталевими головками.

Для розрахунку критичної кількості циклів навантаження $N_{кр}$, за якого поширення тріщини у штанзі переходило до неконтрольованого пришвидшення її росту, записали диференційне рівняння:

$$\frac{da}{dN} = k \frac{N}{N_f} + m \quad (4.1)$$

де $\frac{da}{dN}$ – приріст довжини тріщини da за збільшення числа циклів навантаження dN ; N та N_f – потічне значення кількості циклів навантаження та їх кількість в момент руйнування НШ, k та m – параметри рівняння регресії (рис. 4.8). Тоді приріст тріщини записали як:

$$da = \left(k \frac{N}{N_f} + m\right) dN \quad (4.2)$$

Шляхом інтегрування диференційного рівняння визначили різницю між поточним значенням довжини тріщини l_p та її довжиною в момент зародження l_3 , коли її виявили на бічній поверхні НШ:

$$l_p - l_3 = \int_{N_3}^{N_{кр}} \frac{kNdN}{N_f} + \int_{N_3}^{N_{кр}} m \cdot dN = \frac{k}{N_f} N dN \uparrow \int_{N_3}^{N_{кр}} + b dN \uparrow \int_{N_3}^{N_{кр}} = \frac{1}{2} \frac{k}{N_f} (N_{кр}^2 - N_3^2) + m(N_{кр} - N_3) \quad (4.3)$$

З урахуванням, що $l_3 = 0$, підстановки меж інтегрування та після перетворень отримали рівняння:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{k}{N_f} (N_{кр}^2 - N_3^2) + m(N_{кр} - N_3) - l_p = 0. \quad (4.4)$$

Переписали його у вигляді:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{k}{N_f} N_{кр}^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{k}{N_f} N_3^2 + mN_{кр} - mN_3 - l_p = 0 \quad (4.5)$$

Тоді записали рівняння у спрощеному вигляді:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{k}{N_f} N_3^2 - mN_3 - l_p = C, \quad (4.6)$$

Ввели позначення: $\frac{1}{2} \cdot \frac{k}{N_f} = A$;

І отримали рівняння в остаточному вигляді:

$$AN_{кр}^2 + mN_{кр} - C = 0 \quad (4.7)$$

Одержане рівняння відповідає квадратному рівнянню з дискримінантом:

$$D = m^2 - 4A \cdot C. \quad (4.8)$$

Здійснивши відповідні перетворення, отримали вираз для визначення :

$$N_{кр} = \frac{-m \pm \sqrt{D}}{2A} = \frac{-m + \sqrt{m^2 - 2 \frac{k}{N_f} \left(\frac{1}{2N_f} N_3^2 - mN_3 - l_P \right)}}{\frac{k}{N_f}} \quad (4.9)$$

Після нескладних спрощень критичну кількість циклів навантаження $N_{кр}$, яка передуює переходу до спонтанного руйнування НШ, запропоновано розраховувати за нижченаведеною формулою:

$$N_{кр} = -\frac{bN_f}{k} \pm \frac{N_f}{k} \sqrt{m^2 - 2 \frac{k}{N_f} \cdot \left(\frac{1}{2N_f} N_3^2 - mN_3 - l_{кр} \right)} \quad (4.10)$$

За допомогою запропонованого методу розрахунку $N_{кр}$ можна визначити критичне число циклів до повного руйнування N_f (рис. 4.7). Із експериментально отриманої залежності довжини тріщини l на різних етапах вичерпування ресурсу НШ N/N_f можна визначити не тільки довжину тріщини, яка передуює її спонтанному поширенню $l_{кр}$, але і значення k та m і розрахувати N_f яке відповідає N_f на всіх наступних рисунках.

Діаграму росту тріщини, яка поширювалася від зародження у сталевих штангах зі сталі 20Н2М без та з поліуретановим покриттям порівняли з діаграмами росту тріщин у гібридній НШ (рис. 4.7). З отриманих залежностей очевидно, що в насосній штанзі зі сталі 20Н2М без покриття тріщину на її бічній поверхні виявили вже після втрати 50% її ресурсу (крива 1, рис. 4.7). За її ростом спостерігали, починаючи від довжини 5 мм і аж до 58 мм, яка передувала спонтанному руйнуванню штанги. У насосній штанзі зі сталі 20Н2М з поліуретановим покриттям тріщина зародилася наприкінці наробітку (після понад $0,8 N_f$) і дуже стрімко розвивалася до довжини біля 60 мм. У гібридній насосній штанзі, випробуваній за напружень 140 МПа, тріщину довжиною 4,5 мм виявили після $0,67 N_f$, і її критична довжина перед руйнуванням досягала 30 мм.

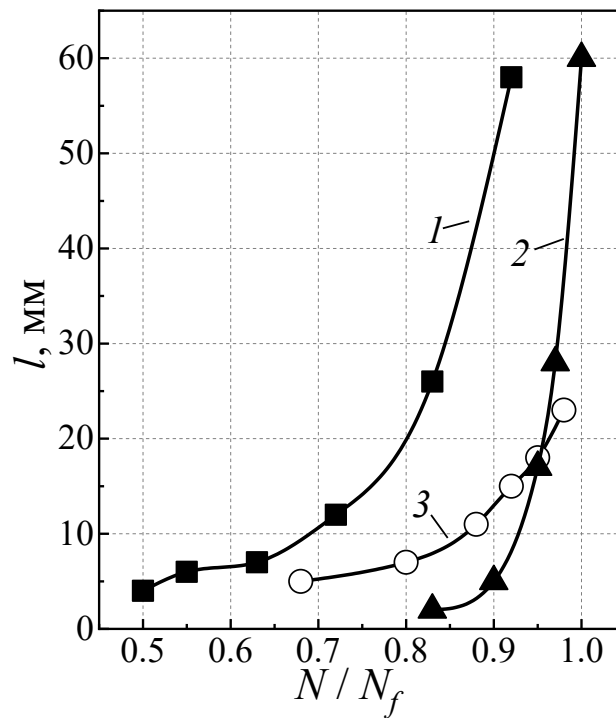


Рисунок 4.7 – Зміна довжини втомної тріщин l в залежності від показника вичерпування ресурсу N / N_f сталевих насосних штанг зі сталі 20Н2М діаметром 19 мм без покриття (крива 1, $\sigma = 120$ МПа) та з поліуретановим покриттям (крива 2, $\sigma = 180$ МПа) та гібридної насосної штанги (крива 3, $\sigma = 140$ МПа).

Проаналізували діаграми зміни швидкості росту тріщини da/dN в залежності від показника вичерпування ресурсу N/N_f (рис. 4.8). Встановили, що в період повільного (докритичного) росту тріщин корозійної втоми їх швидкість V зростала за лінійною залежністю, і тому її можна описати рівнянням лінійної регресії.

Так залежність зразка зі сталевій штанги у середовищі (3% NaCl + H₂S) за розмаху напружень 100 МПа швидкість докритичного росту корозійно-втомної тріщини da/dN описали залежністю:

$$da/dN = 4 \cdot 10^{-9} N / N_f + 4 \cdot 10^{-9} \text{ (м/цикл)}$$

Тоді як за за такого ж розмаху напружень під час випробувань, але у 3% водному розчині NaCl без його насичення сірководнем швидкість da/dN описали лінійною залежністю:

$$da/dN = 5 \cdot 10^{-9} N / N_f + 2 \cdot 10^{-9} \text{ (м/цикл)}$$

А для зразка зі сталевї штанги, поверхню якого додатково механічно обробили металевою щіткою, випробуваного у середовищі (3% NaCl + H₂S) за вищого розмаху напружень 150 МПа, швидкість докритичного росту корозійно-втомної тріщини описали залежністю:

$$da/dN = 5 \cdot 10^{-9} N/N_f - 1 \cdot 10^{-9} \text{ (м/цикл)}$$

Для гібридної штанги за напружень 140 МПа швидкість докритичного росту корозійно-втомної тріщини описали залежністю

$$da/dN = 9 \cdot 10^{-9} N/N_f - 5 \cdot 10^{-9} \text{ (м/цикл)}.$$

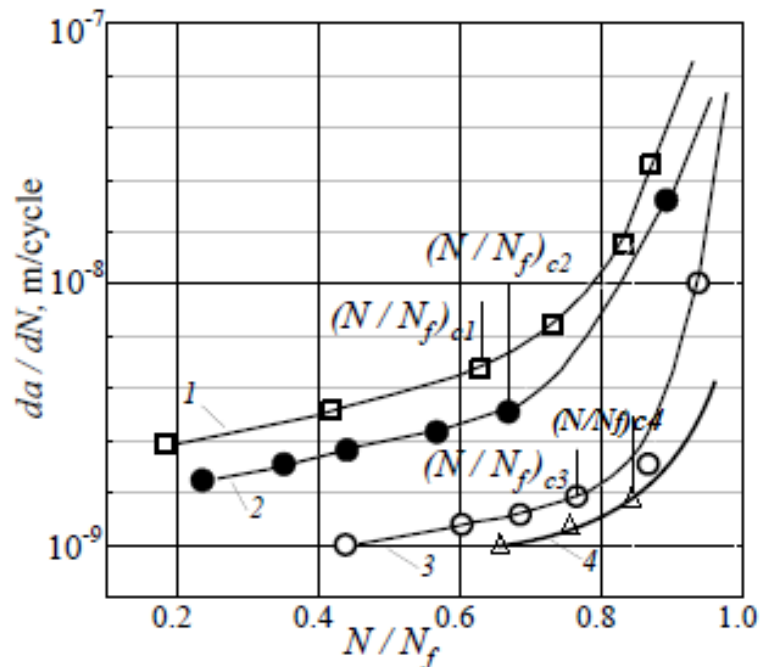


Рисунок 4.8 – Зміна швидкості корозійно-втомного росту тріщини da/dN залежно від показника вичерпування ресурсу N / N_f зразків із насосних штанг діаметром 22 мм із сталі 20H2M (1–3) без оброблення їх бічної поверхні металевими щітками (1, 2) та після неї (3), випробуваних за напружень 100 (1, 2) та 150 (3) МПа у 3% водному розчині NaCl, насиченому H₂S, (1) та в 3% розчині NaCl (2, 3) та зразків із гібридних штанг діаметром 19 мм (4), випробуваних на повітрі за напружень 140 МПа (N і N_f відповідають числу циклів навантаження зразка в поточний момент і за його руйнування відповідно).

У всіх цих залежностях N і N_f означають число циклів навантаження зразків із штанг в поточний момент і в момент їх руйнування відповідно. З їх використанням можна визначити швидкість росту тріщини на будь-якому етапі до критичного поширення тріщини у сталевих штангах, а значить і прогнозувати міру вичерпування їх ресурсу.

4.2.2. Результати оцінювання показника вичерпування ресурсу гібридних насосних штанг

Експериментально отримали і проаналізували діаграми поширення тріщин у гібридній насосній штанзі за різних напружень (рис. 4.9). Встановили, що за випробувань при напруженнях 110 МПа поздовжня тріщина на бічній поверхні НШ з'явилася найраніше (після $0,2 N_f$), але поширювалася вона повільно, і критичне значення її довжини перед руйнуванням досягло 65 мм. Тоді як за напружень 140 МПа тріщина з'явилася після $0,67 N_f$, і її критична довжина перед руйнуванням досягала лише 23 мм. А під час випробувань за напруження 175 МПа тріщину в НШ зафіксували, коли вичерпування ресурсу досягло $0,85$, а її довжина перед спонтанним руйнуванням досягала лише 16 мм.

