

PACS numbers: 02.60.Cb, 45.20.-d, 46.70.-p, 62.20.mt, 62.20.Qp, 81.40.Np, 81.70.Bt

## **Вплив геометрії внутрішніх тріщиноподібних дефектів на оцінювання безаварійної роботи тривало експлуатованих труб бурової колони**

О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський, В. І. Артим, В. В. Тирлич

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15,  
76019 Івано-Франківськ, Україна*

У статті викладено основи чисельно-експериментальної методики для інтерпретації результатів технічного діагностування тривало експлуатованих бурових труб, що містять внутрішні напівеліптичні тріщиноподібні дефекти. Оцінку напруженого стану в околі напівеліптичної тріщини, розташованої на внутрішній поверхні пустотілого циліндра, що знаходиться під дією осового навантаження, здійснено за методом скінченних елементів. Визначали напружений стан в околі вершини напівеліптичної тріщини і на цій основі обчислювали характеристики механіки руйнування:  $J$ -інтеграл та коефіцієнти інтенсивності напружень. Експериментально визначено умови, за яких можливе руйнування низько- та середньовуглецевих низьколегованих сталей із феритно-перлітною структурою бурових труб груп міцності «К» та «G-105», що тривало експлуатувалися, тобто встановлено критичну тріщиностійкість, та обчислено величину критичного коефіцієнта інтенсивності напружень. Побудовано діаграми оцінки ризику руйнування у координатах «глибина тріщиноподібного дефекту — глибина буріння — коефіцієнт інтенсивності напружень», які дозволяють оцінити безпечну глибину внутрішніх напівеліптичних тріщиноподібних дефектів, виявлених засобами технічного діагностування з урахуванням результатів експериментальних досліджень

---

Corresponding author: Oleg Yuliyovych Vytyaz  
E-mail: o.vytyaz@gmail.com

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
15 Karpatska Str., UA-76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Citation: O. Yu. Vytyaz, R. S. Hrabovskyy, V. I. Artym, and V. V. Tyrlych, Effect of Geometry of Internal Crack-Like Defects on Assessing Trouble-Free Operation of Long-Term Operated Pipes of Drill String, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 12: 1715–1727 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.12.1715](https://doi.org/10.15407/mfint.42.12.1715).

критичної тріщиностійкості. Встановлено, що у разі спуско-підіймальних операцій відсутні умови для руйнувань бурильних труб, які виготовляють з низько- та середньовуглецевих низьколегованих сталей із феритно-перлітною структурою, з поперечним напівеліптичним тріщиноподібним дефектом, глибина якого не перевищує 50% товщини стінки труби.

**Ключові слова:** бурильні труби, внутрішні напівеліптичні дефекти, коефіцієнт інтенсивності напружень.

The article outlines the basics of numerical-experimental method for the interpretation of technical diagnostics results of long-term operated drill pipes containing internal semi-elliptic crack-like defects. Estimation of the stress state in the vicinity of a semi-elliptic crack located on the inner surface of a hollow cylinder under axial load is performed by using the finite element method. The stress state in the vicinity of the vertex of the semi-elliptic crack is determined and on this basis the characteristics of the fracture mechanics (J-integral and stress intensity factor) are calculated. The conditions of destruction of low- and medium-carbon low-alloying steels with ferrite-perlite structure of drill pipes of strength groups 'K' and 'G-105', which have been used for a long time, are experimentally determined, i.e. critical crack resistance is determined and the value of critical stress intensity factor is calculated. Diagrams of fracture risk assessment in the coordinates 'crack-like defect—drilling depth—stress intensity factor' are constructed. They allow estimating the safe depth of internal semi-elliptic crack-like defects detected by means of technical diagnostics taking into account the results of experimental research. As established, during tripping operations there are no conditions for the failure of drill pipes made of low- and medium-carbon low-alloying steels with ferrite-perlite structure, with a transverse semi-elliptic crack-like defect which depth does not exceed 50% of the pipe wall thickness.

