

PAWEŁ GARA
YAROSLAV FEDOROVYCH
BOGDAN KOPEY

Badanie odporności żerdzi pompowej na uszkodzenie zmęczeniowe

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych zmęczenia próbek wykonanych z pełnowymiarowych żerdzi pompowych ze stali 15H2GMF w różnych środowiskach korozyjnych. Dla porównania podobne badania przeprowadzono dla zmęczenia korozyjnego próbek wykonanych z pełnowymiarowych żerdzi ze stali 20N2M, 15H2NMF i 15N3MA. Granica wytrzymałości badanych prętów ze stali 15H2GMF w solance złożowej jest o 22% niższa niż stali 20N2M i o 13% niższa niż stali 15H2NMF, a w środowisku symulującym działanie H_2S jest o 34% niższa niż dla stali 20N2M i o 32% niższa od stali 15H2NMF. Przedstawione wyniki uzyskano przy zastosowaniu złożonej metody powierzchniowego wzmacniania żerdzi, która została opracowana w laboratorium Katedry Maszyn i Urządzeń Naftowych i Gazowych Narodowego Uniwersytetu Technicznego Nafty i Gazu w Iwano-Frankiwsku i przetestowana w NGVU Dolynanaftogaz.

Słowa kluczowe: uszkodzenie zmęczeniowe, zmęczenie korozyjne, żerdź pompowa, wiertnictwo

1. WPROWADZENIE

Badanie zachowania żerdzi pompowych z odmiennych materiałów pracujących w wodach solankowych pochodzących z różnych pól naftowych jest kluczowe dla ułatwienia wyboru odpowiedniego producenta. Z uwagi na fakt, że żerdzie pracują w środowiskach o zmiennym stopniu korozyjności, odporność na uszkodzenia zmęczeniowe danego modelu żerdzi może być rozbieżna w zależności od lokalizacji odwiertu [1–9].

Rzetelna analiza tego zagadnienia wymaga podejścia dwutorowego: z wykorzystaniem badań laboratoryjnych oraz terenowych. W warunkach laboratoryjnych, z uwagi na ograniczenia w odtwarzaniu pełnej gamy czynników występujących w praktyce komercyjnej, możliwe jest jedynie ustalenie jakościowych zależności pomiędzy różnymi gatunkami stali w jednym z najbardziej agresywnych środowisk lub w przypadku żerdzi wykonanych z tego samego materiału w różnych środowiskach korozyjnych. Natomiast badania terenowe, przy odpowiedniej liczbie odwiertów oraz zróżnicowanych parametrach mediów i materiałów wykonania żerdzi,

umożliwiają identyfikację nie tylko wskaźników jakościowych, lecz również ilościowych, związanych z trwałością żerdzi w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Wpływ środowisk korozyjnych na zmęczenie materiału należy rozpatrywać, biorąc pod uwagę czas ich oddziaływania w porównaniu z szybkością rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Na tej podstawie można wyróżnić dwa główne mechanizmy oddziaływania mediów na właściwości mechaniczne metalu: pierwsza grupa to mechanizmy działające bardzo szybko (mechanizm adsorpcji), a druga obejmuje te, które potrzebują znacznie większych przedziałów czasowych, aby wywrzeć istotny wpływ [6, 10–11]. Drugi rodzaj oddziaływania to najczęściej procesy powiązane z korozją, a w szczególności z korozją elektrochemiczną. Do pierwszej grupy zalicza się mechanizm adsorpcji, natomiast do drugiej – procesy związane z korozją, w szczególności korozją elektrochemiczną.