Отримані результати порівняли з даними про особливості руйнування склопластикових штанг, отриманих в аналогічних умовах [30]. Спільною закономірністю і для склопластикових, і для гібридних штанг було те, що зі зростанням величини прикладеного до штанг змінного навантаження довжина найбільшої тріщини l , яка досягалася в момент спонтанного її поширення, зменшувалася (рис. 4.9).

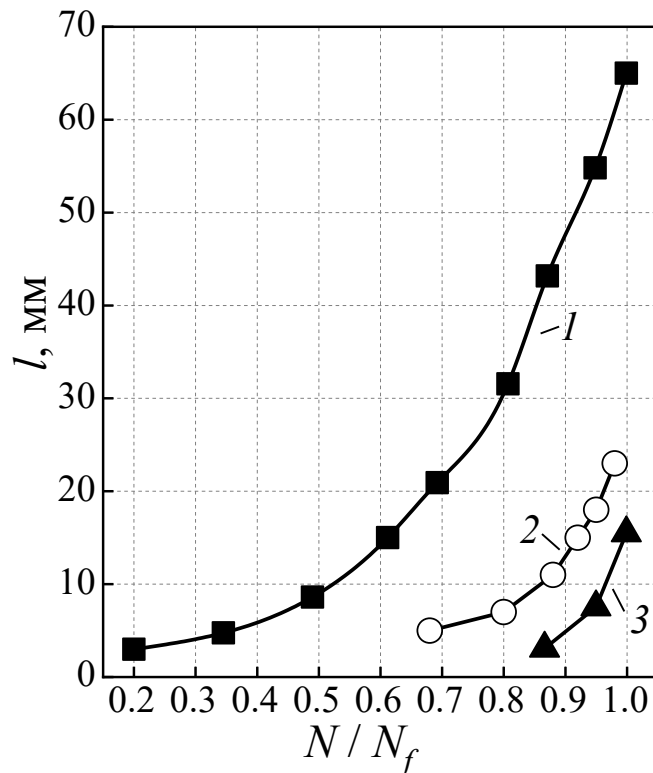


Рисунок 4.9 – Залежності зміни довжини втомних тріщин l від частки виробленого ресурсу N / N_f для гібридних насосних штанг діаметром 19 мм, випробуваних за напружень $\sigma = 110$ МПа (1), 140 МПа (2), 175 МПа (3).

На основі експериментальних даних, отриманих на зразках з гібридної штанги, побудували залежність показника вичерпування їх ресурсу N / N_f від прикладених напружень σ в момент фіксації на їх бічній поверхні поздовжньої тріщини різного розміру. Зокрема, завдовжки 5 мм (крива 1, рис. 4.10) та в момент переходу до стрімкого її росту (крива 2, рис. 4.10), яку визначили за координатою точки початку прямолінійної ділянки завершального етапу росту тріщини. Очевидно, що показник вичерпування ресурсу N / N_f гібридної штанги зростає зі збільшенням рівня напружень σ під час випробувань на втому і на етапі зародження руйнування (крива 1), і на етапі переходу до спонтанного руйнування (крива 2).

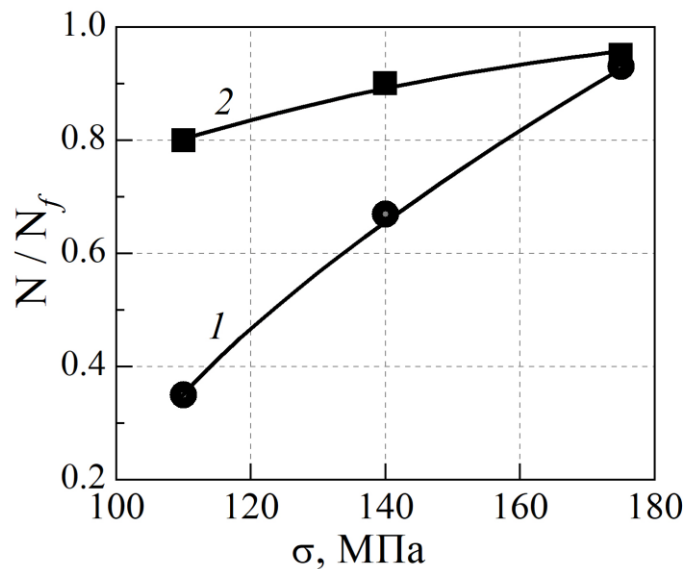


Рисунок 4.10 – Залежність показника вичерпування ресурсу N/N_f гібридних насосних штанг від рівня напружень σ на етапі зародження тріщини довжиною 5 мм в околі зеднання тіла штанги зі сталеву головою (1) і критичного значення її довжини, яка передує її спонтанному поширенню (2).

Проте відзначили, що якщо на етапі зародження руйнування показник N/N_f досить сильно залежить від напружень, прикладених до штанги, то на завершальному етапі руйнування (безпосередньо перед спонтанним руйнуванням) вплив напружень нівелюється. Звідси прийшли до висновку, що контролювати процес зародження пошкоджень під час експлуатації гібридних штанг особливо важливо за використання високих рівнів їх навантажень. Саме це відповідає умовам глибинного свердління з відхиленням від нормальної орієнтації свердловини.

4.2.3. Розрахунок залишкового ресурсу насосних штанг за наявності в них втомних тріщин

Впродовж експлуатації в свердловинах в НШ зароджуються втомні тріщини. У цьому випадку дуже важливо оцінювати залишковий ресурс штанги з такими дефектами.

Залишковий ресурс $t_{зал}$ насосних штанг з втомними пошкодженнями, які зафіксовані методом неруйнівного контролю, прогнозували наступним чином. Використали вираз:

$$t_{зал} = t \cdot \left(\sqrt{\frac{V}{V_x} \cdot \frac{l_{кр} - l_0}{l - l_0} + 1} - 1 \right) \quad (4.11)$$

де t – тривалість випробувань на момент оцінювання залишкового ресурсу; $l_{кр}$ – критична довжина тріщини, за якої швидкість (V) її росту стрімко зростає ($l_{кр} = 65$ швидкість повільного (докритичного) росту тріщини від початкової довжини $l_0 < 2$ мм; l – глибина тріщини через час t після її зародження. V_x – швидкість можливого розвитку дефекту на період, що прогнозується. Експериментально встановили, що максимальне зростання швидкості росту тріщини впродовж періоду її докритичного поширення досягалося тоді, коли співвідношення V_x / V досягало значення 1,5.

Для прикладу із застосуванням запропонованого виразу оцінили залишковий ресурс гібридної штанги діаметром 19 мм, в якій тріщина поширювалася до довжини $l = 3$ мм впродовж $t = 12$ місяців

$$t_{зал} = 12 \cdot \left(\sqrt{0,60 \cdot \frac{65-2}{3-2} + 1} - 1 \right) = 12 \cdot 6,14 = 73,7 \text{ місяці} \quad (4.12)$$

Таким чином, після 12 місяців експлуатації в свердловині насосної штанги діаметром 19 мм з початковим технологічним дефектом глибиною $l_0 = 2$ мм довжина дефекту в штанзі зросла до 3 мм. Тоді, згідно із розрахунками залишковий ресурс штанги на момент досягнення дефектом критичного розміру 65 мм становитиме 73,7 місяці (тобто 6 років).

Через такий проміжок часу штангу слід було б відбракувати. Отримані результати є важливими з точки зору раціоналізації і спрощення процесу відбраковування спрацьованих насосних штанг на нафтових промислах. Критичною для втомних дефектів в гібридних насосних штангах треба вважати довжину, показану на рисунку 4.9. Запропонована формула дає змогу визначати залишковий ресурс гібридних штанг з втомними тріщинами певного розміру.

4.2.4. Визначення ймовірності неруйнування сталевих та гібридних штанг з кривих росту в них тріщин втоми

Визначили параметри розсіювання довговічності насосних штанг, які покладено в основу методики розрахунку повного і залишкового ресурсів насосних штанг. Аналіз кривої росту тріщини корозійної втоми за напружень 100 МПа в сталевій штанзі, випробуваній в середовищі 3%-ного розчину NaCl, насиченому сірководнем, показав, що інкубаційний період зародження тріщини відповідає ймовірності не руйнування 0,78, тоді як в гібридній штанзі за напружень 140 МПа цей показник зародження руйнування відповідає ймовірності не руйнування 0,62. Період докритичного росту тріщини завершується за ймовірності неруйнування $P = 0,47$ для сталеві штанги і 0,43 для гібридної (рис. 4.11 а, б). Тоді як період критичного росту тріщини завершується за практично однаковою ймовірності не руйнування обох штанг близької до 0,37.

Відомі результати і отримані під час проведення втомних досліджень НШ різного типу засвідчили гарну перспективу використання насосних штанг з полімерних матеріалів для експлуатації в нафтодобувних свердловинах [74 – 76, 78, 79].

Разом з тим практика їх дослідно-промислової перевірки вказує на те, що найслабшим місцем таких штанг залишається зона з'єднання композитних штанг зі сталевими головками. Тому розроблення надійної конструкції такого з'єднання композитних штанг є практично важливим завданням, особливо за глибинного викачування зі значним відхилення траєкторії свердловини від вертикалі. Для досягнення цієї мети поставлено задачу удосконалити конструктивне рішення з'єднання елементів гібридної штанги, застосувавши метод скінченних елементів для визначення напружень в них. Також знизити ймовірність поширення утомних тріщин шляхом зменшення концентрації напружень в тілі композитного стрижня в торці сталеві головки. Важливим завданням є розробити конструктивне рішення такого з'єднання та

обґрунтування його роботоздатності за високих рівнів напружень розтягу та згину, оскільки саме такі умови експлуатації насосних штанг в процесі буріння.

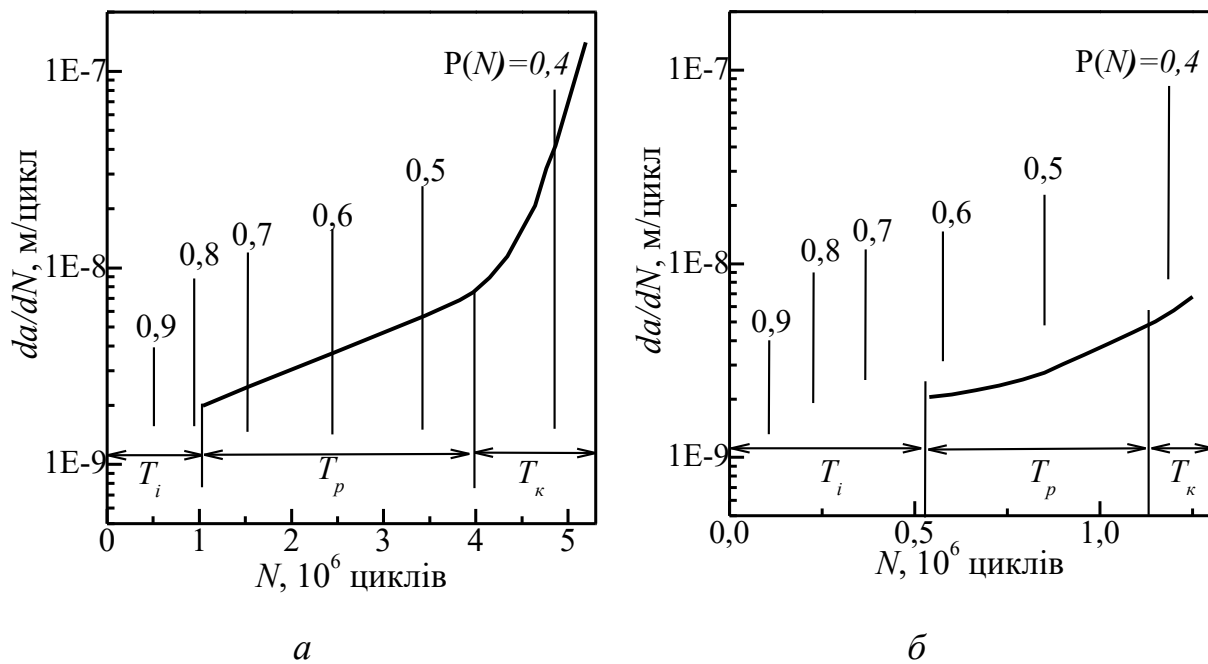


Рисунок 4.11 – Залежність швидкості росту тріщини da/dN корозійної втоми від кількості циклів навантаження N насосної штанги діаметром 22 мм зі сталі 20H2M (а) та гібридної штанги діаметром 19 мм (б), на яких цифрами вказані ймовірності їх неруйнування $P(N)$ та виділено інкубаційний період зародження тріщин T_i , докритичний T_p та критичний T_c періоди їх поширення.