**Key words:** drill pipes, internal semi-elliptical defects, stress intensity factor.

*(Отримано 31 травня 2020 р.; остаточн. варіант — 22 жовтня 2020 р.)*

## 1. ВСТУП

Для буріння глибоких свердловин використовують як вітчизняні, так і зарубіжні труби, які виготовляють з низько- та середньовуглецевих низьколегованих сталей із феритно-перлітною структурою. Однак у процесі буріння по тілу тривало експлуатованої труби, переважно на її внутрішній поверхні, на різних глибинах виникають корозійні виразки, на поверхні яких утворюються тріщиноподібні дефекти напівеліптичної форми (рис. 1). Під впливом силових факторів та корозійного середовища тріщиноподібні дефекти розвиваються і виходять на її зовнішню поверхню, що спричиняє аварійні ситуації [1–4]. Збільшення глибини буріння призводить до суттєвого збільшення кількості аварій, пов'язаних із виходом з ладу елементів бурових колон. Так, в інтервалі буріння 2500–4500 м

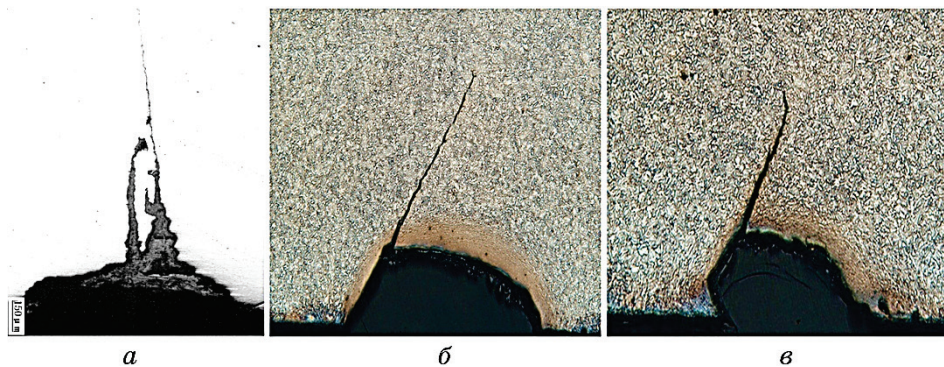
кількість відмов зростає у 4,8–5 разів, а в інтервалі 4500–5000 м — у 9,8 рази [5].

Специфіка руйнування на великих глибинах визначається домінуючим впливом силових факторів, що виникають у процесі буріння та спуско-підймальних операцій (СПО), які зумовлюють у місцях пошкоджень розвиток тріщиноподібних дефектів до критичних розмірів. Тривалість СПО у процесі буріння глибоких свердловин складає до 60% від загального виробничого часу. Із ростом глибини свердловини різко збільшується об'єм СПО. За весь період буріння свердловини глибиною 4500–5000 м опускають та підіймають 50000–80000 свічок [5].

Процеси утворення і розвитку тріщин у низьколегованих сталях, які ґрунтуються на вивченні механізмів мікро- та макроруйнування вивчає механіка руйнування і міцності конструкційних матеріалів [1–4].

Для оцінки закономірностей зародження, розвитку та неконтрольованого поширення тріщини у таких сталях лінійна механіка руйнування враховує особливості напружено-деформованого стану у її вершині. Вона також встановлює порогові та критичні критерії руйнування елементів сталевих конструкцій з тріщинами, тобто розвиток тріщини в тілі за визначених умов його деформування.

Для тріщин нормального розриву за умов плоскої деформації умова початку розвитку тріщини у деформованому елементі сталевих конструкцій (критерій Ірвіна [5]) полягає у тому, що коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$  у розглядуваній точці контуру тріщини у момент її локального розвитку вважається рівним певній характеристиці матеріалу  $K_{Ic}$ , тобто критерій граничної рівноваги ті-



**Рис. 1.** Морфологія тріщин, ініційована від корозійних виразок півеліптичної форми: *a* — [1], *б* і *в* — [2].

**Fig. 1.** Morphology of cracks caused by corrosion ulcers of semi-elliptical form: *a*—[1], *б* and *в*—[2].

ла з тріщиною формулюють так: тріщина починає поширюватись у деформованому твердому тілі, якщо величина коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  досягає деякого критичного для даного матеріалу значення і його можна записати таким чином:

$$K_I = K_{Ic}. \quad (1)$$

Коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Ic}$  характеризує здатність матеріалу чинити опір поширенню у ньому тріщини за квазістатичного збільшення навантажень (статична тріщиностійкість) і є параметром матеріалу в заданих умовах випробування, який характеризує його тріщиностійкість [5].

