УДК 620.178.3

# ОЦІНКА ВПЛИВУ ПЕРЕВАНТАЖУВАННЯ НА КІНЕТИКУ ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ЗРАЗКІВ ІЗ СТАЛІ 40ХН

***В.М. Івасів, В.І. Артим, І.І. Яциняк, В.В. Гриців***

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (0342) 717967;*
*e-mail: iy2008@online.ua*

*Проведено оцінку впливу рівня перевантажування на зміну швидкості росту втомних тріщин (РВТ) у зразках, що моделюють довговічність впадини замкового різьбового з'єднання З-42. Досліджено закономірності росту втомної тріщини після перевантажування для сталі 40ХН. Встановлено, що при перевантажуванні амплітудою 1,5 мм зона затримки РВТ має три характерні ділянки: початкового пришвидшення РВТ, стрімкого сповільнення та її стабілізації. Відсутня ділянка початкового пришвидшення РВТ для амплітуди перевантаження 2,5 мм. При цьому спостерігається ділянка відносно постійної мінімальної швидкості РВТ та зона стабілізації швидкості РВТ. При перевантаженні амплітудою 3 мм спостерігаються ділянки сповільнення швидкості РВТ та її стабілізації. Збільшення рівня перевантажування призводить до зростання кількості циклів затримки РВТ.*

*Досліджено вплив параметра перевантажування Q від коефіцієнта С. Встановлено, що зі збільшенням рівня перевантажування коефіцієнт С зменшується за лінійною залежністю.*

Ключові слова: бурильна колона, втомна тріщина, рівень перевантажування.

*Проведена оценка влияния уровня перегрузки на изменение скорости роста усталостных трещин (РУТ) в образцах, моделирующих долговечность впадины замкового резьбового соединения З-42. Исследованы закономерности роста усталостной трещины после перегрузки для стали 40ХН. Установлено, что при перегрузке амплитудой 1,5 мм зона задержки РУТ имеет три характерных участка: начального ускорения РУТ, стремительного замедления и ее стабилизации. Отсутствует участок начального ускорения РУТ для амплитуды перегрузки 2,5 мм. При этом наблюдается участок относительно постоянной минимальной скорости РУТ и зона стабилизации скорости РУТ. При перегрузке амплитудой 3 мм наблюдаются участки замедления скорости РУТ и ее стабилизации. Увеличение уровня перегрузки приводит к росту количества циклов задержки РУТ.*

*Исследовано влияние параметра перегрузки Q от коэффициента С. Установлено, что с увеличением перегрузки коэффициент С уменьшается по линейной зависимости.*

Ключевые слова: бурильная колонна, усталостная трещина, уровень перегрузки.

*An assessment of the impact of the overloading level to the change of the rate of speed of the growth fatigue cracks (GFC) has been held in the samples simulating durability of the hollow of the threaded connection 3-42. Regularities of the growth of the fatigue cracks after overloading for steel 40XH has been researched. When overloading with the amplitude 1,5 mm, the zone of the delay GFC has been established to have 3 characteristic areas: initial acceleration GFC, rapid deceleration and its stabilization. There is no area of the initial acceleration GFC for the amplitude overloading 2,5 mm. And an area of the relatively constant minimum speed of GFC and its stabilization zone has been observed. When overloading with an amplitude of 3 mm the deceleration rate of GFC and its stabilization has been observed. The increasing rate of overloading leads to the growth of the delay cycles GFC.*