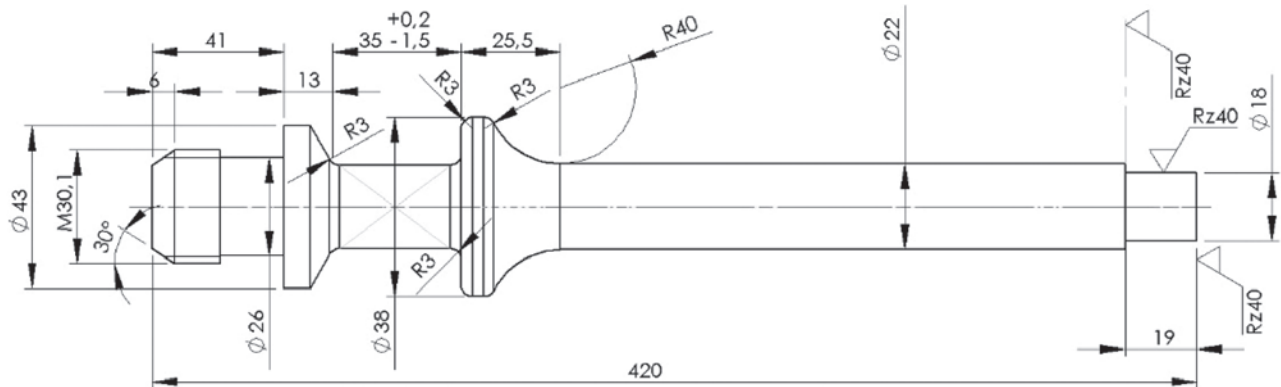
W niniejszym artykule określono granicę wytrzymałości dla żerdzi pompowych wykonanych z trzech gatunków stali (20N2M, 15H2NMF i 15N3MA) pracujących pod obciążeniem cyklicznym o zerowej średniej w dwóch rodzajach środowisk – w solance oraz w środowisku

siarkowodorowym H_2S . Wykazano, że w większości przypadków obecność ciekłego medium przyspiesza powstawanie i rozwój pęknięć korozyjno-zmęczeniowych, co prowadzi do degradacji żerdzi.

2. METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Do badań laboratoryjnych próbek wykonanych z 15 żerdzi pompowych ze stali H2GMF na zmęczenie

wybrano bazę $2 \cdot 10^7$ cykli, pozwalającą ocenić reakcję pierwszego i drugiego mechanizmu narażenia na środowisko korozyjne. W celu określenia granicznej wytrzymałości oraz ustalenia wpływu różnych środowisk korozyjnych zbadano próbki nowych żerdzi pompowych bez obróbki powierzchniowej, wykonanych ze stali 15H2GMF o średnicy 19 mm. Widok oraz wymiary badanych próbek przedstawiono na rysunku 1, a podstawowe dane dotyczące składu chemicznego stali podano w tabeli 1.



Rys. 1. Wymiary próbek wykonanych ze stali 15H2GMF o średnicy 22 mm

Tabela 1

Skład chemiczny stali 15H2GMF

Pierwiastek	C	Si	Mn	Kr	Ni	S	P	Mo	V	Cu
Udział [%]	0,16	0,27	0,65	2,06	0,99	0,015	0,013	0,24	0,11	0,15

Badania prowadzono przy częstotliwości obciążenia równej 15,8 Hz w czterech środowiskach:

- wodzie destylowanej,
- 3-procentowym roztworze NaCl,
- solance złożowej z odwiertów NGDU Dolynanaf-togaz,
- środowisku symulującym działanie siarkowodoru H_2S .

Na rysunku 2 przedstawiono krzywe zmęczenia korozyjnego próbek pełnowymiarowych żerdzi pompowych testowanych w wyżej wymienionych środowiskach.