Зі зростанням міцності сталей величина  $K_{Ic}$  знижується. Так, леґувальні елементи, які зміцнюють твердий розчин і утворюють у сталях дисперсні фази, що утруднюють пластичну плинність матеріалу і таким чином знижують його критичну тріщиностійкість. З іншого боку, у невеликих кількостях такі леґувальні елементи, як Хром, Ванадій, Ніобій, Титан і Тантал, що подрібнюють зерно, підвищують критичну тріщиностійкість сталей  $K_{Ic}$ . Розкиснення сталей Алюмінієм також сприяє подрібненню зерна і підвищенню їхньої критичної тріщиностійкості [5].

У сталях тривало експлуатованих бурильних труб відбуваються процеси мікропластичності (деформаційного старіння), тобто зниження фізико-механічних характеристик, які визначають роботоздатність матеріалу як елемента конструкції [1–4]. Необхідно зауважити, що з використанням бурильних труб, що виготовлені із низьколегованих сталей з підвищеними характеристиками міцності для виконання глибокого буріння, останніми роками має місце значна кількість аварійних ситуацій [1–4, 6]. Оскільки бурильні труби у процесі експлуатації зазнають постійного впливу втомних та динамічних навантажень [4], що складають до 75% від границі плинності, то це призводить до зміни механічних властивостей сталей і, як наслідок, до їх деградації.

Для випадків руйнування конструкції зі значними пластичними деформаціями в умовах плоского напруженого стану підходи лінійної механіки руйнування застосовувати не можна. Саме до таких випадків можна віднести і бурильну трубу як елемент конструкції (бурової колони). Для таких випадків використовують енергетичний критерій  $J$ -інтеграл [8, 9].

За допомогою  $J$ -інтеграла [8, 9] оцінку руйнування матеріалів у пружно-пластичній зоні встановлюють шляхом визначення інтенсивності вивільнення під час розвитку тріщини енергії деформування. Разом з тим, вибирають контур інтегрування так, щоб інтеграл залежав тільки від особливостей поля деформацій у вершині тріщини. Величини  $J$ -інтеграла не залежить від контуру ін-

тегрування у випадку пружної поведінки матеріалу. Вважають, що його інваріантність зберігається і для пружно-пластичного стану матеріалу, якщо пластичну деформацію описує деформаційна теорія пластичності.

Метою статті є оцінювання умов, за яких потенційно можливе поперечне руйнування тривало експлуатованих сталей бурильних труб за СПО, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

## **2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ОЦІНКИ УМОВ РУЙНУВАННЯ БУРИЛЬНИХ ТРУБ**

В основу методики чисельно-експериментальної оцінки умов руйнування бурильних труб покладено порівняльну оцінку величини коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $K_I$ , обчисленого за допомогою методу скінченних елементів у вершині поперечного напівеліптичного тріщиноподібного дефекту та одержаного дослідним шляхом значення критичного КІН  $K_{Ic}$  для металу тривало експлуатованих бурильних труб.

### **2.1. Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень на основі побудови скінченно-елементної моделі фрагмента бурильної труби з поперечною напівеліптичною тріщиною**

Для чисельного моделювання використовували програмний комплекс ANSYS 19.2. Розглядали фрагмент бурильної труби довжиною 600 мм, діаметром 127 мм та товщиною стінки рівною 8,4 мм. Для побудови геометричної моделі використали дві системи координат: загальну, пов'язану з трубою, та місцеву, яку використали для моделювання самої тріщини. Тріщина мала напівеліптичну форму та знаходилась на внутрішній поверхні труби, перпендикулярно до її осі. Щоб ефективніше використати властивості ANSYS, її розташували посередині розглядуваного фрагмента. Геометричні розміри тріщини вибирали способом узагальнення даних дефектоскопії тривало експлуатованих бурильних труб, проведеної на підприємствах бурового управління «Укрбургаз» за 2015–2017 роки [6, 7].

Для генерації 3D-сітки фрагмента труби використано команду MESH з використанням елементів TETRAHEDRONS. За допомогою об'єкта CRACK включали напівеліптичну тріщину у вихідну сітку скінченних елементів. Геометричні параметри, число скінченних елементів по довжині підбирали таким чином, щоб створити перехідну область для забезпечення плавної зміни розміру елементів в районі тріщини. За допомогою команди Body Sizing, скориставшись опцією Sphere of Influence, згущували сітку в зоні поширення тріщини. До того ж, розмір елементів не перевищував декількох

десятих міліметра (від 0,1–0,3 мм) (рис. 2, а, б) [8].