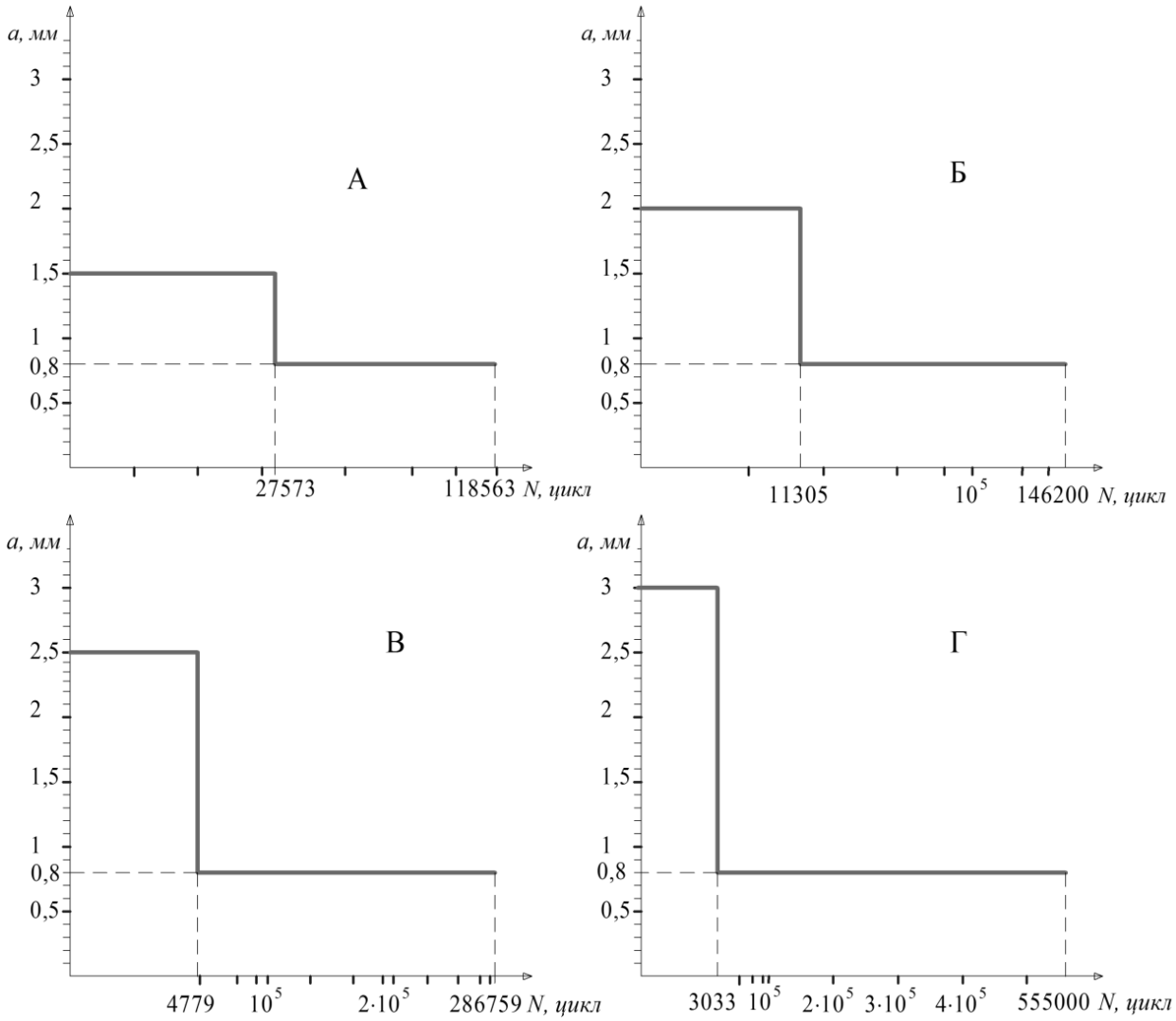
*The influence of the parameter of overloading Q from the coefficient C has been researched. With the increase in overloading the coefficient C decreases linearly has been established.*

Keywords: drill string, fatigue crack, the level of overloading.

**Постановка проблеми**. Одним із шляхів розвитку паливно-енергетичного комплексу України є спорудження глибоких, похилоскерованих та горизонтальних свердловин як на нових родовищах, так і на тих, що перебувають в експлуатації. Проте в процесі буріння таких свердловин значно ускладнюються умови роботи бурильної колони. При цьому виникають напруження в її елементах, які нерідко перевищують границю витривалості і, навіть, границю плинності їх матеріалу. У зв'язку з цим відбувається накопичення втомних пошкоджень (тріщини) в елементах бурильної колони, що в подальшому призводить 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 [1].