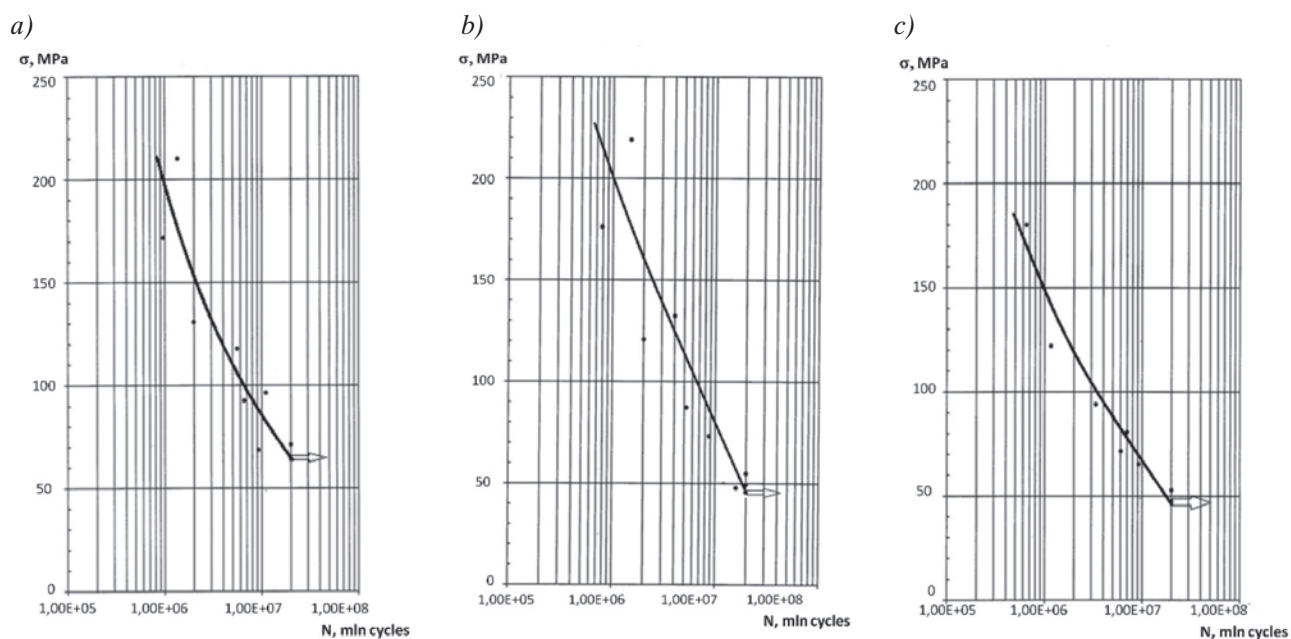
Kształt krzywych zmęczenia, jak wykazały badania, zależy od środowiska, w którym przeprowadzono doświadczenia. Analiza krzywych pokazuje, że w środowiskach korozyjnych żywotność nowych żerdzi pompowych jest znacznie zmniejszona [2], gdy są one obciążone zmiennym obciążeniem. Największe zmniejszenie trwałości obserwuje się w środowisku symulują-

cym działaniem H_2S . Środowisko imitujące działanie H_2S silnie dysocjuje i powoduje uwodornienie stali, co jest główną przyczyną spadku trwałości podczas zmęczenia wysokocyklowego [11]. Dla $N = 2 \cdot 10^7$ wykonanych cykli graniczna wytrzymałość σ_{1k} wynosi:

- 72 MPa w wodzie destylowanej,
- 49 MPa w 3-procentowym wodnym roztworze NaCl,
- 49 MPa w wodzie złożowej,
- 30 MPa w środowisku symulującym działanie H_2S .

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Dla porównania przeprowadzono analogiczne badania zmęczenia korozyjnego próbek wykonanych z pełnowymiarowych żerdzi pompowych ze stali 20N2M, 15H2NMF i 15N3MA. Badania prowadzono przy częstotliwości obciążenia 15,8 Hz w wodzie złożowej z odwiertów NGVU Dolinanaftogaz oraz w środowisku symulującym działanie H_2S . Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 2. Krzywa zmęczenia korozyjnego próbek żerdzi pompowych o średnicy 19 mm ze stali 15H2GMF podczas badania: a) w wodzie destylowanej; b) w 3-procentowym wodnym roztworze NaCl; c) w wodzie złożowej

Tabela 2

Wpływ środowiska na trwałość żerdzi pompowych o średnicy 19 mm wykonanych ze stali 15H2NMF

