

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КІНЕТИКУ ВТОМНИХ ТРІЩИН

О.Я. Фафлей

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,
e-mail: no@nupg.edu.ua

Під час експлуатації на бурильні труби діють різні види навантажень, найнебезпечнішими з яких є асиметричні. Визначення втомної міцності бурильної колони при нестационарному режимі навантажування є однією з головних умов забезпечення її надійності. У зв'язку з цим необхідно зазначити важливість використання експериментальних методів дослідження, які дають змогу з більшою точністю вивчати втомні пошкодження в елементах бурильних труб.

За допомогою установки УДПТ-1 проведено експериментальні дослідження впливу розтягуючої асиметрії навантаження на кінетику втомних тріщин. Зразки для дослідження виготовлені з бурильних труб, матеріалом яких є сталі G105 та 40XH. За результатами досліджень виявлено, що при регулярному навантаженні спостерігається безумовний вплив розтягуючої асиметрії на швидкість поширення тріщини.

Оцінено вплив різних програм навантажування на зміну швидкості поширення втомних тріщин у досліджуваних зразках. Досліджено закономірності поширення втомної тріщини при блоковому навантажуванні для сталей G105 та 40XH. Встановлено, що для досліджуваних зразків у випадку двоступеневого навантажування із однаковою амплітудою та змінною розтягуючою асиметрією при переході від низького до високого рівня навантажування тріщина розвивається із більшою швидкістю, порівняно із регулярним навантаженням, а при переході від високого до низького навантаження поширення тріщини сповільнюється на деяке число циклів.

Ключові слова: бурильна колона, втомна тріщина, розтягуюча асиметрія навантаження.

При эксплуатации на бурильные трубы действуют различные виды нагрузок, наиболее опасными из которых являются асимметричные. Определение усталостной прочности бурильной колонны при нестационарном режиме нагрузки является одним из главных условий обеспечения ее надежности. В связи с этим необходимо отметить важность использования экспериментальных методов исследования, которые позволяют с большей точностью изучать усталостные повреждения в элементах бурильных труб.

С помощью установки УДПТ-1 проведены экспериментальные исследования влияния растягивающей асимметрии нагрузки на кинетику усталостных трещин. Образцы для исследования изготовлены из бурильных труб, из сталей G105 и 40XH. По результатам исследований выявлено, что при регулярной нагрузке наблюдается безусловное влияние растягивающей асимметрии на скорость распространения трещины.

Проведена оценка влияния различных программ нагрузки на изменение скорости роста усталостных трещин в исследуемых образцах. Исследованы закономерности роста усталостной трещины при блочной нагрузке для сталей G105 и 40XH. Установлено, что для исследуемых образцов в случае двухступенчатой нагрузки с одинаковой амплитудой и переменной растягивающей асимметрией при переходе от низкого к высокому уровню нагрузки трещина развивается с увеличенной скоростью по сравнению с регулярной нагрузкой, а при переходе от высокого уровня к низкому происходит задержка роста трещины на некоторое число циклов.

Ключевые слова: бурильная колонна, усталостная трещина, растягивающая асимметрия нагрузки.

Various types of loads have an effect upon drill pipes during operation. Especially dangerous are loads with different degrees of asymmetry. The determination of the fatigue strength of the drill column in the non-stationary loading mode is one of the main conditions for ensuring its reliability. In this regard, it is important to note the importance of using experimental methods that allow studying the fatigue damage in the elements of drill pipes with high precision.

With the help of the UDPT-1 unit, experimental studies of the tensile asymmetry of loading effect on the kinetics of fatigue cracks have been conducted. The drill pipes made of G105 and 40XH steel serve as samples for research. During the research it has been found that under regular load an unconditional effect of the tensile asymmetry on the rate of crack propagation is observed.

The influence of various loading programs on the change in the growth rate of fatigue cracks in the samples studied has been carried out. The laws of the fatigue crack growth during block loading for G105 and 40XH steels have been studied. It has been established that for the samples studied in case of two-stage loading with the same amplitude and variable tensile asymmetry during transition from low to high load level, the crack develops at an increased speed compared to regular load, and during the transition from high to low level, there is a delay in the growth of the crack during several cycles.

Keywords: drill column, fatigue crack, tensile asymmetry of loading.

Вступ

Одним із шляхів розвитку паливно-енергетичного комплексу України є спорудження глибоких, похило-скерованих та горизонтальних свердловин як на нових родовищах,

так і на тих, що перебувають в експлуатації. Проте під час буріння таких свердловин значно ускладнюються умови роботи бурильної колони. При цьому виникають напруження в її елементах, які нерідко перевищують границю

плинності. Важливе значення для забезпечення безаварійної роботи бурильної колони, яка працює в умовах втомного та корозійно-втомного руйнування, відіграє інформація про закономірності зародження та розвитку тріщин. У зв'язку з цим важливого значення набувають експериментальні методи досліджень для накопичення дослідних даних про поведінку тріщин в експлуатаційних умовах. Це дозволить при описі закономірностей розвитку втомного чи корозійно-втомного руйнування охарактеризувати вплив багаточисленних експлуатаційних, технологічних і конструкційних чинників, що не враховуються аналітичними методами розрахунку. У ряді випадків критерії лінійної і нелінійної механіки руйнування дають можливість із деякою точністю визначити швидкість розвитку тріщини, оцінити здатність матеріалу чинити опір подальшому її розвитку і прогнозувати довговічність пошкодженої конструкції.