4.3. Розроблення конструкції з'єднання тіла гібридної насосної штанги зі сталеву головою

4.3.1. Розроблення твердотільної моделі з'єднання

Використання гібридних штанг, що представляють собою полімерно-композиційний стрижень з вуглепластиковим осердям та склопластиковою оболонкою, мають великі техніко-економічні переваги порівняно зі звичайними сталевими та склопластиковими штангами. Гібридні штанги мають відносно високу міцність за порівняно низької густини, корозійної стійкості та інших

важливих фізико-механічних властивостей матеріалу [80]. Однак попри всі позитивні експлуатаційні якості гібридних насосних штанг залишається невирішеною проблема надійного з'єднання полімерно-композиційного стержня зі сталевими головками.

Розроблене з'єднання металевої головки із вуглепластиковою штангою показано на рисунку 4.12 [81]. Будова та принцип дії розробленого з'єднання полягає у наступному. Кінець 3 штанги 1, який попередньо розділяли на шість секторів (переріз *A-A*, рис. 4.12), вставляли у внутрішню порожнину з конічним профілем, передбаченим у муфті 2. На протилежному кінці муфти 2 наносили внутрішню різьбу, завдяки якій насосна штанга з'єднувалася з металевою головкою. Один кінець металевої головки був у стандартному виконанні (згідно ГОСТ 13877-96), а інший – був конусним 12.

Під час скручування головки через різьбу 4 з муфтою 2 конус 12 розпирив кінець штанги 3, розділений на шість секторів, та притискав його до внутрішньої конічної поверхні муфти 2. Внаслідок цього відбувалося з'єднання металевої головки насосної штанги із вуглепластиковим тілом штанги. Під час збирання такого з'єднання використовували епоксидну смола. Перед розташуванням тіла штанги 1 в конічному отворі муфти 2 певний об'єм смоли розміщували у муфті. Також клеєм заповнювали внутрішню порожнину 10 та отвір в тілі штанги 1, утворюючи монолітний конус, з реалізацією так званого "ефекту самозаклинювання". Діаметр поперечних перерізів монолітного конуса перевищував діаметри отвору в муфті 2, в який встановляли тіло штанги 1, тому витягнути утворений монолітний конус з середини муфти 2 було практично неможливо. Відзначили, що вкручування конуса 12 в кінець штанги 3 (завдяки вкручуванню сталевий головки в муфту 2 по різьбі 4) створювало попередній натяг у цьому з'єднанні, що позитивно впливало на його міцність за дії циклічних навантажень. Для зменшення концентрації напружень, що виникатиме під дією навантажень згину на тіло штанги 1, у муфті 2 застосували скруглення крайки отвору 11.

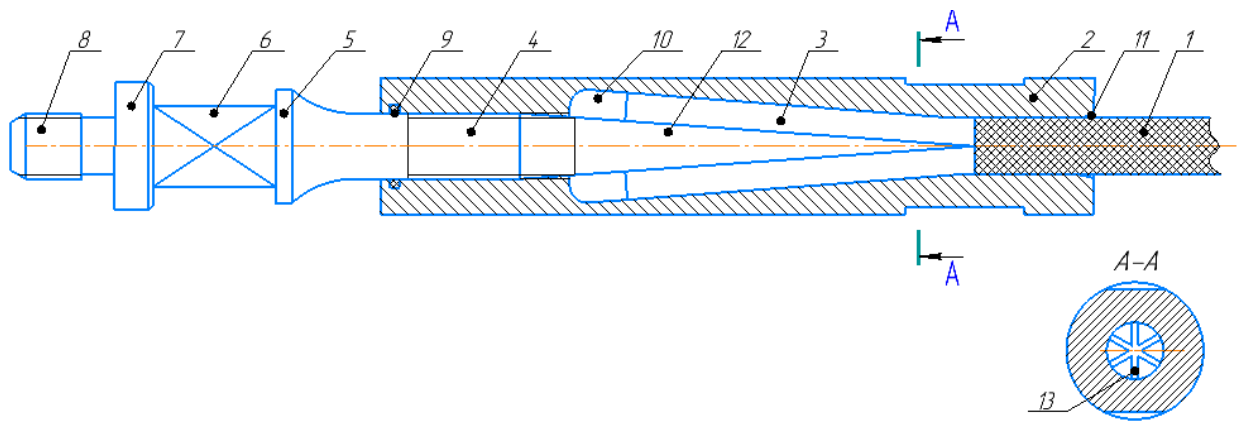


Рисунок 4.12 – Розроблене з’єднання гібридної насосної штанги. 1 – тіло штанги, 2 – муфта з конічною внутрішньою поверхнею, 3 – кінець штанги для закріплення в муфті, 4 – різьба, 5 – бурт підделеваторний, 6 – шийка квадратна, 7 – бурт упорний, 8 – різьба; 9 – ущільнення; 10, 13 – порожнина; 11 – скруглення; 12 – конус.

Іншою особливістю конструкції розробленого з’єднання була наявність ущільнення 9, що запобігало контактуванню пластової рідини з поверхнею різьби. Це дало змогу запобігти появі корозії у різьбовому з’єднанні, і як наслідок, не допустити зменшення її границі втоми (особливо за знакозмінних навантажень, властивих для насосних штанг). Звісно, можливі й інші варіанти захисту різьбового з’єднання від впливу корозійного середовища, зокрема шляхом виконання додаткового опорного бурта, або використання захисних покриттів тощо.

4.3.2. Дослідження напружено-деформованого стану з’єднання металевої головки із вуглепластиковою штангою

З метою визначення напружено-деформованого стану розробленого з’єднання побудували його тривимірну модель (рис. 4.13). Для реалізації цього використали програму SolidWorks. На рисунку 4.13а для зручності огляду внутрішніх елементів розробленого з’єднання муфту 2 зобразили прозорою.

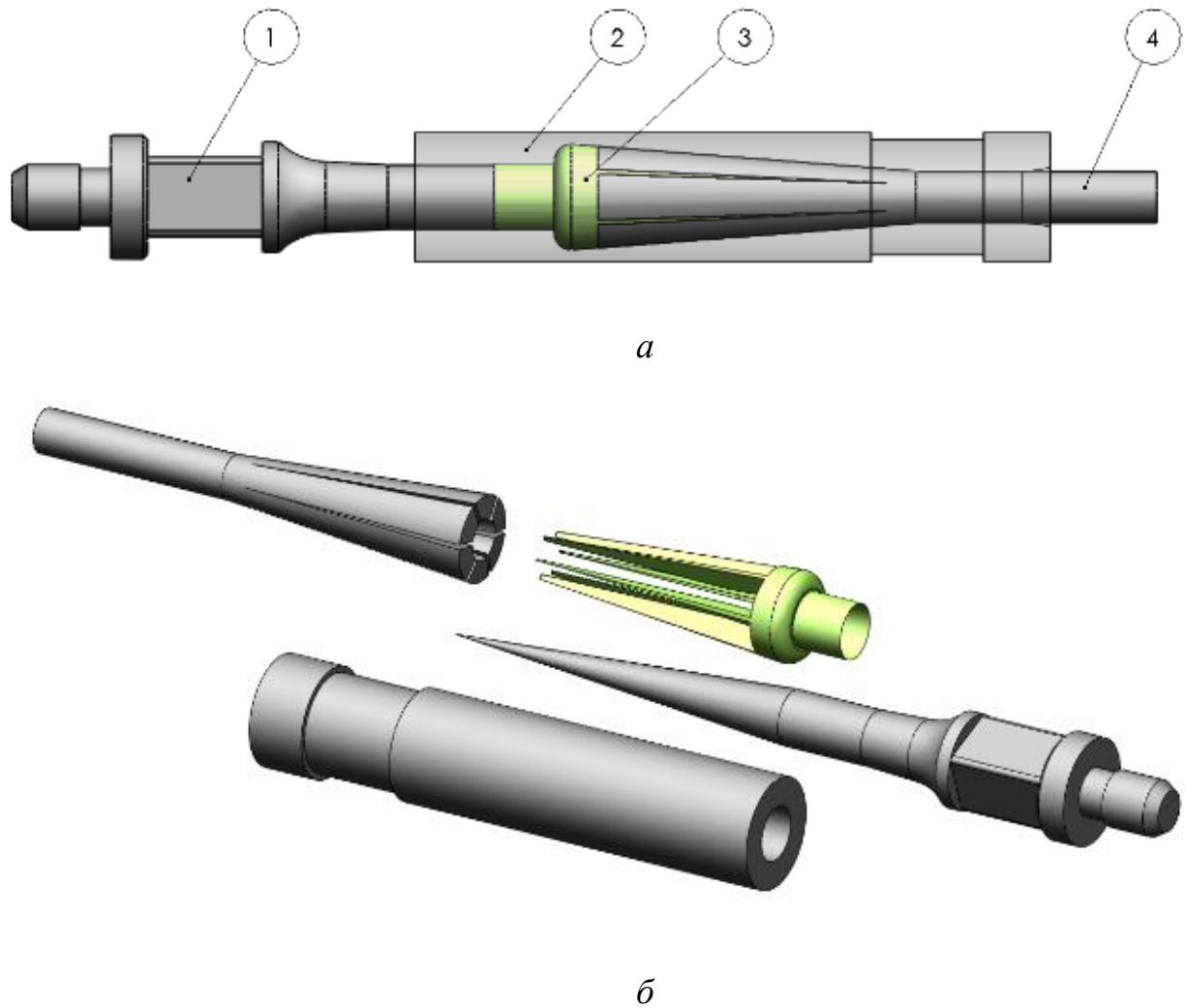


Рисунок 4.13 – Тривимірна модель розробленого з'єднання у зібраному (*a*) та у рознесеному (*б*) вигляді: 1 – металева головка; 2 – муфта; 3 – клей; 4 – тіло штанги.

Для проведення імітаційного моделювання використали програму Ansys. ANSYS Workbench Structural. Це потужне програмне забезпечення, розроблене компанією ANSYS Inc спеально для аналізу конструкцій на міцність за різних схем навантаження. Це середовище дає змогу залучати різні інструменти і модулі для моделювання, аналізу та оптимізації механічних конструкцій. ANSYS Workbench Structural широко використовується в інженерії для оцінки міцності, жорсткості, стійкості та інших характеристик матеріалів і конструкцій під дією різноманітних навантажень. Метод скінчених елементів (Finite Element Method, FEM) як основа ANSYS Workbench Structural дає можливість розділити складну

геометрію конструкції на простіші частини – скінчені елементи. Тоді рівняння, що описують фізичні явища (напруження, деформації, теплопередачу тощо), розв'язують для кожного з елементів окремо, а потім ці розв'язки об'єднують для отримання глобального розв'язку всієї складної системи. Це дає змогу точно моделювати поведінку складних конструкцій під дією різних навантажень.