Granica wytrzymałości σ_{1k} [MPa]	Medium testowe	Trwałość N cykli [mln]
72	woda destylowana	20
49	3-procentowy wodny roztwór NaCl	20
49	woda formacyjna	20
30	symulacja działania H_2S	20

Tabela 3

Wyniki badań próbek żerdzi pompowych o średnicy 19 mm pod kątem zmęczenia w środowiskach korozyjnych

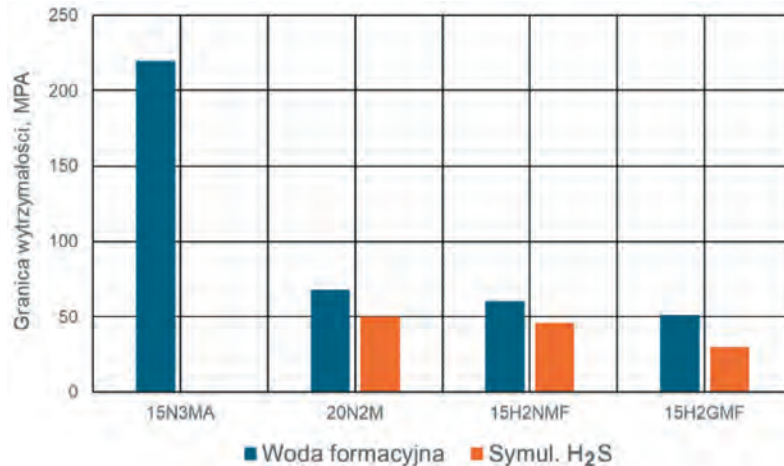
Stan żerdzi	Gatunek stali	Medium testowe	Granica wytrzymałości σ_{1k} MPa
Nowy	15H2NMF	woda formacyjna	60
Nowy	20N2M	woda formacyjna	68
Używany	15H2NMF	woda formacyjna	57
Nowy	15N3MA	woda formacyjna	220
Nowy	20N2M	symulacja działania H_2S	47
Nowy	20N2M	symulacja działania H_2S	40
Używany	15H2NMF	symulacja działania H_2S	44
Nowy	15H2NMF	symulacja działania H_2S	46
Używany	15H2NMF	symulacja działania H_2S	38

Na podstawie analizy danych z tabel 2 i 3 uznano, że przy badaniu w wodzie formacyjnej najwyższa graniczna wytrzymałość stali 15N3MA wynosi 220 MPa. Zmniej-

sza się ona w stalach o malejącej zawartości niklu i wynosi: dla stali 20N2M – 68 MPa, dla stali 15H2NMF – 62 MPa, dla stali 15H2GMF – 51 MPa.

Wyniki pełnowymiarowych badań zmęczenia korozyjnego próbek wykonanych z żerdzi pompowych dla stali 15H2GMF (tab. 2 i 3, rys. 3) wskazują, że granica wytrzymałości badanych prętów w wodzie złożowej jest o 22% niższa niż dla stali 20N2M i 13% niższa od stali 15H2NMF. Natomiast granica wytrzymałości badanych prętów w środowisku symulującym działanie H_2S jest

o 34% niższa w porównaniu ze stalą 20N2M i o 32% niższa niż w przypadku stali 15H2NMF. Nie zaleca się stosowania badanych prętów wykonanych ze stali 15H2GMF bez hartowania i odpowiedniego zabezpieczenia (np. powłoki antykorozyjne, emalie, inhibitory korozji) w warunkach korozyjnych zawierających siarkowodor.