Проте, результати аналітичних підходів до дослідження кінетики поширення втомних тріщин не дають вичерпних відповідей на багато важливих для практики запитань, оскільки ці підходи завжди базуються на спрощеннях моделях, які всебічно не описують складний процес втомного руйнування матеріалів.

Накопичення втомних пошкоджень в елементах бурильної колони під час її експлуатації призводить зрештою до їх руйнування. В такому випадку для прогнозування довговічності елементів бурильної колони необхідно знати закономірності розвитку та поширення тріщин залежно від послідовності циклів навантажування з різними амплітудними значеннями та врахування впливу асиметричних навантажень [1].

Аналіз вітчизняних досліджень і публікацій

На сьогодні в роботах [2] розглянуто проблему визначення ресурсу елементів бурильної колони від дії знакозмінних циклів напружень згину, обумовлених як викривленням стовбура свердловини, так і втратою стійкості колони. При цьому знакозмінні цикли напружень спричиняють корозію втому. Проте, з практики експлуатації бурильної колони відомо, що вона часто працює в умовах значного перевантаження внаслідок її прихоплення, порушення технології спуско-підіймальних операцій тощо. Іноді сумарне напруження від дії перевантажень сягає значень границі плинності і, навіть границі міцності матеріалів елементів бурильної колони. Такі навантаження здебільшого є причиною їх втомного руйнування [3]. Тому визначення втомної міцності елементів бурильної колони при нестационарному режимі навантаження із урахуванням блокових навантажень є однією з головних умов забезпечення їх надійності.

Проблемою підсумовування накопичень втомних пошкоджень займалося багато дослідників [4–8], якими висунуто лінійні та нелінійні теорії накопичення пошкоджень. Так, авторами [4] отримані результати, які підтверджують, що у випадку двоступеневого навантажування при

переході з низького до високого рівня навантажування тріщина розвивається зі швидкістю, що відповідає діаграмі втомного руйнування, яка отримана при регулярному навантажуванні, а при переході від високого рівня до низького відбувається затримка поширення тріщини на деяке число циклів або її зупинка. Проте, як свідчать експериментальні дослідження, такі теорії не завжди з достатньою точністю описують процес накопичення пошкодження. В основному це пов'язано із тим, що вони не враховують навантажуваність, вплив корозійного середовища, ступінь зміцнення чи знеміцнення матеріалу, що виникає під час випадкового перенавантажування, тощо.

Дослідженням взаємовпливу різних режимів навантажування на швидкість поширення втомної тріщини присвячено роботи авторів [7–12]. Часто спостерігається як сповільнення, так і пришвидшення поширення втомних тріщин після переходу з високого рівня навантажування до низького. Така відмінність результатів пояснюється різною послідовністю циклів перевантажування та величиною інтервалів між їх прикладаннями.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у експериментальному дослідженні впливу розтягуючого асиметричного навантаження на процес розвитку втомних тріщин у матеріалі бурильних труб.

Завдання роботи:

1 Провести аналіз існуючих методик дослідження поширення втомних тріщин.

2 Розробити нову методику проведення експериментальних досліджень поширення втомних тріщин.

3 Провести експериментальні дослідження згідно розробленої методики:

– оцінити вплив асиметрії розтягу при дії змінного коефіцієнту асиметрії навантаження;

– оцінити вплив асиметрії розтягу при дії блокового навантаження.

4 Проаналізувати отримані результати.

Викладення основного матеріалу

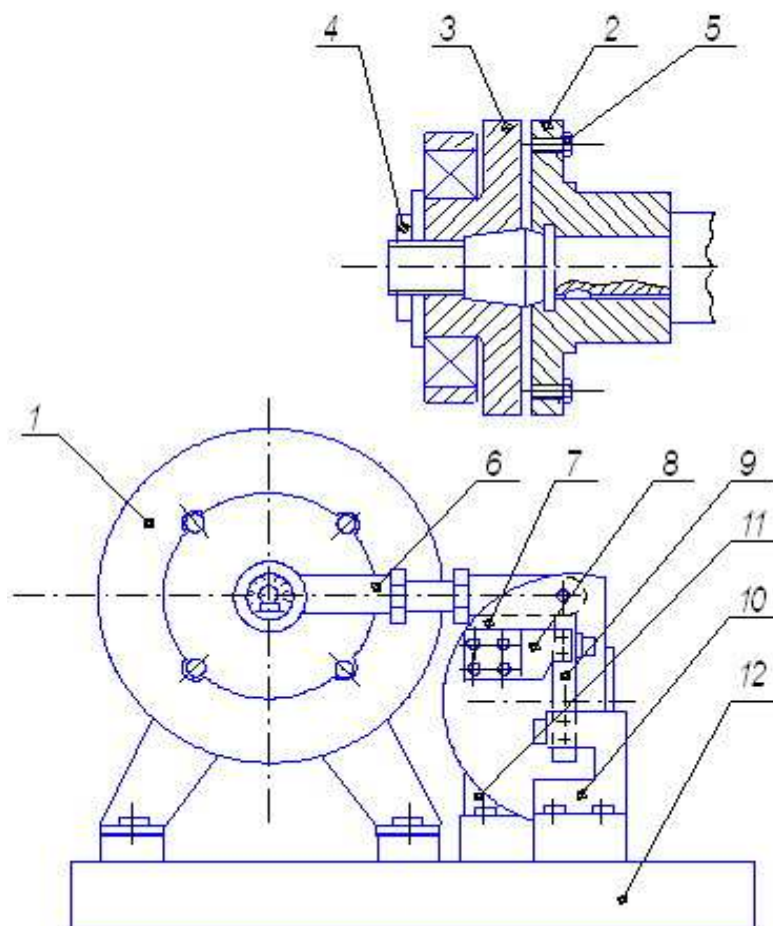
Для виявлення закономірностей поширення втомних тріщин було використано установку УДПТ-1 (рис. 1).