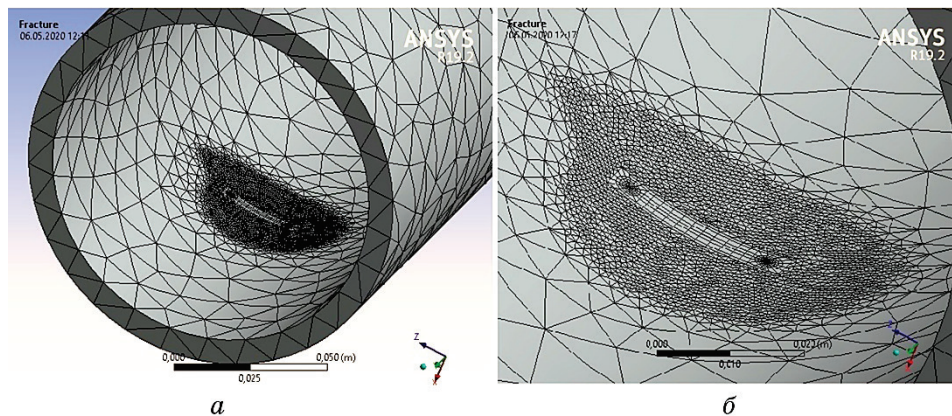
Крок розбиття труби є важливим параметром, який впливає на точність результатів та час обчислення. Розбиття є задовільним, коли дає можливість одержати точні результати в оптимальний час для обчислення.

Напружено-деформований стан в околі фронту тріщини визначали за допомогою команди FRACTURE TOOL, яка дає можливість обчислити характеристики механіки руйнування, використовуючи  $J$ -інтеграл. Для обчислення  $J$ -інтеграла застосували метод CINT, що дозволяє проводити обчислення по декількох незалежних контурах інтегрування. Для розрахунків заданої точності ми використали 6 контурів інтегрування.

## 2.2. Експериментальне визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень металу бурильних труб

Матеріалом дослідження були взірці, вирізані з фрагментів експлуатованих понад 10 років вітчизняних бурильних труб з умовним діаметром 127 мм групи міцності «К» (17 років,  $t = 8,4$  мм), а також китайських — групи міцності «G-105» (10 років,  $t = 8,4$  мм). Хімічний склад досліджуваних сталей подано в табл. 1.

Механічні характеристики досліджуваних сталей тривало експлуатованих бурильних труб (див. табл. 1) визначали за стандартною процедурою [9] випробувань п'ятикратних циліндричних зразків на розтяг. Їх значення наведено в табл. 2.



**Рис. 2.** Скінченно-елементна модель бурильної труби з тріщиною на внутрішній поверхні (а) та згущення сітки в районі тріщини (б).

**Fig. 2.** Finite element model of a drill pipe with a crack on the inner surface (a) and thickening of the grid in the area of the crack (b).

**ТАБЛИЦЯ 1.** Хімічний склад досліджуваних сталей бурильних труб.**TABLE 1.** Chemical composition of investigated drill pipe steels.

Група міцності	Масова частка елементів, %								
	C	Mn	Si	V	Cu	Al	Ni	$S_{\max}$	$P_{\max}$
«К» (Україна)	0,47	0,82	0,26	0,10	0,09	0,15	0,07	0,016	0,018
«G-105» (Китай)	0,24	1,11	0,23	0,15	0,091	0,86	0,041	0,0018	0,009

Під час експериментального визначення умов руйнування необхідно врахувати той факт, що руйнування металу бурильних труб шляхом розвитку поперечних напівеліптичних тріщиноподібних дефектів відбувається в умовах плоского напруженого стану.

Руйнування у цьому випадку необхідно оцінювати за енергетичним [10] критерієм: тріщина починає поширюватись, якщо інтенсивність енергії  $J$ , що звільнилася, досягає критичної величини  $J_*$  (критична тріщиностійкість):

$$J_* = J_c. \quad (2)$$

Для визначення величини  $J_c$  вирізали по п'ять зразків з фрагментів досліджуваних бурильних труб відповідних груп міцності розміром 100,0×10,0×8,4 мм (рис. 3, а). Схему вирізання зразків наведено на рис. 3, б.