Перед проведенням імітаційного моделювання слід було визначити небезпечні перерізи розробленого з'єднання. Ці небезпечні перерізи позначили на рисунку 4.14 як А-А, Б-Б та В-В.

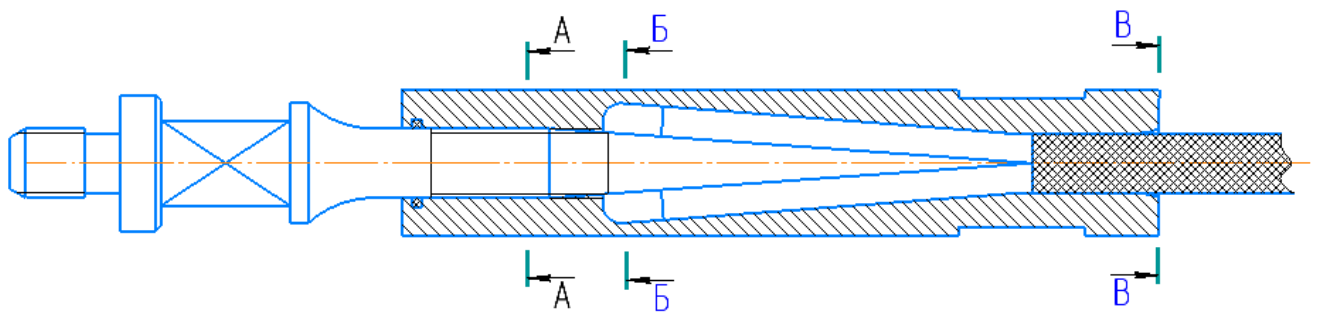


Рисунок 4.14 – Небезпечні перерізи розробленого з'єднання

Оскільки діаметр різьбового з'єднання між головкою та муфтою аналогічний стандартному різьбовому з'єднанню на насосних штангах, то не було підстав робити розрахунки для перерізу А-А.

Що стосується перерізу Б-Б, то під час аналізу напружено-деформованого стану у цьому перерізі найбільше потребуватиме уваги. Адже площа поперечного перерізу стінки муфти у цьому перерізі буде однією з найменших, то на неї будуть діяти і осьові, і радіально орієнтовані навантаження.

Проте аналіз напружено-деформованого стану у перерізі В-В потребує найбільшої уваги. Адже поперечний переріз стінки муфти у цьому місці є найменшим, і відповідно буде істотний вплив і осьового, і радіального навантаження. На концентрацію напружень у цьому перерізі значно впливатиме довжина та радіус скруглення l_1 .

За дії осьового навантаження у перерізі В-В максимальні напруження виникатимуть на виході тіла штанги з муфти. За дії навантажень згину цей

переріз може стати найнебезпечнішим. На концентрацію напружень у ньому значно впливатиме довжина та радіус скруглення крайки на виході отвору з муфти 11 (рис. 4.12).

Для спрощення процесу розрахунку з'єднання такі елементи як різьба та ущільнення не брались до уваги. В процесі збирання даного з'єднання застосовували епоксидний клей, тому в імітаційному моделюванні контакт усіх деталей розглядали як склеєних між собою елементів (інструмент програми "Bonded"). Дослідження розробленого з'єднання без використання клею, а саме з врахуванням коефіцієнтів тертя між його деталями, вважали недоцільним, оскільки під час експлуатації такого з'єднання у свердловині, внаслідок впливу знакозмінних навантажень, може відбутися пошкодження елементів колони, і на ліквідацію наслідків витратимуться час та кошти.

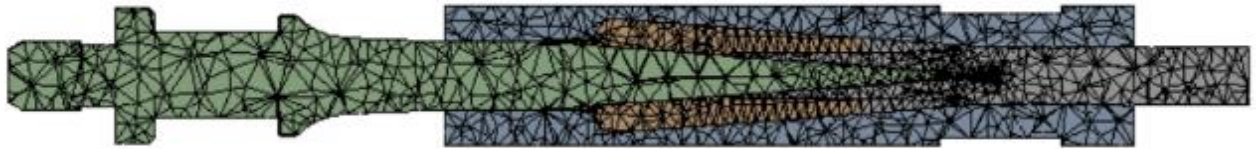
Прийняли, що у розроблюваному з'єднанні для виготовлення деталей використано сталь, вуглепластик та епоксидний клей. Їх властивості наведено у таблиці 4.1. В розрахунках методом скінчених елементів використали сітку, показану на рис. 4.15. В розрахунковій схемі з'єднання виділили частини. Перша з них, відповідала умові прикладання до з'єднання в осьовому напрямку навантаження розтягу величиною 130 кН, а друга – згину під дією навантаження 800 Н. Оцінювали також сумісний вплив навантажень розтягу та згину.

Таблиця 4.1 – Характеристики матеріалів деталей розробленого з'єднання

Характеристики матеріалу	Легована сталь	Вуглепластик	Епоксидний клей
Модуль пружності, Н/мм ²	210000	160000	3780
Коефіцієнт Пуасона	0,28	0,26	0,35
Модуль зсуву, Н/мм ²	79000	318,9	1400
Густина, кг/м ³	7700	1350	1160
Границя міцності за розтягу, Н/мм ²	738,8256	2620	58
Границя плинності, Н/мм ²	620,422	2000	–



а



б

Рисунок 4.15 – Сітка скінчених елементів ззовні розробленого з'єднання (а) та в його поздовжньому розрізі (б).

На рисунку 4.16 показано розрахункову схему за дії на з'єднання навантажень розтягу.



Рисунок 4.16 – Розрахункова схема з'єднання при дії на нього навантаження розтягу

Згідно результатів моделювання, які показані на рисунку 4.17, максимальні напруження зконцентровані у перерізі В-В (рис. 4.12), а саме у тілі штанги. За величиною ці напруження досягають 747 МПа. Враховуючи, що границя міцності вуглепластику за розтягу становить 2620 МПа, зрозуміло, що таку штангу можна безпечно експлуатувати.

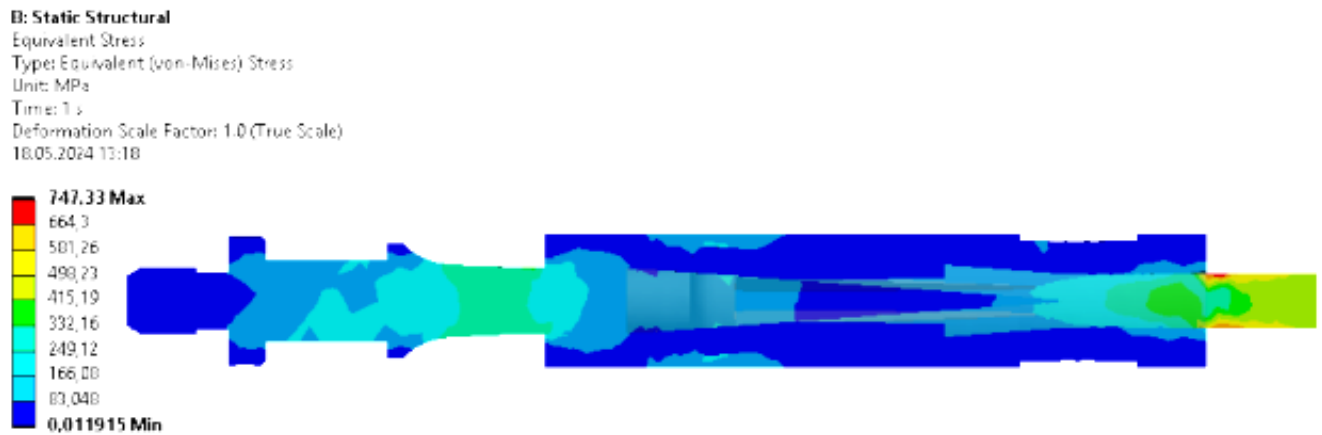


Рисунок 4.17 – Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі розробленого з'єднання за розтягу

Щодо іншого небезпечного перерізу Б-Б (рис. 4.12), то максимальні еквівалентні напруження досягли 188 МПа, що відповідає вимогам щодо допустимих меж (границя міцності становила 738 МПа. Отримані результати моделювання показано на рисунку 4.17, 4.18, 4.19, 4.20.

Отже, за дії осьового навантаження напруження, що можуть виникати в небезпечних перерізах розробленого з'єднання не перевищують визначальні характеристики міцності використаних матеріалів. Тому, таке конструктивне рішення з'єднання придатне для використання у виробничому процесі нафтовидобування.

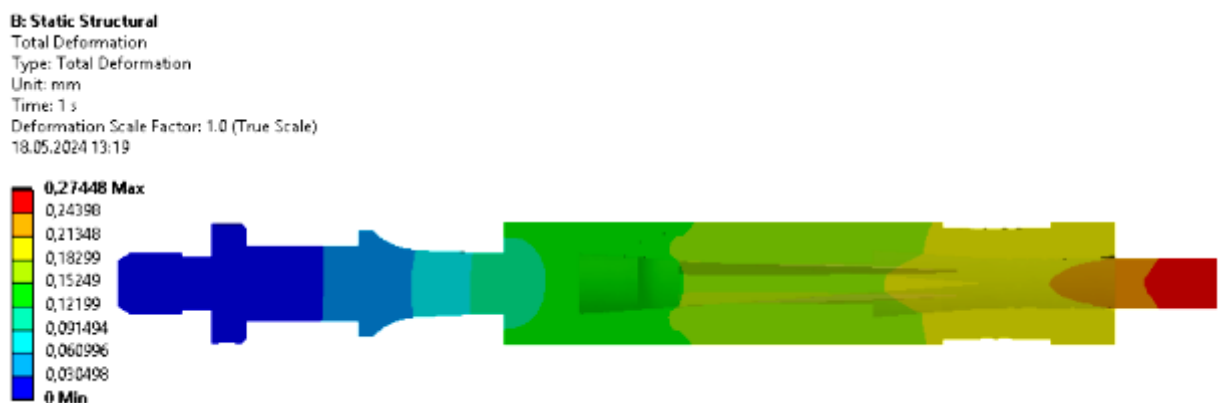


Рисунок 4.18 – Розподіл переміщень на поздовжньому перерізі розробленого з'єднання тіла штанги та сталевій головки за розтягу

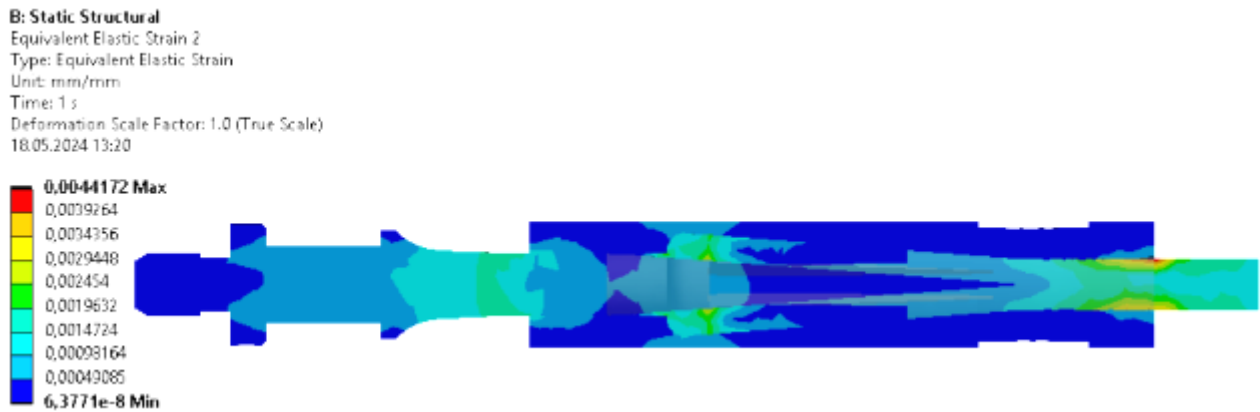


Рисунок 4.19 – Розподіл деформацій в поздовжньому перерізі розробленого з'єднання тіла штанги та сталевій головки за розтягу