Спостереження за поширенням тріщини відбувалось за допомогою мікроскопа МПБ-2 (×24), розміщеного на стійці. Заміри проводили кожних 2800–3000 циклів.

Зразки для досліджень є вирізані з бурильної труби діаметром 120 мм і товщиною стінки близько 9 мм. Після цього проводилась їх механічна обробка на фрезерному та шліфувальному верстатах до необхідних розмірів (рис. 2). Для створення регламентованих втомних тріщин на зразки алмазним кругом наносили односторонні V-подібні концентратори напружень глибиною 1 мм з кутом при вершині 60° і радіусом у його вершині не більше 0,1 мм. Боківу поверхню зразків уділянці майбутньої площини поширення тріщини полірували.



а)



б)

1 – двигун; 2 – кривошип; 3 – втулка; 4 – гайка; 5 – болт; 6 – шатун; 7, 11 – планшайби;
8, 10 – рухомий та нерухомий тримачі; 9 – зразок; 12 – плита.

Рисунок 1 – Загальний вигляд (а) і схема (б) установки УДПТ-1 [29]

Для визначення механічних властивостей досліджуваних зразків проводили їх випробування на розтяг-стискання.

Дослідження проводилися двома етапами, на першому етапі зразки піддавалися впливу навантажень із амплітудою 0,9 мм та асиметри-

єю розтягу $R=0;0,2;0,3,0,4$ мм для обох матеріалів зразків.

Результати випробування зразків наведені на графічних залежностях (рис. 3) глибини втомної тріщини від кількості циклів напруцювань.