Відомо, що в процесі експлуатації бурильна колона піддається випадковому навантажуванню, яке після схематизації приводиться до закономірного, чи, у більш загальному випадку, до блокового. При цьому втомний ресурс визначають шляхом підсумовування пошкоджень від кожного ступеня блоку навантажування.

Проблемою підсумовування накопичень втомних пошкоджень займалося багато дослідників [2 – 12], якими висунуто лінійні та нелінійні теорії накопичення. Проте, як свідчить досвід експериментальних досліджень, такі теорії не завжди достатньо точно описують процес 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 та багато ін.



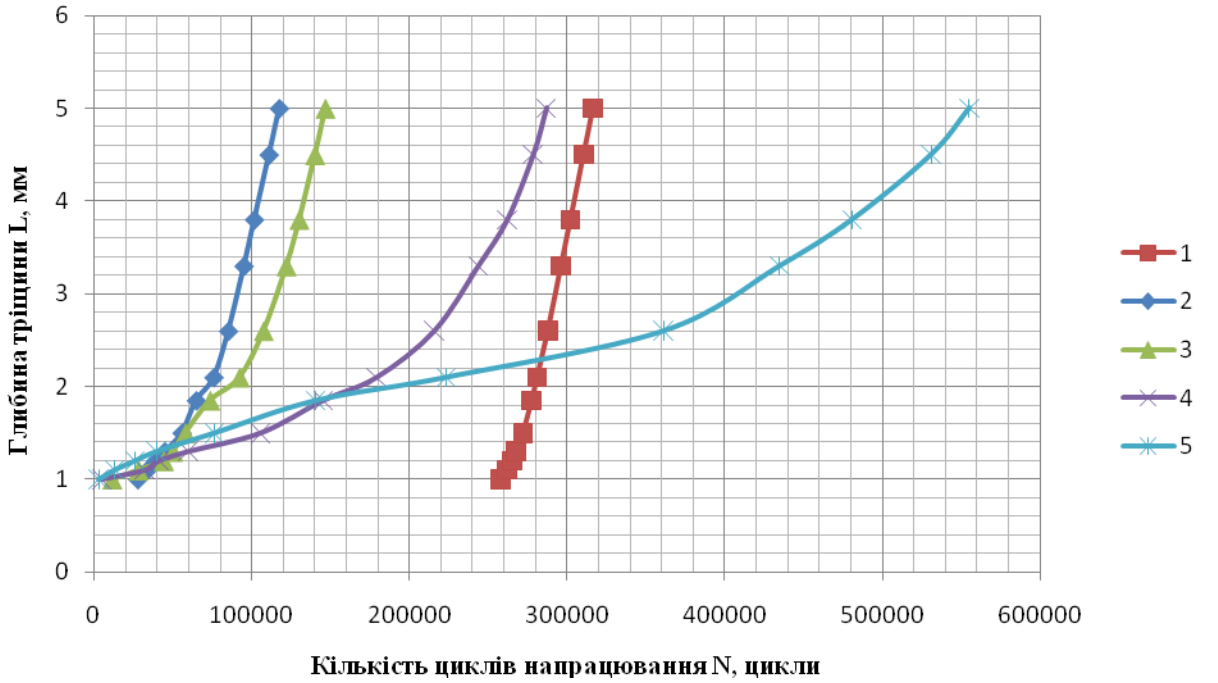

*А) 1,5 – 0,8; Б) 2 – 0,8; В) 2,5 – 0,8; Г) 3 – 0,8.*

**Рисунок 1 – Варіанти програмних навантажувань за різних амплітуд, мм**

Дослідженням взаємовпливу різних режимів навантажування на швидкість РВТ присвячено багато робіт [9, 11 – 21]. В них нерідко відмічається 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. У зв'язку із цим вирішено експериментально дослідити процес розвитку втомних тріщин в елементах бурильної колони за умов проходження ними ділянок з ускладненими умовами буріння. Для цього використали сталь 40ХН, з якої виготовляють бурильні труби, та дослідили її за різних рівнів перевантажування.