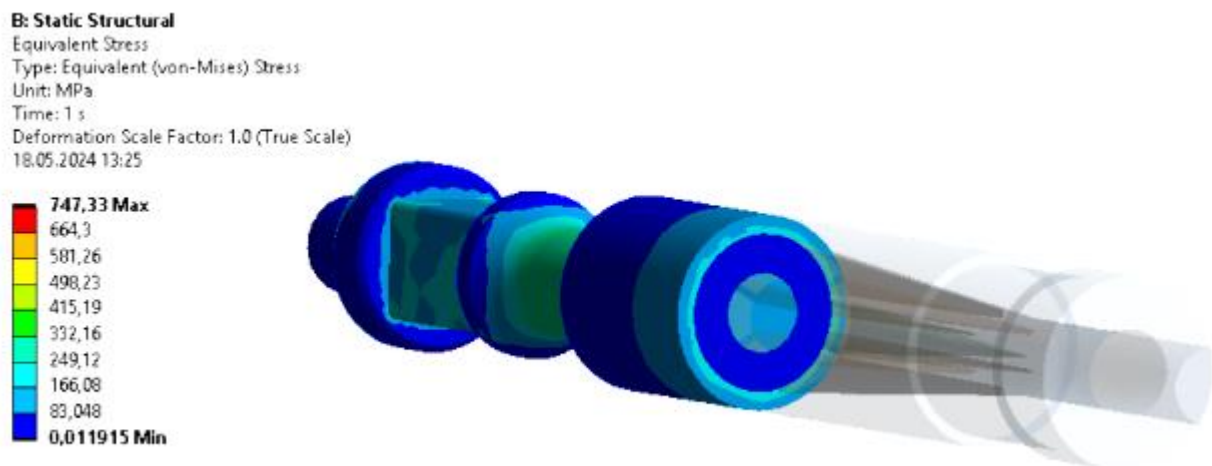


Рисунок 4.20 – Розподіл еквівалентних напружень у небезпечному перерізі Б-Б

Під час експлуатації НШ у свердловині неможливо уникнути впливу напружень згину. Щоб врахувати це, проаналізували напружено-деформований стан у небезпечних перерізах розробленого з'єднання за іншої схеми навантаження (за дії навантаження згину 800 Н). Згідно результатів імітаційного моделювання, максимальні напруження від згину виникають у тілі металевій головки, і досягають 175 МПа (рис. 4.21). Отже, міцність розробленого з'єднання забезпечується також і за дії напружень згину. Тому, його можна експлуатувати також за дії напружень згину.

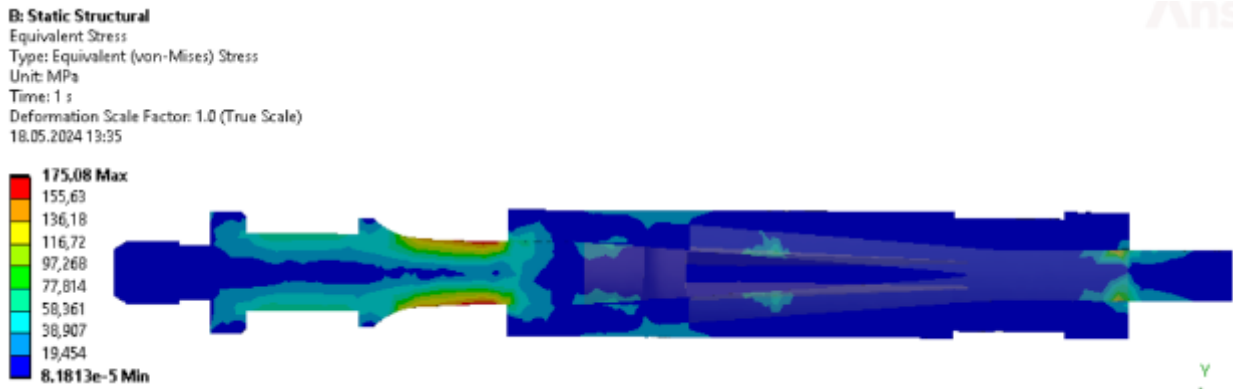


Рисунок 4.21 – Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі з'єднання за впливу на нього напружень згину

За сумісного впливу навантажень розтягу та згину розподіл напружень у поздовжньому перерізі розробленого з'єднання показаний на рисунку 4.22. Згідно результатів імітаційного моделювання, наведених на цьому рисунку, за сумісного впливу навантажень розтягу та згину у розробленій конструкції з'єднання композитного тіла штанги зі сталеву головою, максимальні напруження виникатимуть у тілі вуглепластикової штанги і досягатимуть вони 790 МПа. За величиною вони втричі нижчі від границі міцності вуглепластика і тому не повинні спричинити руйнування, пов'язане із конструкцією з'єднання.

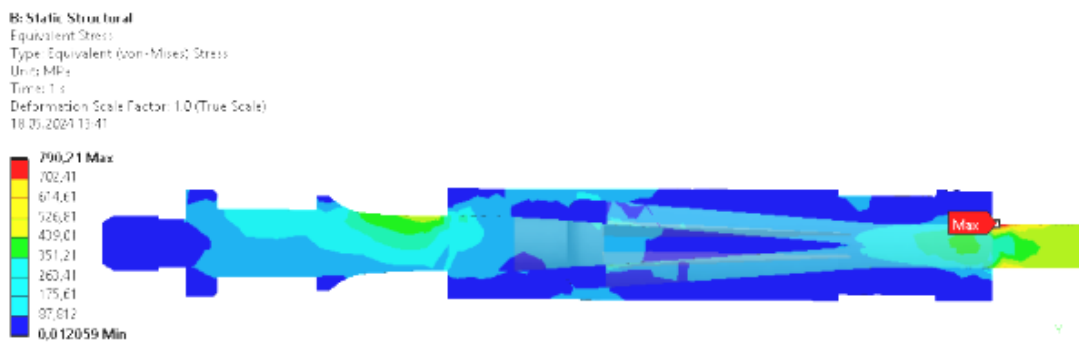


Рисунок 4.22 – Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі розробленого з'єднання за сумісного впливу напружень розтягу та згину.

Таким чином, результати імітаційного моделювання впливу напружень розтягу та згину дали змогу обґрунтувати правомірність використання розробленої конструкції з'єднання вуглепластикових штанг зі сталевими

головками і показати, що і за розтягу, і за згину напруження в небезпечних перерізах втричі нижчі від властивостей матеріалів, що визначають їх роботоздатність.

Висновки до розділу 4

1. За результатами випробувань гібридних насосних штанг на втому в умовах наближених до натурних встановлено, що вони мають значно вищі (в півтора рази) характеристики втоми, ніж склопластикові та визначено, що їх ресурс за напружень близьких до експлуатаційних (110 МПа) перевищує $25 \cdot 10^6$ циклів.

2. На основі результатів утомних випробувань гібридних насосних штанг встановлено закономірності росту втомних тріщин та досліджено вплив величини змінного навантаження на величину інкубаційного періоду до їх зародження. Виявлена залежність інкубаційного періоду до появи в гібридних штангах першої очевидної втомної тріщини за циклічного згину від величини прикладеного напруження. Показано, що тривалість цього періоду за величиною вичерпаного ресурсу зростає від 0,2 до 0,85 зі збільшенням напружень від 110 до 175 МПа. Аналіз показав, що в сталевих штангах частка ресурсу до появи тріщини менша та може бути в діапазоні 0,18-0,4 зі зростанням навантаження від 100 до 150 МПа.

3. Вперше встановлені залежності швидкості росту тріщин від напружень згину під час утомних випробувань гібридних насосних штанг та показано, що зі зростанням рівня навантаження штанги швидкість поширення тріщин в ній буде зменшуватися.

4. Вперше встановлено, що через розсіювання втомних характеристик гібридних штанг характер зміни швидкості росту тріщин в них за низьких напружень (110 МПа) був немонотонним в міру зростання показника вичерпування ресурсу штанги. Тоді як за дії високих напружень (величиною 140

– 175 МПа) спостерігали її монотонне зростання з вичерпуванням ресурсу штанги

5. Встановлено, що за дії напружень величиною 110 МПа довжини повздовжніх тріщин в гібридних насосних штангах досягала величин 65 мм за довговічності $25 \cdot 10^6$ циклів, тоді як за напруженнях 140 та 175 МПа їх довжина на момент руйнування зменшувалася до 23 і 16 мм відповідно;

6. Дістала подальший розвиток порівняльна оцінка характеристик витривалості склопластикових та гібридних насосних штанг за циклічного обертового згину та вперше отримано залежність довжини тріщин в момент руйнування l від величини змінного напруження.

7. Розроблено конструкцію з'єднання вуглепластикової штанги зі сталеву головою, показано її переваги порівняно із конструкціями іншими з'єднань, а саме: простота, дешева технологія виготовлення муфти, можливість використання наявних сталевих головок для стандартних насосних штанг. Імітаційним моделюванням розробленого з'єднання оцінено напружено-деформований стан у його небезпечних перерізах, проаналізовано розподіл напружень і деформацій, і на цій основі зроблено висновок про відповідність запропонованої конструкції з'єднання експлуатаційним вимогам за його міцністю і за розтягу, і за згину, і за їх сумісного впливу.

ВИСНОВКИ

За результатами проведення теоретичних і експериментальних досліджень отримано нове вирішення науково-технічної задачі щодо оцінки ресурсу та підвищення роботоздатності гібридних насосних штанг.

1. Проаналізовано основні причини відмов насосних штанг та показано, що у виробничих умовах насосні штанги руйнуються від втоми і мають ознаки відшарування скловолоконного тіла штанги в місці його з'єднання зі сталевією головкою. Визначено, що кількість відмов, пов'язаних з втомним руйнуванням насосних штанг, досягала 1,6 на кожні із 100 свердловин. У тому числі впродовж року обриви по тілу штанг досягали 0,48, а обриви в муфтових з'єднаннях - 1,12. На основі аналізу виробничих відмов, наявних методик оцінки роботоздатності та ресурсу штанг обґрунтували необхідність проведення досліджень, спрямованих на прогнозування та підвищення ресурсу насосних штанг з нових полімерних композитів, зокрема гібридних штанг.

2. Вивчено закономірності росту втомних тріщин в гібридних насосних штангах та досліджено вплив змінного навантаження на величину інкубаційного періоду до їх зародження. Експериментально встановлена залежність інкубаційного періоду до появи в зразках першої очевидної тріщини в гібридних штангах за циклічного згину від величини прикладених напружень та показано, що цей період зростає з 0,2 до 0,85 зі збільшенням навантаження від 110 до 175 МПа. В сталевих штангах частка вичерпаного ресурсу до появи тріщини менша та може бути в діапазоні 0,18-0,4 зі зростанням навантаження від 100 до 150 МПа. Показано, що близькі до натурних випробування на втому гібридні насосні штанги мають значно вищі (в півтора рази) характеристики втоми, ніж склопластикові. Встановлено, що їх ресурс за близьких до експлуатаційних напружень 110 МПа перевищив $25 \cdot 10^6$ циклів.