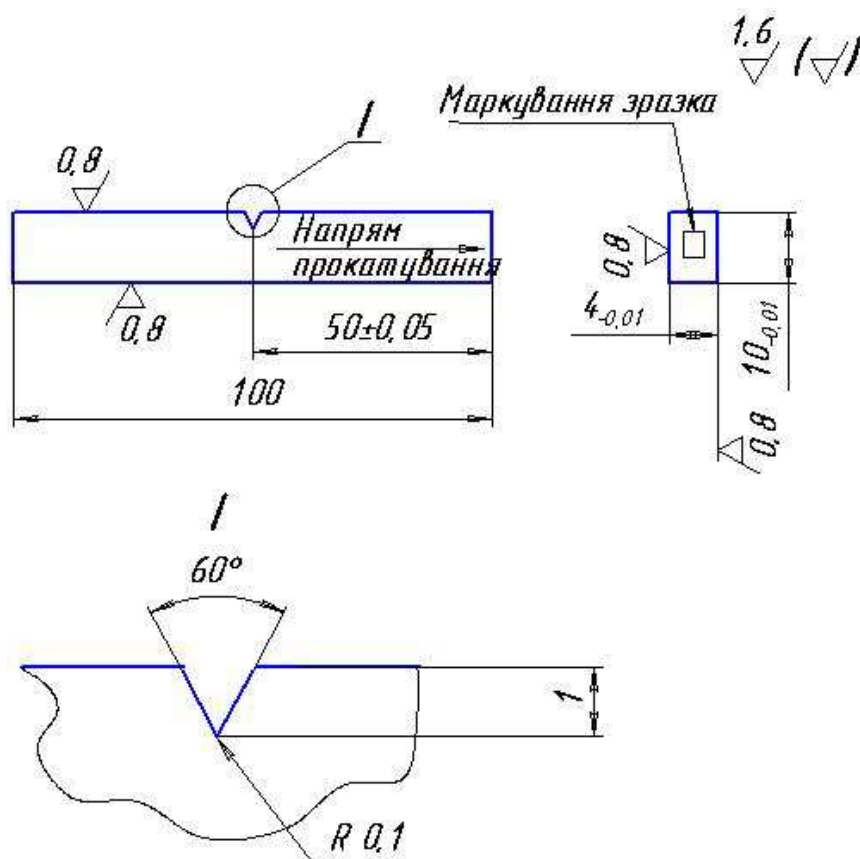


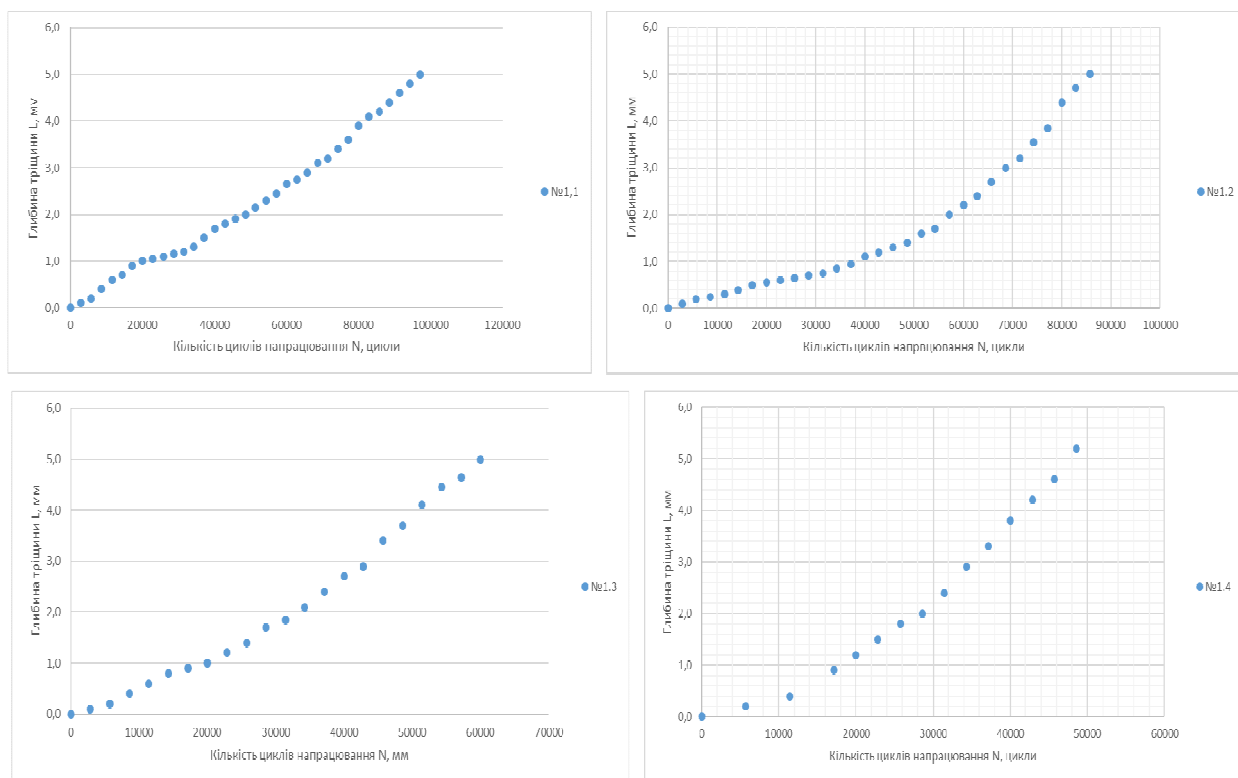
Рисунок 2 – Ескіз експериментального зразка

Таблиця 1 – Механічні характеристики сталі 40ХН

Марка сталі	Взірець №	Межа плинності	Межа міцності	Відносне залишкове видовження, %	Відносне залишкове звуження, %
		МПа			
Сталь 40ХН	1	686	794	11	51
	2	676	774	13	55
	3	666	755	14	52
	4	647	745	14	52
	5	666	745	11	44
	6	657	745	14	51

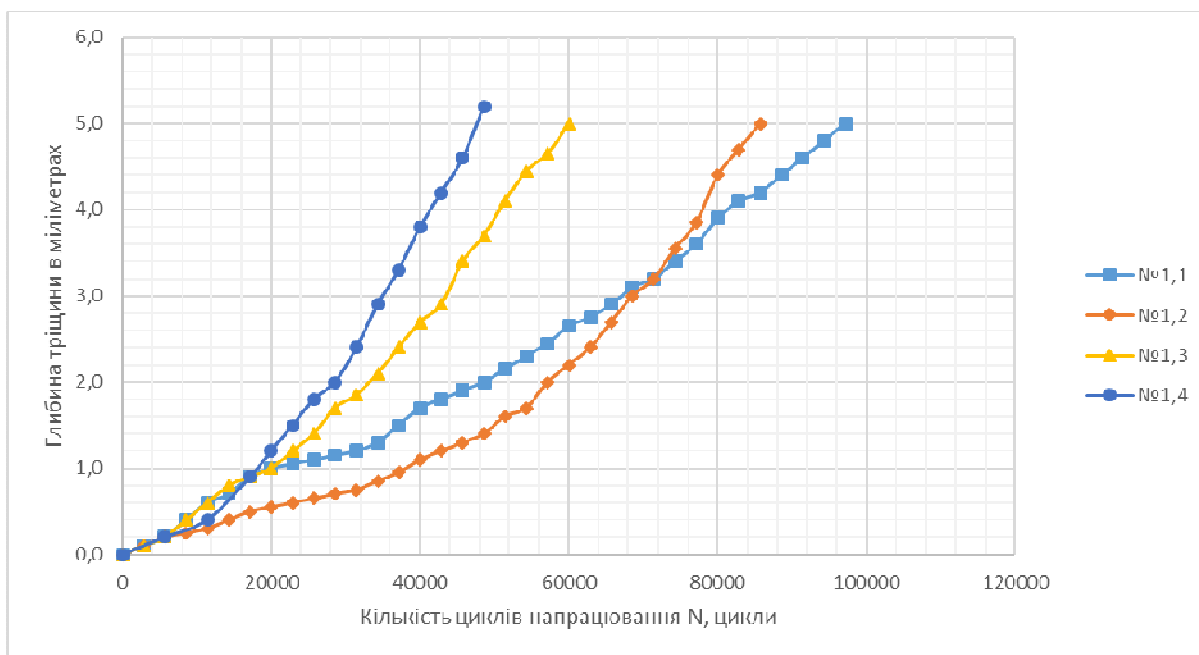
Таблиця 2 – Механічні характеристики сталі G105