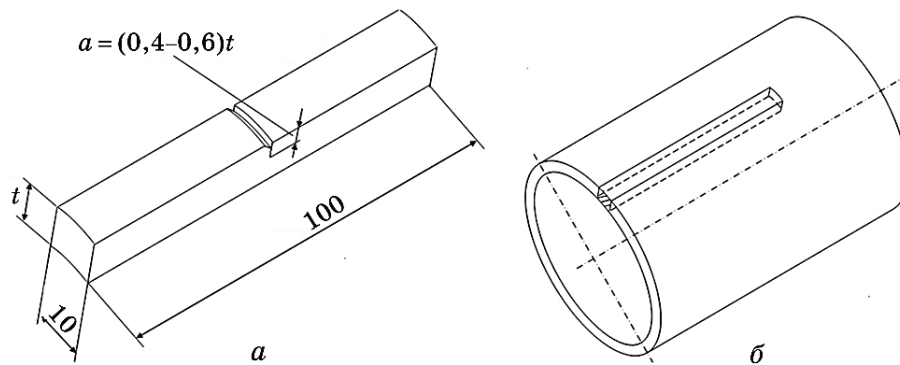
За основу для експериментів взято методику [11], однак, враховуючи потенційну небезпеку наявних дефектів, ми використовували нестандартний зразок (рис. 4, а, б), виходячи із розмірів досліджуваних бурильних труб. Випробування проводили на повітрі за температури 20°C. Зразки із попередньо виведеною втомною тріщиною навантажували на повітрі за схемою триточкового згину (рис. 4, в) за віддалі між опорами 34 мм. Швидкість навантаження зразка становила  $1,67 \cdot 10^{-5}$  мм/с і залишалася постійною протягом усіх випробувань.

Значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $K_{Ic}$  обчислювали за співвідношенням [8]:

**ТАБЛИЦЯ 2.** Механічні характеристики сталей експлуатованих бурильних труб.**TABLE 2.** Mechanical characteristics of steels of operated drill pipes.

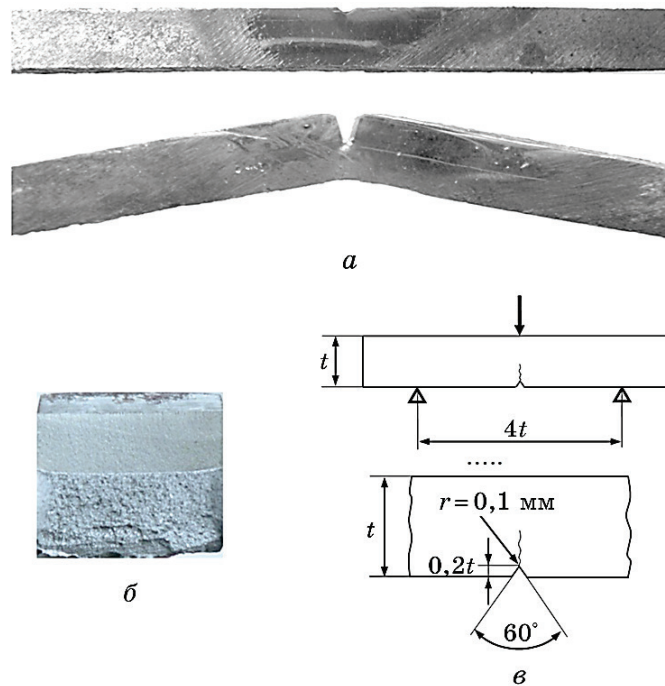
Група міцності	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
«К» (Україна)	685,0	462,5	12,0	34,5
«G-105» (Китай)	925,0	839,0	13,4	61,7





**Рис. 3.** Розміри (а) та схема вирізки (б) для випробування на статичну тріщиностійкість.

**Fig. 3.** Dimensions (а) and scheme of the segment (б) for static crack resistance test.



**Рис. 4.** Загальний вигляд зразка до і після (а) та деформована поверхня зразка після випробування (б), а також схема навантаження (в).

**Fig. 4.** General view of the sample before and after the test (а) and the deformed surface of the sample after test (б), as well as the diagram of load (в).



**ТАБЛИЦЯ 3.** Критичні коефіцієнти інтенсивності напружень  $K_{Jc}$ .**TABLE 3.** The critical stress intensity factors  $K_{Jc}$ .