3. Встановлено, що в міру віддалення від утомного зламу штанги кількість скловолокон в оболонці гібридної штанги, відшарованих від полімерної зв'язки, зменшується, а в околі поверхні зламу їх кількість досягає

максимальної величини. На цій основі запропоновано кількісний фрактографічний показник критичної пошкодженості K_c скловолоконної оболонки гібридних штанг, який характеризує критичну кількість волокон, відшарованих від полімерної зв'язки і досягається в околі зламу штанги в момент її руйнування спричиненого дією циклічних навантажень. Використання запропонованого показника пошкодженості скловолоконної оболонки гібридних штанг відкриває перспективу контролю за їх станом на основі аналізу кількості відшарованих від матриці волокон.

4. Вперше розроблено методику оцінювання властивостей складових гібридної штанги (скловолоконної оболонки та вуглепластикового осердя) за дії динамічних навантажень. Показано, що ударна в'язкість скло волоконної оболонки штанги майже в півтора рази нижча за властиву вуглепластиковому осердю. Отже за дії ударних навантажень головну роль в запобіганні руйнуванню відіграватиме вуглепластикове осердя штанги. Проведені фрактографічні дослідження зламів зразків з композитних штанг показали, що вдосконалення технології їх виготовлення з точки зору ущільнення волокон оболонки, збільшення адгезії оболонки і осердя та оптимізації частки перерізу осердя за нахилом вуглецевих волокон до осі штанги є важливим для підвищення опору їх руйнування за динамічних навантажень згином, необхідного для безпечної експлуатації штанг на значних глибинах із значним відхиленням свердловин від нормальної орієнтації.

5. Вперше визначено залежності швидкості росту тріщин від величини напруження згину за втомних випробувань гібридних насосних штанг та встановлено, що зі зростанням напружень, прикладених до штанги, швидкість поширення тріщин зменшувалася. Вперше встановлено, що через розсіювання втомних характеристик швидкість росту тріщин за низьких напружень (110 МПа) має немонотонний характер зміни, тоді як за дії високих напружень (величиною 140 – 175 МПа) зберігається її монотонне зростання. Встановлено, що довжини повздовжніх тріщин в гібридних насосних штангах за дії напружень 110 МПа досягають величин 65 мм при довговічності $25 \cdot 10^6$ циклів, тоді як за

напружень 140 та 175 МПа їх довжина на момент руйнування зменшувалася до 23 і 16 мм відповідно. Також дістала подальший розвиток порівняльна оцінка характеристик витривалості склопластикових та гібридних насосних штанг за циклічного обертового згину та отримано залежність довжини тріщин на момент руйнування L_{\max} від величини змінного напруження.

6. На основі аналітичних та експериментальних досліджень вдосконалено конструкцію з'єднань тіла гібридних насосних штанг зі сталеву головою з метою підвищення їх роботоздатності. В з'єднанні гібридного тіла штанги зі сталеву головою еквівалентні напруження знаходяться в допустимих межах. Скінченно-елементним аналізом з'єднання та випробуваннями на втому показано роботоздатність розробленої конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Martin Richard L. "Minimizing wear-accelerated corrosion in sucker rod pumped oilwells with corrosion inhibitors." Paper presented at the CORROSION 2012, Salt Lake City, Utah, March 2012.
2. Teodoriu, Catalin, and Erik Pienknagura. "Bringing the sucker rod pumping unit into the classroom with the use of the internet of things." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, September 2018. DOI: 10. 2118/ 191552- MS.
3. Takacs, Gabor. "Profitability of sucker-rod pump operations is improved through proper installation design." Paper presented at the Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 1997. DOI: 10. 2118/ 38994- MS.
4. Takacs Gabor and Mihaly Gajda. "The ultimate sucker-rod string design procedure." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, October 2014. DOI:10. 2118/ 170588- MS.
5. Takacs G, Mihály G. An enhanced model for the design of tapered sucker-rod strings. SPE Prod Oper 32, 2017. P.1–6. DOI: 10. 2118/ 170588- PA.
6. Білецький В. С. Суспільне надбання: [сайт]. URL: <https://uk.wikipedia.org/w/index.php?curid=3066582>
7. Савчук В. В. Видобування нафти з високим вмістом піску, смол і парафіну із застосуванням спеціальних конструкцій насосів. Нафтогазова інженерія. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2016. № 1(40). С. 20–28.
8. Бойко В. С., Кондрат Р. М., Яремійчук Р. С. Довідник з нафтогазової справи / за заг. ред. докт. техн. наук. Львів, 1996. 620 с.
9. Крижанівський Є.І., Міронов Ю. В., Романишин Л. І. Мобільні установки для буріння, ремонту і обслуговування свердловин: монографія. Івано-Франківськ: Факел, 2003. 209 с.
10. Міжгалузева комплексна науково-технічна програма організації виготовлення бурового, нафтогазопромислового, нафтопереробного

устаткування і техніки для будівництва нафтогазопроводів до 2010 року. Київ: Держкомнафтогаз України, 1993.

11. Копей Б. В., Копей В. Б. Копей І. Б. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. Монографія. Івано–Франківськ, ІФНТУНГ, 2009, 406с.

12. Управління ґрунтовими режимами. Петренко Л.Р., Вітвіцький С.В., Булигін С.Ю., Богданович Р.П. Підручник. Національний університет біоресурсів і природокористування України. К. 2017. 368 с.

13. Пушкар Петро Васильович Оцінка довговічності насосних штанг з урахуванням експлуатаційних факторів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.12 "Машини нафтової та газової промисловості" Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2007. 20 с.

14. Бандура В. В., Заміховський Л. М. Умови виникнення і розвитку дефектів глибинно-насосної штангової установки (ГНШУ) / ІФДТУНГ. Івано-Франківськ, 1996. 14с. Укр. Деп. в УкрІНТЕІ 04.10.96 р. №10 Ук96.

15. Бандура В. В. Дослідження впливу дефектів ШГНУ на її експлуатаційну надійність. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтове обладнання. Івано-Франківськ. 36, 4. 1999. С.198–209.

16. Jiahao Zheng, Hongyuan Qiu, Stephen Butt, James Yang. Fatigue Life Prediction of Drill-String Subjected to Random Loadings. Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2014 November 14–20, 2014, Montreal, Quebec, Canada, 11p.

17. Belkacema L., Abdelbakib N., Gaceba M., Boualia E., Bettayeb M. Drill String Fatigue Failure and Lockup Risks Assessment in Tortuous Trajectory Well in Algeria. Chemical Engineering Transactions. 2017. Vol. 61. P.1099–1104.

18. Sikal A., Boulet J., Menand S., Sellami H. Drill Pipe Stress and Cumulative Fatigue Analysis in Complex Wells Drilling: New Approach in Fatigue Optimization. SPE (Society of Petroleum Engineers) Annual Technical and exhibition held in Denver, Colorado, USA, 21-24 September 2008. 17p.

19. Argirov J., Yankova R., Antonov G. Study Fatigue in Materials of Drill Pipes. TEM Journal. 2016. Vol. 5. No. 1. P. 50–55. DOI: 10.18421/TEM51-08.

20. Gudimella V.S. Murthy. Oil Field Drill Pipes Failure. In book: Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry. pp.123-152. [Chapter 6]. India:, Elsevier 2016. edited by: Abdel Salam Hamdy Makhoulf, Mahmood Aliofkhaezrai.

21. Ngoc Ha Daoa, Hedi Sellamia. Stress intensity factors and fatigue growth of a surface crack in a drill pipe during rotary drilling operation. Engineering Fracture Mechanics, Elsevier. Vol. 96. 2012. P. 626–640.

22. Development and efficiency testing of sucker rod pump downhole descenders. Langbauer C, Hartl M, Gall S, Volker L, Decker C, Koller L, Hönig S. SPE Prod Oper 35, 2020. 406–421. DOI: 10.2118/200478-PA.

23. Sucker rod antibuckling system: development and field application. Langbauer Clemens, Fruhwirth Rudolf Konrad, Volker Lukas. SPE Prod Oper 36, 2021. P. 327–342. DOI: 10.2118/205352-PA.

24. Копей Б.В., Кіндрачук С.М. Використання полімерних насосних штанг для уникнення згинаючих напружень в сталевій колоні штанг. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтогазопромислове обладнання. №35 (том 4). 1998. С.27–31.

25. Harley A. Tripp. Mechanical performance of fiberglass sucker-rod strings. SPE, Production Engineering, August, 1988. P.346–350.

26. Насосні штанги : [сайт]. URL:<http://um.co.ua/8/8-11/8-11141.html>

27. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. S. Fakhe, A. Khlaifat, M. E. Hossain, H. Nameer. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 11(10). 2021. DOI: 10.1007/s13202-021-01270-7.

28. Hua C., Chen S., Xu G., Chen Y. Defect Detection Method of Carbon Fiber Sucker Rod Based on Multi-Sensor Information Fusion and DBN Model. Sensors 2022, 22, 5189. DOI: 10.3390/s22145189.

29. ГОСТ 31825-2012. Штанги насосные, штоки устьевые и муфты к ним. Технические условия.
30. API Spec 11B: Specification for Sucker Rods, Polished Rods and Liners, Couplings, Sinker Bars, Polished Rod Clamps, Stuffing Boxes, and Pumping Tees.
31. ГОСТ Р 51161-98 Штанги насосные стеклопластиковые. Технические условия.
32. ТУ У 29.5-13741713-002:2006. Штанги насосні металопластикові. Технічні умови. Введ. 19.04.2007. Без обмеж. терм. дії. Івано-Франківськ, 2006.
33. Carbon fiber continuous sucker rod pump, innovation of rod pump manufacturer: [сайт]. URL: <https://www.saigaogroup.com/product/sucker-rod-pump.html>
34. Application status and research direction of carbon fiber continuous sucker rod. Peng Y., Gu X., Chang D. China Pet. Mach. 33, 2005. 76–78.
35. Sharma, M.; Gao, S.; Mäder, E.; Sharma, H.; Wei, L.Y.; Bijwe, J. Carbon fiber surfaces and composite interphases. Compos. Sci. Technol. 2014, 102, 35–50.
36. Копей І. Б. Оцінка, прогнозування та підвищення надійності обладнання штангових свердловинних насосних установок. Рукопис. Дис. канд. техн. наук: 05.05.12, м. Івано-Франківськ, 2020.
37. Насосні штанги і труби з полімерних композитів: проектування, розрахунок, випробування. Копей Б. В., Максимук О. В., Щербина Н. М., та ін. Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2003 р. 352 с.
38. Долгов О. М. Композиційні матеріали (демонстр. матеріали до лекцій). – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2022.
39. Сіренко Г.О., Солтис Л.М., Складанюк М.Б. Властивості вуглецевих волокон (огляд). Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. Випуск ХІХ, 2015. С. 63–72.
40. Копей Б. В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А. Б. Перспективи застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. – №4(65) 2017, с.40–46.

41. Копей Б. В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А. Б. Анализ эффективности склопластиковых, углепластиковых та гибридных насосных штанг. нефтегазовая энергетика. № 2(28), 2017, с.31–41.

42. Saponja J., Coyes C., Conner M. Fiber reinforced thermoplastic (FRTP) sucker rods providing high strength light weight low cost and environmentally responsible artificial lift efficiencies Conference: International Petroleum Technology Conference, 2024. DOI:10.2523/IPTC-23949-MS

43. Reynolds M.M., Fiberglass Sucker Rod Design Considerations. Petroleum society of CIM. June, 1987.

44. Allen L.F., Svinos I.G. Rod Pumping Optimization Programm Reduces Equipment Failures and Operating Costs, SPE 13247.September, 1984.