Марка сталі	Взірець №	Межа плинності	Межа міцності	Відносне залишкове видовження, %	Відносне залишкове звуження, %
		МПа			
Сталь G105	1	735	862	12	46
	2	686	862	11	48
	3	735	853	12	48
	4	657	833	11	50
	5	725	853	11	45
	6	686	843	11	44



1.1 – $a=0,9$ мм, $R=0$; 1.2 – $a=0,9$ мм, $R=0,2$; 1.3 – $a=0,9$ мм, $R=0,3$; 1.4 – $a=0,9$ мм, $R=0,4$

Рисунок 3 – Залежності глибини втомної тріщини від кількості циклів напруження для сталі G105

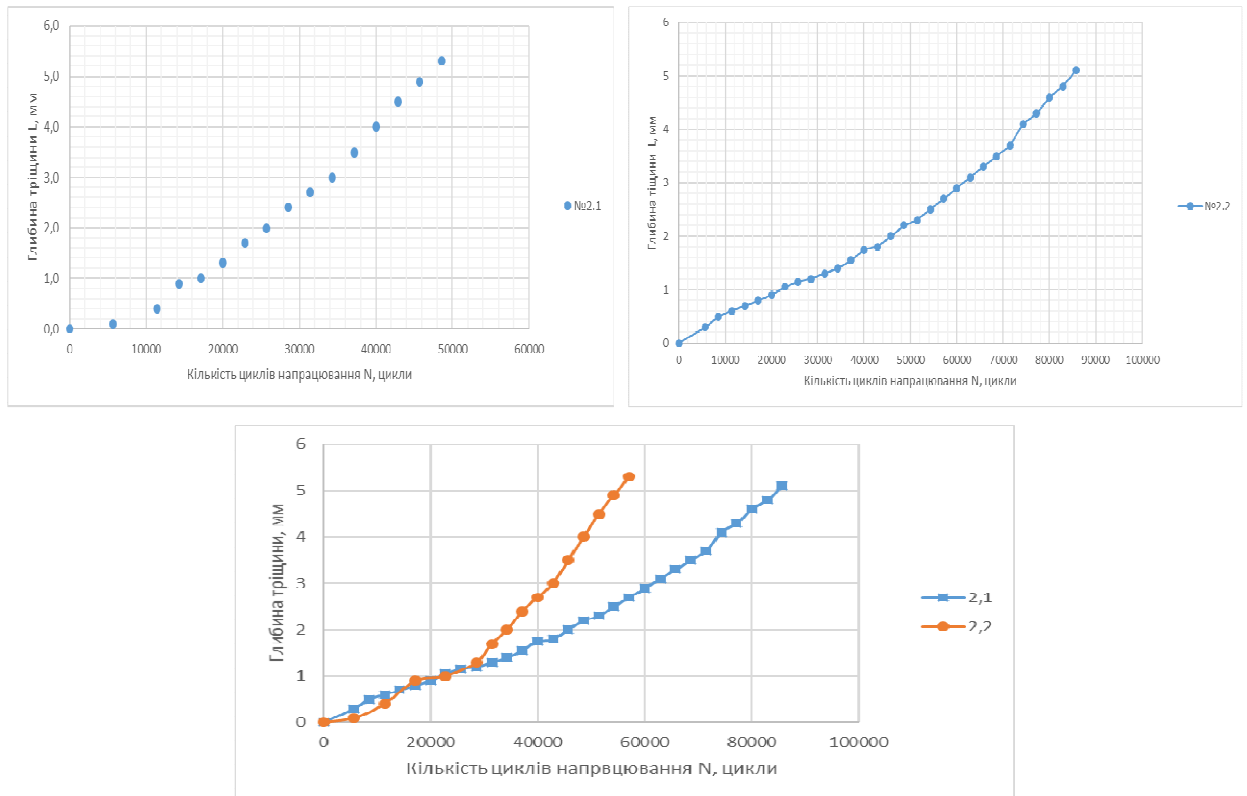


1.1 – $a=0,9$ мм, $R=0$; 1.2 - $a=0,9$ мм, $R=0,2$; 1.3 - $a=0,9$ мм, $R=0,3$; 1.4 - $a=0,9$ мм, $R=0,4$

Рисунок 4 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруження для сталі G105