Група міцності	$K_{Jc}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>					$K_{Jc}^{cp}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
«К»	130,8	129,2	130,1	130,0	133,7	130,8
«G-105»	135,5	136,9	133,6	139,1	137,0	136,4

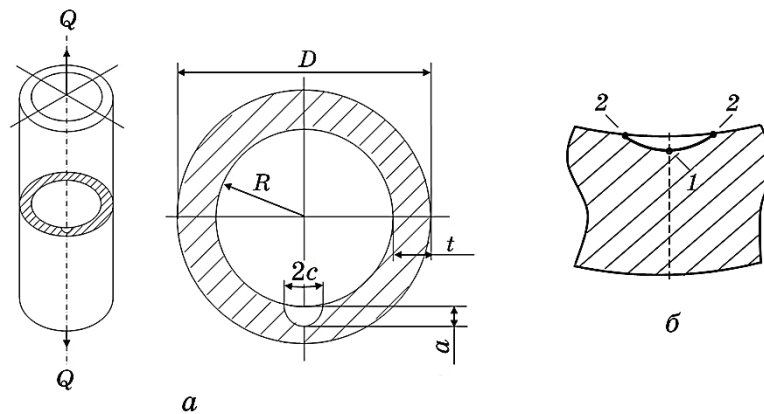
$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c E}{1 - \mu^2}}, \quad (3)$$

де  $J_c$  — критична тріщиностійкість,  $E$  — модуль Юнга ( $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па),  $\mu$  — коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей  $\mu = 0,3$ ).

Результати обчислень наведено в табл. 3.

### 3. ОЦІНЮВАННЯ УМОВ РУЙНУВАННЯ БУРИЛЬНОЇ ТРУБИ ІЗ ПОПЕРЕЧНОЮ ВНУТРІШНЬОЮ НАПІВЕЛІПТИЧНОЮ ТРІЩИНОЮ, ЩО ПЕРЕБУВАЄ ПІД ДІЄЮ ОСЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Для визначення умов [12], за яких можливе раптове руйнування тривало експлуатованих бурових труб (див. табл. 1–3), що містять поперечний внутрішній тріщиноподібний дефект, розглянемо розрахункову схему, зображену на рис. 5. На основі аналізу літературних даних [1–5] та даних технічного діагностування бурових



**Рис. 5.** Пустотілий циліндр під дією осьового навантаження з внутрішньою півеліптичною тріщиною.

**Fig. 5.** Hollow cylinder under axial load with internal semi-elliptical crack.

**ТАБЛИЦЯ 4.** Величина динамічного навантаження ( $F_D$ ) за СПО з глибини буріння ( $L$ ).**TABLE 4.** The value of the dynamic load ( $F_D$ ) during tripping operations from the drilling depth ( $L$ ).

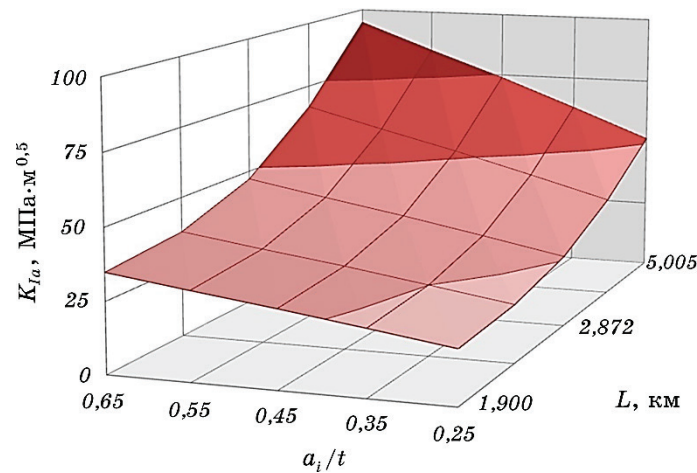
$F_D$ , МН	0,807	0,872	1,089	1,544	2,193
$L$ , м	1900	2305	2872	3763	5005

труб [6, 7] дефект моделювали напівеліптичною тріщиною з розмірами півосей  $c$  та  $a$  у співвідношенні  $c/a = 2$ .

Вплив динамічних навантажень за СПО на величину осьового навантаження залежно від глибини буріння врахували за результатами роботи [13, 14] (табл. 4).

#### 4. ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Підрахунок значень КІН  $K_I$  здійснювали в характерних точках напівеліпса (див. рис. 5, б), тобто у точках 1 і 2, скориставшись методом скінченних елементів [13]. Застосування методу має певні просторові обмеження, тому величину КІН визначали в інтервалі гли-

**Рис. 6.** Вплив глибини  $a_i/t$  поперечної внутрішньої напівеліптичної тріщини та глибини буріння  $L$  під час СПО на величину КІН  $K_{Ia}$ .**Fig. 6.** Influence of the depth  $a_i/t$  of the transverse internal semi-elliptical crack and the depth of tripping operations during drilling  $L$  on the value of SIF  $K_{Ia}$ .