45. Юй Шуанжуй. Підвищення працездатності насосних штанг з полімерних композитних матеріалів. Дисертація. Спеціальність 05.05.12 – Машини нафтової та газової промисловості, Івано-Франківськ, 2018. 187с.

46. Katunin A. Dragan K. Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. Compos. Struct. 2015. 127, 1–9. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080.

47. Inspection of additive-manufactured layered components. Cerniglia D., Scafidi M., Pantano, A., Rudlin J. Ultrasonics. 62, 2015. 292–298. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.06.001.

48. Asokkumar A., Jasiuniene E., Raišutis R., Kažys R.J. Comparison of Ultrasonic Non-Contact Air-Coupled Techniques for Characterization of Impact-Type Defects in Pultruded GFRP Composites. Materials 2021. 14. 1058. DOI: 10.3390/ma14051058.

49. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites. Caminero M., García-Moreno I., Rodríguez G., Chacón J. Compos. Part B Eng. 2019, 165, 131–142. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.11.091.

50. Ultrasonic Characterization of Components Manufactured by Direct Laser Metal Deposition. Castellano A., Mazzarisi M., Campanelli S.L., Angelastro A., Fraddosio A., Piccioni M. *Materials*. 2020. 13. 2658. DOI: 10.3390/ma13112658.

51. Zhou J., Li Z., Chen J. Damage identification method based on continuous wavelet transform and mode shapes for composite laminates with cutouts. *Compos. Struct.* 2018, 191, 12–23. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.02.028.

52. Nondestructive testing of additively manufactured material based on ultrasonic scattering measurement. Song Y., Zi X., Fu Y., Li X., Chen C., Zhou K. *Measurement* 2018. 118. P. 105–112. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.01.020.

53. Ultrasonic signal classification and imaging system for composite materials via deep convolutional neural networks. Meng M., Chua Y.J., Wouterson E., Ong C.P.K. *Neurocomputing* 2017. 257. 128–135. DOI: 10.1016/j.neucom.2016.11.066.

54. Inspecting Method for Defective Casting Products with Convolutional Neural Network (CNN). Nguyen T.P., Choi S., Park S.J. *et al.* *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 8, 583–594 (2021). DOI: 10.1007/s40684-020-00197-4.

55. Khumaidi A., Yuniarno E.M., Purnomo M.H. Welding defect classification based on convolution neural network (CNN) and Gaussian kernel. In *Proceedings of the Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2017 International Seminar on Intelligent, Surabaya, Indonesia, 28–29 August 2017*. P. 261–265. DOI: 10.1109/ISITIA.2017.8124091.

56. Tsangouri E., Aggelis D.G. A review of acoustic emission as indicator of reinforcement effectiveness in concrete and cementitious composites. *Constr. Build. Mater.* 2019, 224, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.042>.

57. Evaluation of SHM System Produced by Additive Manufacturing via Acoustic Emission and Other NDT Methods. Strantza M., Aggelis D.G., De Baere D., Guillaume P., Van Hemelrijck D. *Sensors* 2015. 15. P. 26709–26725. DOI: 10.3390/s151026709.

58. Honarvar F., Varvani-Farahani A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics* 2020, 108, 106227. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106227.

59. Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. *Compos. Struct.* 2015, 127, 1–9. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080.
60. Hicks A.W. Using Fiberglass Sucker Rods in Deep Wells, SPE 14974. April 1986.
61. Hicks A.W. Care and Handling of Fiberglass Sucker Rods. Інструкція фірми Fiberflex Products Ltd.
62. Tension–tension fatigue of hybrid composite rods. N.K. Kar, Y. Hu, E. Barjasteh, S.R. Nutt *Composites Part B: Engineering.* 43, 5. 2012. P. 2115–2124 DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.006.
63. Bending fatigue of hybrid composite rods. N.K. Kar, E. Barjasteh, Y. Hu, Nutt SR. *Composites Part: A*, 42, 3. 2011. pp. 328–336.
64. Kim H. C., Ebert L. J. Fatigue life-limiting parameters in fiberglass composites, *J Mater Sci*, 14 (1979), pp. 2616–2624.
65. R. Alebrahim, M. Iqram, M. Farizal, et al. Control of Crack Propagation in Composite Fiberglass-Polyester Laminates Using Nitinol Wire. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 663 (2014), pp. 108–112.
66. Втомне руйнування склопластикових насосних штанг при згині. Б. Копей, В. Копей // Шостий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей, (Львів, 21-23 травня 2003р.). Л.: КІНПАТРИ ЛТД. 2003. С. 26.
67. Пат. 50093 Україна, МПК E21B17/02. З'єднання головки насосної штанги з склопластиковим тілом / Копей В.Б., Стеліга І.І., Копей Б.В., Петрина Ю.Д.; патентовласник ІФНТУНГ. № 2001 075460; заявл. 31.07.2001; опубл. 15.10.2002. Бюл: №10. 2 с.
68. VectorRod™: Carbon Fiber Sucker Rod. Hugh Q. Cook, Jr., Partner and СТО, VectorSum, Inc. 10 p. <http://www.alrdc.com/workshops/papers/>
69. E. Woldesenbet. Enhancement of composite sucker rods for use in the oil industry. Proceedings of ETCE2002 ASME Engineering Technology Conference on

Energy, February 4-5, 2002, Houston, TX, ETCE2002/OT-29152: <https://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org> on 07/02/2019.

70. 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.

71. Sutherland H. J. and Mandell J. F. The effect of mean stress on damage predictions for spectral loading of fiberglass composite coupons. specialty conference on making torque from the wind. EWEC. 2004. P. 93–108.

72. Mouritz A. P. Design dilemma for z-pinned composite structures. 27th Int. Congress of the Aeronautical Sciences. ICAS, 2010. P. 19–24.

73. Копей Б.В. Науково–технологічні методи прогнозування і підвищення ресурсу свердловинного нафтогазопромислового обладнання. Дис д–ра техн. наук. ІФДТУНГ, Івано–Франківськ. 1996. 478 с.

74. Regularities of Growth of Fatigue Cracks in Hybrid Pumping Rods. B.V. Kopei, H.V. Krechkovska, V.P. Nisonyskiy, B.M. Bakun. Materials Science. 57, 4. 2022. P.549–556.

75. Peculiarities of fatigue crack growth in steel and composite sucker rods. H. Krechkovska, B. Kopey, B. Bakun, I. Kopey. Procedia Structural Integrity. 2022. 42. P. 1406–1413. DOI: 10.1007/s11003-023-00728-9.

76. Specific features of corrosion-fatigue fracture of steel and hybrid pump rods. B. V. Kopei, H. V. Krechkovska, I. B. Kopei, B. M. Bakun. Materials Science. 2023. 58, №6. P. 768–773. DOI: 10.1007/s11003-023-00728-9.

77. Копей Б.В., Бакун Б.М. Ріст тріщин втоми в гібридних штангах. Сучасний рух науки: тези доп. XI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 8-9 жовтня 2020 р. Дніпро, 2020. Т.1.С.330–332.

78. Kryzhaniv's'kyi E. I., Hoisan I. M., 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. P. 92–97. DOI: 10.1007/s11003-014-9695-6

79. Impact Toughness and Fractographic Peculiarities of a Composite Pump Rod Fracture. H.V. Krechkovska, B.M. Bakun., O.Z. Student, I. V. Kopei. *Materials Science*. 2024. 59, 5. P. 616–622. DOI:10.1007/s11003-024-00818-2

80. Копей Б. В., Канівець В. В, Копей І. Б., Бакун Б. М. Скінченно-елементний аналіз з'єднань сталевго наконечника та гібридного стержня насосної штанги. Пріоритетні напрями розвитку науки під час воєнного стану, ХСІІ Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. м. Одеса, 24 червня 2022 р. С.13–21.

81. Бакун Б. М., Кречковська Г. В. Обґрунтування міцності конструкції з'єднання сталевї головки та вуглепластиковї насосної штанги. *Фіз-хім. механіка матеріалів*. 2024. 60, 3. С. 72–77.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Regularities of growth of fatigue cracks in hybrid pumping rods. Kopei B. V., Krechkovska H. V., Nisonyski V. P., Bakun B. M. *Materials Science*. 57, 4. 2022. P. 549–556. DOI 10.1007/s11003-022-00577-y (Scopus, WoS, Q3). *(Особистий внесок здобувача: аналіз досліджень втомної поведінки штанг та дослідження напружень при розтягу та стиску, Нісонський–графічне оформлення, Копей та Кречковська – редагування та вичитування).*

2. Specific features of corrosion-fatigue fracture of steel and hybrid pump rods. Kopei B. V., Krechkovska H. V., Kopei I. B., Bakun B. M. *Materials Science*. 2023. 58, 6. P. 768–773. DOI 10.1007/s11003-023-00728-9 (Scopus, WoS, Q3). *(Особистий внесок здобувача: проведення наукових досліджень та результати досліджень росту втомних тріщин насосних штанг. Копей І.–графічне оформлення, Копей Б. та Кречковська – остаточний рукопис).*

3. Peculiarities of fatigue cracks growth in steel and composite sucker rods. H. Krechkovska, B. Kopey, B. Bakun, I. Kopei. *Procedia Structural Integrity*. 2022. 42. P. 1406–1413. DOI 10.1016/j.prostr.2022.12.179 (Scopus, WoS). *(Особистий внесок здобувача: результати досліджень втомної поведінки штанг залежно від напружень випробувань. Копей І.–графічне оформлення, редагування – Копей Б. та Кречковська).*

4. Feature of fatigue fracture of the composite sucker rod / H. Krechkovska, B. Bakun, I. Kopei. O. Student. *Procedia Structural Integrity*. 2024. 59. P. 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.042>. (Scopus, WoS). *(Особистий внесок здобувача: фрактографічний аналіз зламів та дослідження зародження та поширення тріщин у гібридній штанзі за випробувань на втому, Копей І підготовка зразків, Кречковська та Копей Б – редагування).*

5. Impact Toughness and Fractographic Peculiarities of a Composite Pump Rod Fracture. H.V. Krechkovska, B.M Bakun., O.Z. Student, I. B. Kopei. *Materials*

Science. 2024. 59, 5. P. 616–622. DOI:10.1007/s11003-024-00818-2. (Scopus, WoS). *(Особистий внесок здобувача: визначення ударної в'язкості складових штанги та фрактографічний аналіз зламів після випробувань на удар із встановленням механізмів руйнування, Копей І. та Студент–підготовка зразків, Копей Б. та Кречковська обговорення результатів та вичитування матеріалу статті).*

6. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Бакун Б. М. Дослідження з'єднань вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками при дії навантажень згину. Нафтогазова енергетика. 2021. 2, №36. С. 68–79. (фах. вид. Б). *(Особистий внесок здобувача: дослідження конструкцій насосних штанг та скінченно-елементний аналіз з'єднання вуглепластикового стрижня зі сталевією головкою. Михайлюк – графічні дані, Копей – обговорення результатів).*

7. Скінчено-елементний аналіз з'єднань гібридної насосної штанги. Копей Б. В., Копей І. В., Канівець В. В., Бакун Б. М. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. №4 (85). 2022 – С. 43–52. (фах. вид. Б). *(Особистий внесок здобувача: скінченно-елементний аналіз з'єднання вуглепластикового стрижня зі сталевією головкою, Копей І. та Канівець – графічне оформлення, Копей Б.–обговорення результатів щодо проблем насосних штанг і їх вирішення).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Патент на корисну модель. № u 2022 03340 МПК (2023.01) E21B 17/00, E21B 11/00. Спосіб з'єднання тіла насосної гібридної штанги зі сталевією головкою. Копей Б. В., Бакун Б. М. – u 2022 03340; заявл. 12.09.2022; опубл. 18.10.2023. – 1 с. *(Особистий внесок здобувача: спосіб з'єднання сталевієї головки та вуглепластикового стрижня, Копей Б.–обговорення результатів щодо проблем насосних штанг і їх вирішення).*

9. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Бакун Б. М. Дослідження з'єднань вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками. Abs. of the 2-nd Int. scientific and practical conf. “Priority directions of science and technology development” (October 25–27, 2020) SPC “Sci-conf. com.ua”, Kyiv, Ukraine. 2020. P. 281–285. *(Особистий внесок здобувача: аналіз конструкції з'єднання вуглепластикових*

стрижнів зі сталевими головками та визначення нормальних напружень Михайлюк–графічне оформлення, Копей–обговорення результатів).