**Методика проведення експерименту.** Дослідження проведено на установці для поширення втомних тріщин (УДПТ-1) при циклічному ступеневому деформуванні зразків, вирізаних із висадженої частини бурильних труб (сталь 40ХН). Випробовування здійснено за жорсткої схеми навантажування і амплітуди *а = 0,8 – 3 мм*. Форма навантажування – плоский згин. Частота навантажування складала *24,2 Гц*. Коефіцієнт асиметрії циклу *R = 0*. На боковій поверхні зразка виточено кільцевий концентратор напруження, який згідно з методикою [22] моделює довговічність замкового різьбового з'єднання З-42 при плоскому згині. Для кращого спостереження за РВТ бокова поверхня зразка в місці поширення тріщини полірувалась до дзеркальної поверхні. Спостереження за РВТ, а також вимірювання її розмірів проводили за допомогою мікроскопа БМП-2 (×24). Значення амплітуди контролювали за допомогою мікрометра.

Випробовування зразків на втомну міцність здійснено за програмами навантажування, наведеними на рисунку 1 (А; Б; В; Г). Для цього вирощували тріщину довжиною *l = 1 мм* за різних амплітуд перевантажування (*а = 1,5; 2; 2,5; 3 мм*). В подальшому продовжували спостерігати за РВТ за мінімальної амплітуди ($a_{мін}$ *= 0,8 мм*). Критичною глибиною тріщини $l_{кр}$ вважали *5 мм*, оскільки подальше напрацювання призводило до руйнування зразків. Слід відзначити, що для кожної програми навантажування випробувано серію із 5 зразків. За ре-




*1 – a=const = 0,8 мм; 2 – (рис.1, А); 3 – (рис.1, Б); 4 – (рис.1, В); 5 – (рис.1, Г).*

**Рисунок 2 – Залежність глибини втомної тріщини від кількості циклів напрацювання після перевантажування**

зультатами експериментів визначено усереднені їх показники, які в подальшому використані під час досліджень.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** На рисунку 2 подано результати випробовування зразків за вищенаведеними програмами навантажування. Як бачимо, збільшення амплітуди перевантажування призводить до затримки РВТ, що вказує на процес зміцнення зони поширення тріщини.

Для більш детальної оцінки процесу затримки РВТ проведено порівняльний аналіз результатів миттєвих швидкостей залежно від глибини тріщини після перевантажування (рис. 3).

Отримані результати свідчать, що при постійній низькій амплітуді $a_{мін}$=*const=0,8 мм* ($a_{мін}$ – амплітуда навантажування, при якому в зразку виникають номінальні напруження, близькі до границі витривалості його матеріалу, *мм*), швидкість РВТ рівномірно зростає до певного моменту (*2,4 мм)*, після якого не змінюється (рис. 3, а).

Після перевантажування амплітудою *a = 1,5 мм* (рис. 1, А) виявлено наявність зони затримки РВТ (рис. 3, б), яку умовно можна поділити на три ділянки: початкового пришвидшення РВТ (*1–1,6 мм*), стрімкого сповільнення (*1,6–2 мм*) та ділянки її стабілізації (*2–2,5 мм*). Дане перевантажування призвело до утворення зони затримки РВТ *Δl = 1,5 мм* з кількістю циклів близько *N = 60 тис циклів.*

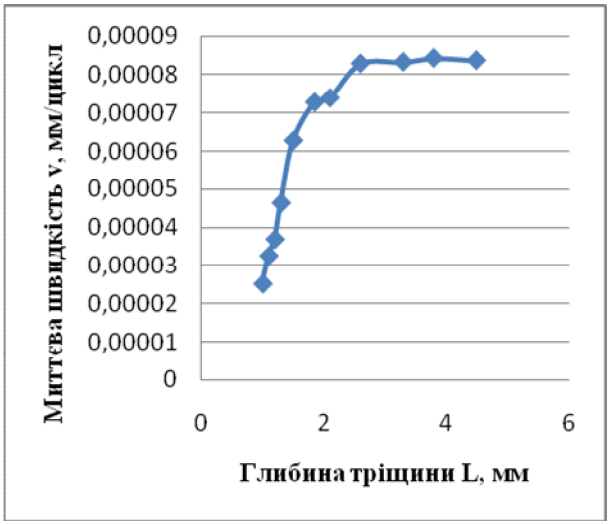
Згідно з дослідженнями [1] за перевантажування з коефіцієнтом, близьким $Q = a_{пр} / a_{мін} = 2{,}5$ ($a_{пр}$ – амплітуда перевантажування, *мм*) ділянка початкового пришвидшення РВТ відсутня. В нашому випадку бачимо (рис. 3, в), що дане перевантажування зумовлює початкове пришвидшення РВТ (*1–1,4 мм*). Крім цього, зона стабілізації швидкості РВТ значно збільшилась (*2–4,5 мм*). Зона затримки РВТ за даного рівня перевантажування становить близько *Δl = 3,5 мм* з кількість циклів *N = 130 тис. циклів*.