бин  $0,25 \leq a_i/t \leq 0,65$ . Оскільки величина КІН  $K_I$  у точці 1 ( $K_{Ia}$ ) за розрахунками на  $\sim 10\%$  більша, ніж у точках 2, то очевидно переважальний розвиток напівеліптичної тріщини відбувається вглиб стінки бурильної труби з подальшим виходом її на зовнішню поверхню. На рисунку 6 представлено результати розрахункових обчислень.

Враховуючи, що коефіцієнт запасу міцності для металу бурильних труб [5] рівний  $k \geq 1,5$ , прогнозна чисельно-експериментальна оцінка одержаних результатів (рис. 6 та табл. 3) показує, що у процесі експлуатації за СПО відсутні умови для руйнування досліджуваних бурильних труб [15], виготовлених з низько- та середньовуглецевих низьколегованих сталей із феритно-перлітною структурою з поперечним напівеліптичним тріщиноподібним дефектом (рис. 5), глибина якого не перевищує 50% товщини стінки труби.

## 5. ВИСНОВКИ

Запропоновано чисельно-експериментальну методику для інтерпретації результатів технічного діагностування тривало експлуатованих бурильних труб, що містять внутрішні напівеліптичні тріщиноподібні дефекти [16]. Встановлено, що за СПО відсутні умови для руйнувань бурильних труб [17, 18], які виготовляють з низько- та середньовуглецевих низьколегованих сталей із феритно-перлітною структурою з поперечним напівеліптичним тріщиноподібним дефектом, глибина якого не перевищує 50% товщини стінки труби.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. S. Lu, Y. Feng, F. Luo, C. Qin, and X. Wang, *International J. Fatigue*, **27**, Iss. 10–12, October–December: 1360 (2005).
2. K. A. Macdonald and J. V. BJune, *Engineering Failure Analysis*, **14**, No. 8: 1641 (2007).
3. S. M. Zamani, S. A. Hassanzadeh-Tabrizi, and H. Sharifi, *Engineering Failure Analysis*, **59**, No. 1: 605 (2016).
4. В. І. Похмурський, Є. І. Крижанівський, В. М. Івасів, О. М. Карпаш, Б. В. Копей, Я. С. Коцкулич, Б. Д. Малько, Ю. В. Міронов, Ю. Д. Петрина, *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб.* (Ред. В. В. Панасюк). Том 10: *Міцність та довговічність нафтогазового обладнання* (Львів–Івано-Франківськ: Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу: 2006).
5. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4-х томах* (Ред. В. В. Панасюк) (Київ: Наукова думка: 1988).
6. *Ускладнення і брак в роботі під час буріння свердловин в БУ «УКРБУРГАЗ», Інформаційний бюлетень про аварії за 2016 рік.*

7. Інформаційний бюлетень про аварії, ускладнення і брак в роботі під час буріння свердловин в БУ «УКРБУРГАЗ» за 2015 рік.
8. Г. П. Черепанов, *Механика хрупкого разрушения* (Москва: Наука: 1974).
9. J. Rice, *J. Appl. Mechanics*, **35**: 379 (1968).
10. Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский, *ANSYS в руках инженера: Механика разрушения* (Москва: ЛЕНАНД: 2010).
11. *ASTM E1737-96. Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness* (American Society for Testing and Materials: 1996).
12. Ya. Friedman, *Mechanical Properties of Metals. Mechanical Tests. Design Durability* (Moscow: Mechanical Engineering: 1974), vol. 2.
13. О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський, В. В. Тирлич, В. І. Артим, *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, № 1 (44): 25 (2018).
14. В. М. Мойсшин, К. Г. Левчук, *Вібрації в техніці та технологіях*, № 3(75): 84 (2014).
15. Mohamed Ali Bouaziz, Mohamed Amine Guidara, Christian Schmitt, Ezzeddine Hady Taneb, Zitouni Azari, and Ihor Dmytrakh, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, **42**, Iss. 4: 792 (2019).
16. К. Г. Левчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 5: 701 (2018).
17. M. Moisyshyn, B. Borysevysh, and R. Shcherbiy, *Multifactorial Mathematical Model of Mechanical Drilling Speed, in Mining of Mineral Deposits* (Eds. G. Pivnyak, V. Bondarenko, I. Kovalevs'ka, and M. Illiashov) (London: CRC Press: 2013), p. 359.
18. V. Moisyshyn and K. Levchuk, *Min. Min. Dep.*, No. 10(3): 65 (2016).