Rys. 3. Porównanie wytrzymałości zmęczeniowej przy przemiennym obciążaniu próbek z żerdzi pompowych o średnicy 19 mm przy częstotliwości ładowania 15,8 Hz w środowiskach korozyjnych

Uznano za przydatne przedstawienie wyników uzyskanych przy zastosowaniu złożonej metody powierzchniowego wzmocnienia żerdzi pompowych, która została opracowana w laboratorium Katedry Maszyn i Urządzeń Naftowych i Gazowniczych Państwowego Uniwersytetu Technicznego Nafty i Gazu w Iwano-Frankiwsku i przetestowana w NGVU Dolynanaftogaz. Mechanizm utwardzania powierzchniowego polega na wytworzeniu mocniejszej i odpornej chemicznie warstwy wierzchniej oraz reszkowych naprężeń ściskających w tej warstwie. Metoda utwardzania powierzchniowego prętów pompowych polega na śrutowaniu korpusu, nałożeniu metalizacji anodowej i ochronnej powłoki antykorozyjnej.

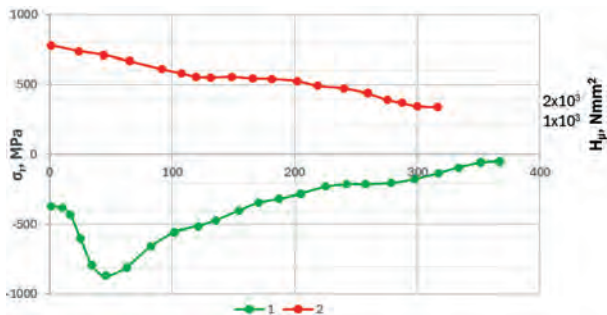
Celem śrutowania jest zneutralizowanie działania koncentratorów naprężeń, wzmocnienie powierzchni korpusu pręta i przygotowanie go do późniejszego nałożenia powłoki cynkowej (aluminiowej). Do śrutowania powierzchni prętów najbardziej odpowiedni jest śrut żeliwny kruszony o średniej wielkości frakcji 1,5–2,5 mm (40–50%) i okrągły (50–60%). Efektywność śrutowania zapewnia się przez dobór optymalnych parametrów determinujących tryb jako całość. W wyniku śrutowania powstają szczątkowe naprężenia ściskające, które zwiększają wytrzymałość zmęczeniową prętów. Najważniejszymi parametrami są: skład i wielkość śrutu, czas ob-

róbki, ciśnienie powietrza w układzie, średnica i kształt dyszy, odległość dyszy od powierzchni obrabianego pręta. Wszystkie zostały wybrane na podstawie zgromadzonych doświadczeń terenowych, licznych badań laboratoryjnych oraz analizy badań partii żerdzi pompowych wykonanych ze stali 20N2M i 15H2NMF. W laboratorium Katedry Urządzeń Naftowych i Gazowniczych w ciągu czterech lat przeprowadzono obserwacje stanu utwardzonej partii żerdzi pompowych. W tym okresie ani razu nie doszło do złamania pręta. Dodatkowo przy każdym podnoszeniu ciężaru dokonywano wizualnej oceny stanu powłoki metalowo-polimerowej na wzmocnionych prętach. Przez pierwsze trzy lata pracy w odwiertach powłoka metalowo-polimerowa na powierzchni prętów pozostawała w zadowalającym stanie. Jednakże po trzech latach eksploatacji hartowanych prętów przysawkowych zaczęło następować częściowe złuszczenie się powłoki metalowo-polimerowej. W celu pełniejszej oceny stanu hartowanych żerdzi ssących po tym okresie pracy w studniach przeprowadzono badania wytrzymałości korozyjnej i zmęczeniowej. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na instalacji IKSh-25, wykorzystując wodę z otworu NGVU Dolynanaftogaz. Badania przeprowadzono na pełnowymiarowych próbkach żerdzi odsysających o średnicy 19 mm wykona-

nych ze stali 20N2M, które przepracowały w odwiercie trzy lata, oraz próbkach nowych żerdzi odsysających z hartowaną warstwą wierzchnią.

Z przeprowadzonych badań wynika, że po trzech latach pracy w odwiercie następuje spadek wytrzymałości korozyjno-zmęczeniowej.