10. Копей Б. В., Бакун Б. М. Ріст тріщин втоми в гібридних штангах. Сучасний рух науки: тези доп. XI міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції, 8-9 жовтня 2020 р. Дніпро, 2020. Т. 1. С.330 – 332. *(Особистий внесок здобувача: отримання аналіз результатів досліджень росту втомних тріщин, Копей–обговорення результатів).*

11. Розрахунок числа циклів навантаження насосної штанги з втомною тріщиною до критичного значення. Копей Б. В., Мартинець О. Р., Бакун Б. М. Конференція Sworld “World Scientific and Technical Trends’ 2020“, Німеччина, 26-27 листопада. 2020. С.4 – 8. *(Особистий внесок здобувача: аналіз результатів досліджень штанг за різного навантаження за втомних випробувань, Мартинець–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).*

12. Копей Б. В., Бакун Б. М., Біжко Т. В. Скінченно-елементний аналіз з’єднання гібридної насосної штанги. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 6th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Kyoto, Japan. 2021. P. 326–335. *(Особистий внесок здобувача: аналіз з’єднання вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками та розрахунок напружень при розтязі, Біжко–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).*

13. Копей Б. В., Бакун Б. М., Мартинець О. Р. Оцінка ресурсу насосних штанг з втомними тріщинами. Тези конференції «Нафтогазова енергетика-21», 20–25 вересня 2021 р. Секція А: Нафтогазова інженерія, Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. 2021. С.50–61. *(Особистий внесок здобувача: аналіз роботоздатності штанг за кількістю циклів навантаження, Мартинець–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).*

14. Копей Б. В., Михайлюк В. В., Бакун Б. М. Дослідження з’єднань вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками при дії навантажень згину. Тези конференції «Нафтогазова енергетика-21», 20-25 вересня 2021 р. Секція А: Нафтогазова інженерія, Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2021, с. 21–22.

(Особистий внесок здобувача: аналіз розподілу нормальних напружень у гібридній штанзі, Михайлюк–графічне оформлення, Копей обговорення результатів).

15. Копей Б. В., Бакун Б. М. Закономірності росту втомних тріщин в гібридних насосних штангах. Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference, February 3-4, 2022. FOP Marenichenko V. V., Dnipro, Ukraine. P. 293–295. *(Особистий внесок здобувача: дослідження кінетики росту тріщин, Копей–обговорення результатів).*

16. Копей Б. В., Копей І. Б., Бакун Б. М. Дослідження росту втомних тріщин в сталевих та композитних насосних штангах. В зб. «Нафта і газ. Наука – Освіта – Виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку»: матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Дрогобич, 27 травня 2022 р.). Дрогобич: ТЗОВ «Трек-ЛТД». 2022. С. 99–105. *(Особистий внесок здобувача: отримання та аналіз результатів досліджень штанг за втомного навантаження, Копей І.–графічне оформлення, Копей Б. – обговорення результатів).*

17. Krechkovska H., Kopey V., Bakun B., Kopey I. #502 Peculiarities of fatigue cracks growth in steel and composite sucker rods. Book of abstracts. ECF23. Madeira. 2022. (27 June – 02 July 2022. P. 451. ISBN: 9788831482189 *(Особистий внесок здобувача: отримання та аналіз результатів досліджень росту втомних тріщин у штангах, Копей І.–графічне оформлення, Копей та Кречковська – обговорення результатів).*


18. Копей Б. В., Канівець В. В., Копей І. Б., Бакун Б. М. Скінченно-елементний аналіз з'єднань сталевого наконечника та гібридного стержня насосної штанги. Пріоритетні напрями розвитку науки під час воєнного стану, ХСІІ Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. м. Одеса, 24 червня 2022 р. P.13–21. *(Особистий внесок здобувача: Скінченно-елементний аналіз з'єднання вуглепластикових стрижнів зі сталевими головками, Копей І. та Канівець – графічне оформлення, Копей Б.–обговорення результатів щодо проблем насосних штанг і їх вирішення).*

19. Kopey B. Krechkovska G. Kopey I. Bakun B. Growth of fatigue cracks in steel and composite sucker rods. XVI International Conference “Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials” (Corrosion-2022). 15–16 November 2022, Lviv, Ukraine: Book of Abstract. Lviv, 2022. P. 29. (*Особистий внесок здобувача: аналіз росту поширення втомних тріщин за різних навантажень, Копей І.–графічне оформлення, Копей та Кречковська – обговорення результатів*).

20. Fractographic features of composite sucker rod fracture B. Bakun, H. Krechkovska, B. Kopey, M. Hredil, O. Student. Book of Abstracts 24th Annual Conference YUCOMAT – 2023, Herceg Novi, Montenegro, September 4–8, 2023. P. 134. (*Особистий внесок здобувача: вивчення закономірностей зміни механічних властивостей та механізмів руйнування складових композитної штанги, Греділь та Студент–підготовка зразків, Копей та Кречковська – обговорення результатів*).

21. Substantiation of the possibility of repairing sucker rods. A. Stefanyshyn, B. Bakun, I. Kopei, H. Krechkovska, O. Stefanyshyn. Int. Young Scientists Conf. on Materials Science and Surface Engineering MSSE2023. Proceedings, Lviv. P.196–199. (*Особистий внесок здобувача: аналіз результатів досліджень штанг за втомного навантаження, виступ на конференції, Стефанишин–графічне оформлення, Копей та Кречковська – обговорення результатів*).

ДОДАТОК Б




МІНЕКОНОМІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРІНОВІ)

вул. Дмитра Тельпики, 1, м. Київ, 01085, тел. +380 44 209-27-06, +380 47 501-00-05
 email: o@ukrpatent.gov.ua, info@ukrpatent.gov.ua, web: ukrpatent.gov.ua, ЄДРПОУ 44073629

18.10.2023 № 10443/3У/23

Адреса для листування
 Івано-Франківський національний
 технічний університет нафти і газу,
 вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019

РІШЕННЯ
 УКРІНОВІ за підписом голови виконавчого директорки
 правління рішення про державну реєстрацію
 корисної моделі

Директорка 

18 жовт 2023
О.П.Орлюк

Стосується заявки № 2022 03340
 (при листуванні просимо позначатися на цей №)

Рішення про державну реєстрацію корисної моделі
Висновок про відповідність заявки на корисну модель формальним вимогам

(21) Реєстраційний номер заявки **2022 03340**

(22) Дата подання **12.09.2022**

(71) Заявник(и)
**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 НАФТИ І ГАЗУ**

(72) Повне ім'я винахідника(ів)
Копей Богдан Володимирович, Бакун Богдан Миколайович

(73) Власник(и) патенту
**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 НАФТИ І ГАЗУ,
 вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, UA**

(51) МПК (2023.01)
**E21B 17/00
 E21B 11/00**

(54) Назва корисної моделі
**СПОСІБ РЕДІАННЯ ТІЛА НАСОСНОЇ ГІБРИДНОЇ ШТАНГИ ЗІ СТАЛЕВОЮ
 ГОЛОВКОЮ**

Для доступу до цього документа з ідентифікатором 2390171023 необхідно:
 1. Перейти за посиланням <http://ukrpatent.gov.ua>
 2. Обрати пункт меню "Сервіси - Отримати оригінал документу"
 3. Ввести ідентифікатор документу та ввести код коду "Завантажити".

ПАТ «Укрнафта»
НГВУ «Долинанафтогаз»

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ
НАСОСНОЇ ШТАНГИ**

ЗАТВЕРДЖЕНО:

**Начальник СТС
НГВУ «Долинанафтогаз»**



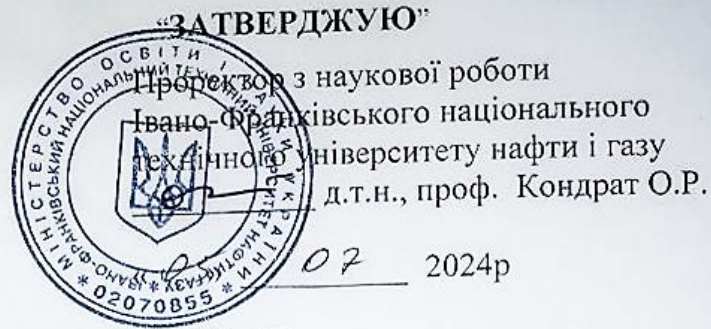
 **Петрів М.В.**

РОЗРОБЛЕНО:

**Проф., д.т.н
Аспірант**

**Копей Б.В.
Бакун Б.М.**

м. Долина



А К Т

про впровадження в навчальний процес
у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу
результатів досліджень аспіранта **Бакуна Богдана Миколайовича**,
які отримані ним на кафедрі нафтогазових машин та обладнання

Комісія у складі зав. кафедри нафтогазових машин та обладнання Інституту інженерної механіки та робототехніки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, к.т.н., доцента Федоровича Я.Т., д.т.н., професора Паневника О.В., к.т.н., професора Ляха М.М., к.т.н., доцента Венгришок Т.П. розглянула питання про впровадження наукових і експериментальних результатів досліджень Бакуна Б.М. у навчальний процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Даний акт складений про те, що під час проведення лекційних та лабораторних занять на кафедрі нафтогазових машин та обладнання студенти вивчають елементи нафтогазових конструкцій, здійснюють моделювання їх напружено-деформованого стану за дії напружень розтягу та згину, враховують вплив динамічних та втомних навантажень на властивості та механізм руйнування елементів обладнання. За безпосередньої участі Бакуна Б.М. була отримана методика прогнозування ресурсу гібридних насосних штанг на основі експериментально отриманих залежностей росту втомних тріщин на етапі їх докритичного поширення та запропонована в роботі конструкція з'єднання тіла гібридної насосної штанги зі сталевією голівкою, що дасть змогу витримувати дію вищого моменту згину, а отже витримувати значні відхилення від нормальної орієнтації свердловини, що сприятиме підвищенню ресурсу штангової колони під час її експлуатації.

Результати досліджень використано під час викладання лекційних курсів з дисципліни «Машини та обладнання для видобутку нафти і газу» для студентів-бакалаврів за ОПП «Обладнання нафтових і газових промислів та студентів-бакалаврів за ОПП «Інжиніринг і сервісне обслуговування нафтогазових машин та обладнання».

Голова комісії:

Зав. кафедрою ІГО,
канд. техн. наук, доцент

Я. Т. Федорович

Члени комісії:

професор, докт. техн. наук

О. В. Паневник

професор, канд. техн. наук

М. М. Лях

доцент, канд. техн. наук

Т. П. Венгришок