## REFERENCES

1. S. Lu, Y. Feng, F. Luo, C. Qin, and X. Wang, *International J. Fatigue*, **27**, Iss. 10–12, October–December: 1360 (2005).
2. K. A. Macdonald and J. V. BJune, *Engineering Failure Analysis*, **14**, No. 8: 1641 (2007).
3. S. M. Zamani, S. A. Hassanzadeh-Tabrizi, and H. Sharifi, *Engineering Failure Analysis*, **59**, No. 1: 605 (2016).
4. V. I. Pokhmurs'kyi, Ye. I. Kryzhaniv's'kyi, V. M. Ivasiv, O. M. Karpash, B. V. Kopey, Ya. S. Kotskulych, B. D. Mal'ko, Yu. V. Mironov, and Yu. D. Petryna, *Mekhanika Ruynuvannya i Mitsnist' Materialiv. Dovidn. Posib.* [Fracture Mechanics and Strength of Materials] (Ed. V. V. Panasyuk). Vol. 10: *Mitsnist' ta Dovhovichnist' Naftohazovoho Obladnannya* [Strength and Durability of Oil and Gas Equipment] (Lviv–Ivano-Frankivsk: G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute, N.A.S. of Ukraine, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas: 2006) (in Ukrainian).
5. *Mekhanika Razrusheniya i Prochnost Materialov* [Fracture Mechanics and Strength of Materials] (Ed. V. V. Panasyuk) (Kyiv: Naukova Dumka: 1988) (in Russian).
6. *Informatsiynyy Byuleten pro Avariyyi, Uskladnennyya i Brak v Roboti pid Chas Burinnya Sverдловyn v BU 'UKRBUURHAZ' za 2016 Rik* [Information Bulletin on Accidents, Complications and Work Shortages During Well Drilling at DD

- ‘UKRBURGAZ’ for 2016] (in Ukrainian).
7. *Informatsiynyy Byuleten pro Avariyi, Uskladnennyya i Brak v Roboti pid Chas Burinnya Sverdlovyn v BU ‘UKRBURHAZ’ za 2015 Rik* [Information Bulletin on Accidents, Complications and Work Shortages During Well Drilling at DD ‘UKRBURGAZ’ for 2015] (in Ukrainian).
8. G. P. Cherepanov, *Mekhanika Khrupkoho Razrusheniya* [Mechanics of Brittle Fracture] (Moscow: Nauka: 1974) (in Russian).
9. J. Rice, *J. Appl. Mechanics*, **35**: 379 (1968).
10. E. M. Morozov, A. Yu. Muzyemnek, and A. S. Shadsky, *ANSYS v Rukakh Inzhenera: Mekhanika Razrusheniya* [ANSYS in the Hands of an Engineer: Fracture Mechanics] (Moscow: LENAND: 2010) (in Russian).
11. *ASTM E1737-96. Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness* (American Society for Testing and Materials: 1996).
12. Ya. Friedman, *Mechanical Properties of Metals. Mechanical Tests. Design Durability* (Moscow: Mechanical Engineering: 1974), vol. 2.
13. O. Y. Vytyaz, R. S. Hrabovskyi, V. V. Tyrlych, and V. I. Artym, *Sci. Bulletin Ivano-Frankivsk National Technical University Oil and Gas*, No. 1 (44): 38 (2018) (in Ukrainian).
14. V. M. Moysyshyn and K. H. Levchuk, *Vibratsiyyi v Tekhnitsi ta Tekhnolohiyakh*, No. 3(75): 84 (2014) (in Ukrainian).
15. Mohamed Ali Bouaziz, Mohamed Amine Guidara, Christian Schmitt, Ezzeddine Hady Taïeb, Zitouni Azari, and Ihor Dmytrakh, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, **42**, Iss. 4: 792 (2019).
16. K. G. Levchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 5: 701 (2018) (in Ukrainian).
17. M. Moysyshyn, B. Borysevych, and R. Shcherbiy, *Multifactorial Mathematical Model of Mechanical Drilling Speed, in Mining of Mineral Deposits* (Eds. G. Pivnyak, V. Bondarenko, I. Kovalevs’ka, and M. Illiashov) (London: CRC Press: 2013), p. 359.
18. V. Moysyshyn and K. Levchuk, *Min. Min. Dep.*, No. 10(3): 65 (2016).