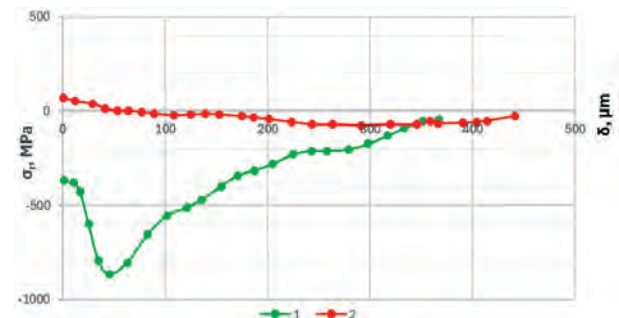
Jak wiadomo, wytrzymałość zmęczeniowa korozyjna w dużej mierze zależy od szczątkowych naprężeń ściskających [2], dlatego, aby wyjaśnić spadek wytrzyma-



Rys. 4. Rozkład szczątkowych naprężeń ściskających σ_r (1) i mikrotwardości H_μ (2) w 19-milimetrowych próbkach nowych prętów wykonanych ze stali 20N2M po hartowaniu

Dodatkowo wykonano pomiary mikrotwardości materiału nowych hartowanych żerdzi pompowych, które pracowały w studniach przez trzy lata. Pomiary mikrotwardości prowadzono co 60 μm od powierzchni do środka. Wyniki pomiarów wskazują, że po trzech latach pracy w odwiercie mikrotwardość materiału żerdzi ssącej maleje i wyrównuje się na jej głębokości. Zmniejszenie mikrotwardości materiału pręta ssącego powoduje w konsekwencji inicjację mikropęknięć, co wpływa również na zmniejszenie wytrzymałości korozyjno-zmęczeniowej [5]. Zatem szczątkowe naprężenia ściskające powstałe podczas procesu złożonego hartowania powierzchniowego zmniejszają się w czasie eksploatacji pod wpływem połączonego działania środowiska korozyjnego i długotrwałych obciążeń cyklicznych. Prowadzi to do zmniejszenia odporności na uszkodzenia korozyjne i zmęczeniowe. Jednak przez trzy lata zapewniona jest 100-procentowa ochrona korpusu pręta przed wpływem środowiska. W ostatnim czasie do produkcji prętów przysawkowych zaczęto stosować nowe materiały kompozytowe [12–17], takie jak włókno węglowe i hybrydowe (rdzeń z włókna węglowego i powłoka z włókna szklanego), które charakteryzują się bardzo dużą odpornością na działanie korozyjne.

łości korozyjno-zmęczeniowej, przeprowadzono badania mające na celu określenie szczątkowych naprężeń ściskających w materiale próbki pręta ssącego, który pracował w odwiercie przez trzy lata. Jak wskazują wyniki badań (rys. 4 i 5), po trzech latach eksploatacji w odwiercie następuje relaksacja szczątkowych naprężeń ściskających szczególnie w górnych warstwach metalu, w związku z czym zauważalny jest spadek wytrzymałości korozyjno-zmęczeniowej.



Rys. 5. Rozkład naprężeń własnych w warstwach wierzchnich żerdzi pompowych po kompleksowej metodzie wzmacniania (1) i trzyletniej eksploatacji (2)

3. PODSUMOWANIE

Granica wytrzymałości badanych prętów ze stali 15H2GMF w wodzie formacyjnej jest o 22% niższa niż stali 20N2M i o 13% niższa niż dla stali 15H2NMF, a w środowisku symulującym działanie H_2S jest o 34% niższa niż dla stali 20N2M i o 32% niższa od stali 15H2NMF. Szczątkowe naprężenia ściskające powstałe w procesie złożonego hartowania powierzchniowego zmniejszają się w czasie eksploatacji pod wpływem połączonego działania środowiska korozyjnego i długotrwałych obciążeń cyklicznych.