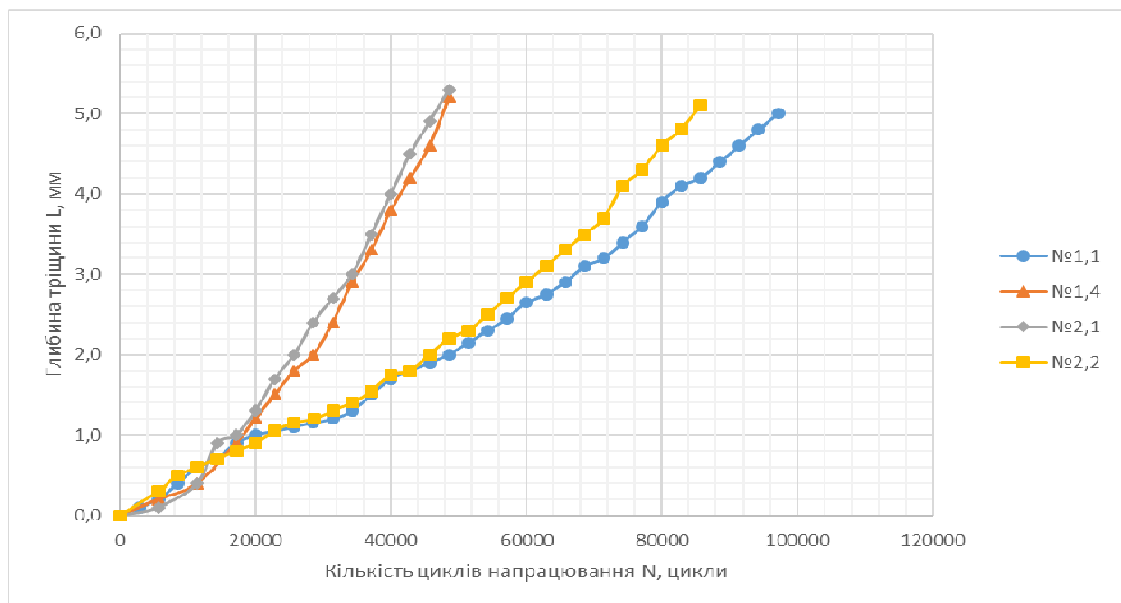
Для більш точного порівняння на рис .4 наведено залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напружень при дії асиметрії розтягу.

Із наведеної залежності можна зробити висновок, що із збільшенням асиметрії розтягу пришвидшується поширення тріщини та відповідно зменшується кількість циклів напруження до руйнування.



2.1 – $a=0,9$ мм, $R=0$; 2.2 – $a=0,9$ мм, $R=0,4$

Рисунок 5 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруження для сталі 40XH



1.1 – $a=0,9$ мм, $R=0$ сталь G105; 1.4 – $a=0,9$ мм, $R=0,4$ сталь G105;
2.1 – $a=0,9$ мм, $R=0,4$ сталь 40XH; 2.2 – $a=0,9$ мм, $R=0$ сталь 40XH

Рисунок 6 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруження для сталі G105 та 40XH

Аналогічні результати отримані для сталі 40XH (рис. 5).

На рис. 6. наведено залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруження для сталі 40XH та G105.

Згідно з рис. 6 поширення тріщини за однакових режимів навантаження для обох сталей є досить подібний.

На другому етапі досліджень визначено вплив блокового навантаження із однаковою

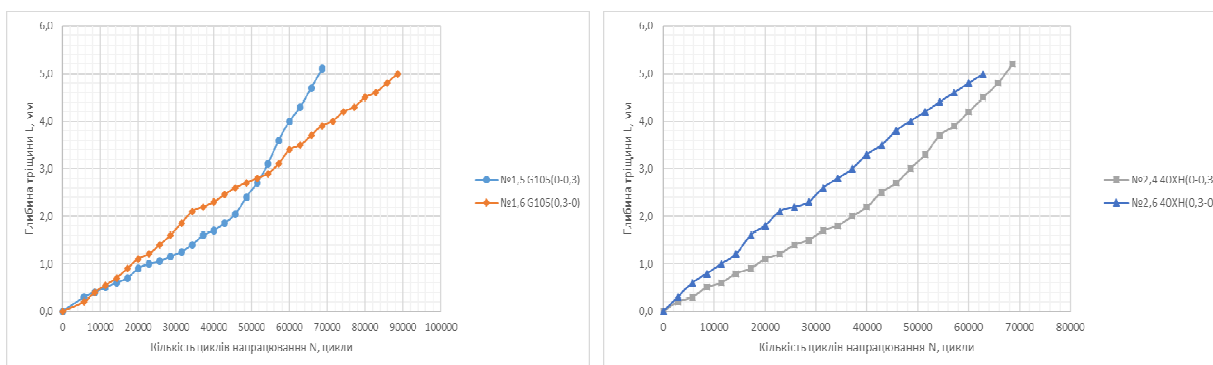


Рисунок 7 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруцювання для сталі G105 та 40XH із різною програмою блокового навантаження