Literatura

- [1] Khaburskiy Ya., Nykyforchyn H.: *Chemical method of fatigue and corrosion-fatigue crack growth arrest in steels by metal treatment with the special technological environment*. Procedia Structural Integrity 2018, 13: 1651–1656.
- [2] Kret N.V., Svirskaya M., Venhrynyuk T.P.: *Corrosion-fatigue crack propagation in exploited pump rods made of 20N2M steel*. Materials Science 2020, 56, 2: 279–283.
- [3] Benhaddad S., Lee G.: *Role of microstructure in sucker rod string failures in oil well production*. Practical Failure Analysis 2001, 1: 47–54.
- [4] Fakhri S., Khlaifat A., Hossain M.E., Nameer H.: *A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations*. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 2021, 11: 3815–3839.

- [5] Kopei B.V., Krechkovska H.V., Kopei I., Bakun B.M.: *Specific features of corrosion-fatigue fracture of steel and hybrid pump rods*. Materials Science 2023, 58, 6: 768–773.
- [6] Kopei B., Krechkovska H.V., Nisonyskiy V.P., Bakun B.M.: *Regularities of growth of fatigue cracks in hybrid pumping rods*. Materials Science 2022, 57, 4: 549–556.
- [7] Kopei B.V., Zvirko O.I., Venhrynyuk T.P., Slobodyan Z.V.: *Elevation of the fatigue strength of pump rods as a result of treatment with a special medium*. Materials Science 2020, 56: 125–131.
- [8] Kopei B.V., Gnyp I.P.: *A method for the prediction of the service life of high-strength drill pipes based on the criteria of corrosion fatigue*. Materials Science 1997, 33: 99–103.
- [9] Kar N.K., Hu Y., Barjasteh E., Nutt S.R.: *Tension-tension fatigue of hybrid composite rods*. Composites Part B: Engineering 2012, 43, 5: 2115–2124.
- [10] Nabil Mohamed Aly Eid: *Sucker rods failure mechanisms, methods of avoiding them*. Middle East Technical Conference and Exhibition, Bahrain, March 1981, <https://doi.org/10.2118/9639-MS>.
- [11] Yahya Ahmed K., Hirpa G.L.: *Prediction of Fatigue Crack Initiation under Variable Amplitude Loading: Literature Review*. Metals 2023, 13, 3: 487.
- [12] Krechkovska H., Kopey B., Bakun B., Kopey I.: *Peculiarities of fatigue cracks growth in steel and composite sucker rods*, Procedia Structural Integrity 2022, 42: 1406–1413.
- [13] Bühler M., Lopez E., Esteban O.: *Sucker rod couplings: fatigue failures and stress cracking under corrosive environment*. SPE Artificial Lift Conference and Exhibition – Americas, Galveston, Texas, USA, August 2022 [referat niepublikowany].
- [14] Kopei B.V., Stefanyshyn A.B., Venhrynyuk T.P.: *Fatigue strength of hybrid pump rods*. Materials Science 2019, 54, 5: 739–742.
- [15] Krechkovska H., Bakun B., Kopey I., Student O.: *Feature of fatigue fracture of the composite sucker rod*. Procedia Structural Integrity 2024, 59: 292–298.
- [16] Krechkovska H., Kopey B., Bakun B., Kopey I.: *Peculiarities of fatigue cracks growth in steel and composite sucker rods*. Procedia Structural Integrity 2022, 42: 1406–1413.
- [17] Brewer M., Su C., Gault S.: *Fiberglass Sucker Rod Cost-Effectiveness: A Case Study from the Permian Basin*. Artificial Lift Conference and Exhibition 2022 Americas, Galveston, Texas, USA, August 2022.

PAWEŁ GARA, dr inż.
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
pgara@agh.edu.pl

YAROSLAV FEDOROVYCH, doc.
Narodowy Techniczny Uniwersytet Nafty i Gazu
w Iwano-Frankiwsku
ul. Karpatska 15, Iwano-Frankiwsk, 76019 Ukraina
fedorovychyt@gmail.com

BOGDAN KOPEI, prof.
Narodowy Techniczny Uniwersytet Nafty i Gazu
w Iwano-Frankiwsku
ul. Karpatska 15, Iwano-Frankiwsk, 76019 Ukraina
kopeyb@ukr.net