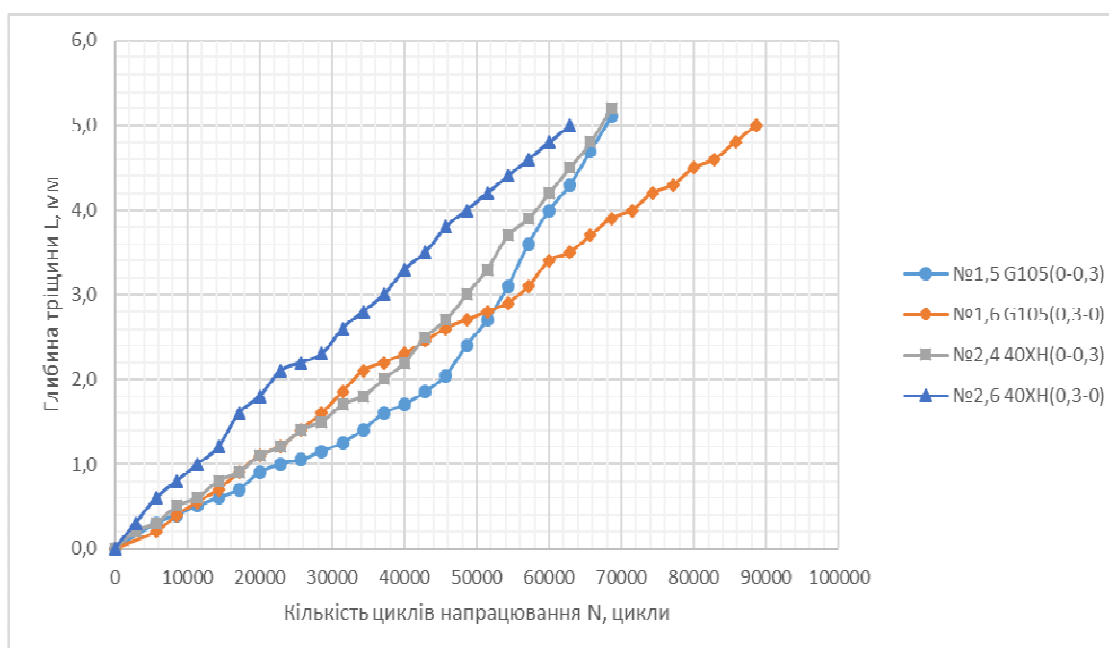


Рисунок 8 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруцювання для сталі 40XH та G105 із різною програмою блокового навантаження

амплітудою та різною розтягуючою асиметрією навантаження. Тріщину вирощували до 2мм спочатку без асиметрії із амплітудою 0,9, а потім продовжували із асиметрією 0,3 до 5мм і навпаки для обох досліджуваних матеріалів.

Зону графічних залежностей (рис. 9), виділену прямокутником у збільшеному виді, зображено на рис.10.

Отже з графічних залежностей спостерігається явний вплив зміни розтягуючої асиметрії навантаження на поширення втомних тріщин.

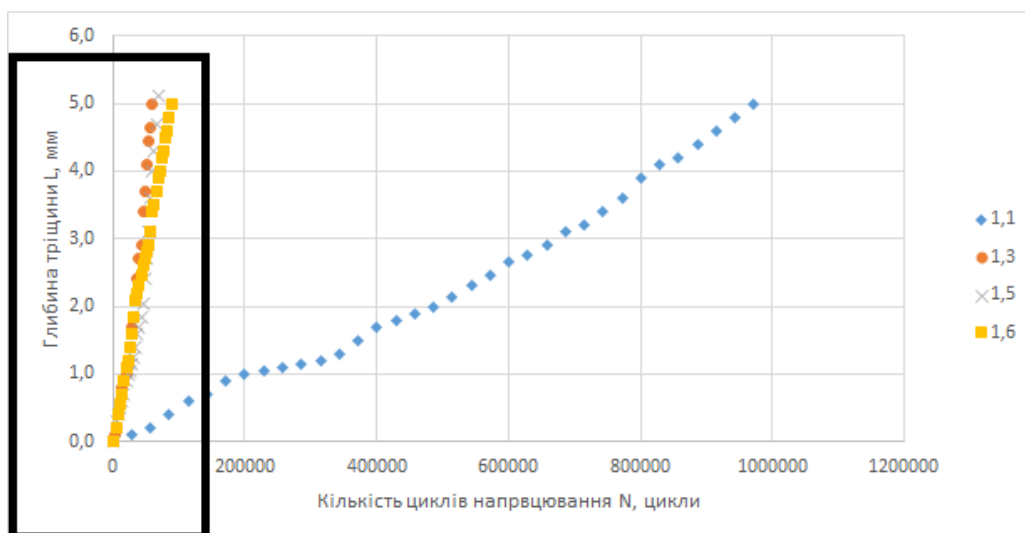
Висновки

За допомогою запропонованої методики проведено експериментальні дослідження швидкості поширення тріщин у матеріалі при дії розтягуючої асиметрії навантажень та в умовах блокового навантаження. Встановлено вплив розтягуючої асиметрії навантаження на швидкість поширення тріщини. Визначено кількість циклів до руйнування для сталі G105 при амплітуді 0,9 мм та коефіцієнті асиметрії

$R=0$ кількість циклів до руйнування становить 97172, при $R=0,2$ – $N=85740$ цикли, при $R=0,3$ – $N=60018$ цикли, при $R=0,4$ відповідно $N=48586$. Для сталі 40XH при амплітуді 0,9 мм та коефіцієнті асиметрії $R=0$ кількість циклів до руйнування становить 85741, при $R=0,4$ – $N=48586$. Із вище наведеного випливає висновок, що із збільшенням асиметрії кількість циклів до руйнування зменшується.

Встановлено, що у випадку двоступеневого навантажування при переході з низького до високого рівня навантажування тріщина розвивається зі збільшеною швидкістю, порівняно із регулярним навантаженням, а при переході від високого рівня до низького відбувається затримка зростання тріщини на деяке число циклів.

Також важливим стає встановлення залежності швидкостей росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень, залежності миттєвих швидкостей від глибини тріщини та уточнення впливу коефіцієнта асиметрії на довговічність бурильних труб.



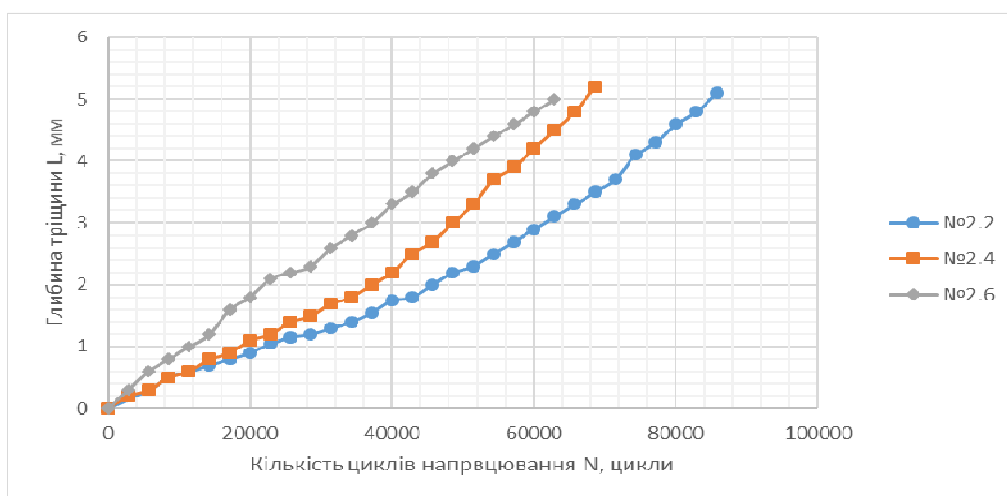
1.1 – $a=0,9$ мм, $R=0$; 1.3 - $a=0,9$ мм, $R=0,3$; 1.5 – $a=0,9$ мм, $R=0-0,3$; 1.6 - $a=0,9$ мм, $R=0,3-0$

Рисунок 9 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруцювання для сталі G105 при регулярному і блоковому навантаженнях



1.3 - $a=0,9$ мм, $R=0,3$; 1.5 – $a=0,9$ мм, $R=0-0,3$; 1.6 - $a=0,9$ мм, $R=0,3-0$

Рисунок 10 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруцювання для сталі G105 при регулярному і блоковому навантаженнях



2.2 - $a=0,9$ мм, $R=0$; 2.4 - $a=0,9$ мм, $R=0-0,3$; 2.6 - $a=0,9$ мм, $R=0,3-0$.

Рисунок 11 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напруцювання для сталі 40XH при регулярному і блоковому навантаженнях

Література

1 Ясній П. В. Оцінка мінімальної швидкості росту втомної тріщини після комбінованих перевантажень розтягом-стиском в алюмінієвому сплаві Д16Т / П. В. Ясній, Ю. І. Пиндус, В. Фостик // Вісник ДТУ. – 2009. – Том 14. – № 2. – С. 7-13. – механіка та матеріалознавство.

2 Івасів В.М. Методи та засоби управління бурильною колоною для забезпечення її надійності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.05.12 / В.М. Івасів. – Івано-Франківськ, 1999. – 31с.

3 Симонянц Л.Е. Влияние режима нагружения на усталостную прочность бурильных труб / Л.Е. Симонянц, К.И. Джафаров, И.И. Андрианов // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1985. – №3, С. 51 – 54, 57.

4 Трощенко В. Т. Усталость и неупругость металлов / В. Т. Трощенко. – Киев: Наукова думка, 1971. – 268 с.

5 Почтенный Е. К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложения / Е. К. Почтенный. – Минск: Наука и техника, 1973. – 213 с.

6 Крижанівський Є. І. Аналіз методів прогнозування ресурсу бурильних труб та їх з'єднань / Є. І. Крижанівський, Б. В. Копей // Розвідка та розробка нафтових і газових свердловин. – 1996. – Вип. 33. – С. 3-30.

7 Артим В. І. Підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти і газу: дис. докт. техн. наук: 05.05.12 / Артим Володимир Іванович. – Івано-Франківськ, 2010. – 281 с.

8 Гриців В. В. Удосконалення методів прогнозування ресурсу елементів бурильної колоны: дис. канд. техн. наук 05.05.12 / Гриців Василь Васильович. – Івано-Франківськ, 2013. – 124 с.

9 Пиндус Ю. І. Прогнозування швидкості росту втомних тріщин після одноразового перевантажування в алюмінієвих сплавах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 01.02.04 "Механіка деформівного твердого тіла" / Пиндус Юрій Іванович; Тернопільський держ. технічний ун-т ім. Івана Пулюя. – Тернопіль. – 2002. – 19 с.

10 Shin C. S. On the mechanisms and behavior of overload retardation in AISI 304 stainless steel / C. S. Shin, S. H. Hsu // Int. J. Fatigue. – 1993. – Vol. 15. – P. 181-192.

11 Blom A. F. Overload retardation during fatigue crack propagation in steels of different strengths / A. F. Blom // Scand. J. Metall. – 1989. – Vol. 18. – P. 197-202.

12 Івасів В. М. Дослідження кінетики втомного пошкодження матеріалу бурильних труб в умовах блокового навантажування / В. М. Івасів, Я. Т. Федорович, В. І. Артим, В. В.Гладун, П. В. Пушкар // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2003. – № 1. – С. 39-43.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
20.03.18*

*Рекомендована до друку
професором **Івасівим В.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Онищуком С.Ю.**
(ПП «Група БРАСС», м. Івано-Франківськ)*