При коефіцієнті перевантажування *Q = 3,125* (рис. 3, г) зона пришвидшення РВТ практично відсутня. Спостерігається ділянка відносно постійної мінімальної швидкості РВТ (*1–2 мм*) та зона стабілізації швидкості РВТ (*2–5 мм*). Як бачимо, дане перевантажування значно впливає на швидкість поширення втомної тріщини, уповільнюючи її. Кількість циклів затримки РВТ склала близько *N=280 тис. циклів*, що практично відповідає довговічності зразка за постійної мінімальної амплітуди *0,8 мм*.

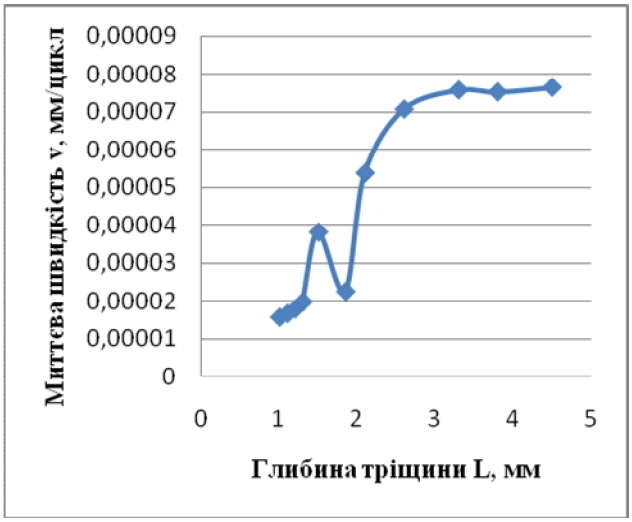
Максимальне перевантажування амплітудою $a_{пр}$=*3 мм* (рис. 3, д), при якому проводилися дослідження, підтвердило відсутність зони пришвидшення РВТ. В даному випадку можна виділити дві характерні зони: сповільнення росту тріщини (*1–2 мм*) та стабілізації швидкості РВТ (*2–5 мм*). Перевантажування такого рівня призводить до значного сповільнення росту тріщини по всій її довжині. Загальна кількість циклів затримки РВТ склала близько *N = 550 тис. циклів*.

Згідно з [16] швидкість росту тріщини можна визначити за рівнянням Періса і Ердогана:

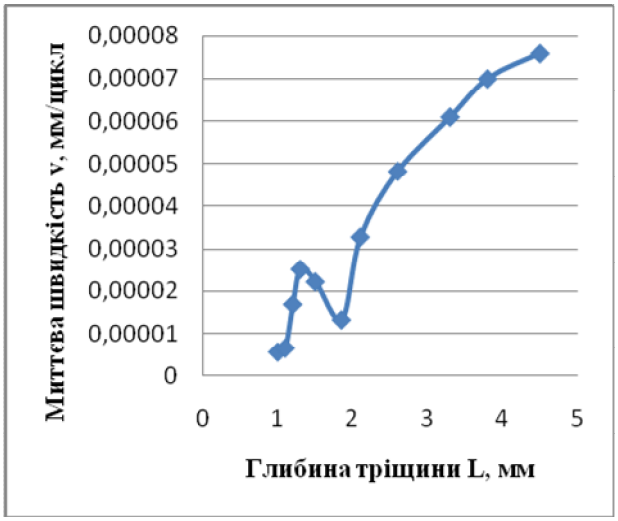
$$V = \frac{dl}{dn} = C \cdot \Delta K^m, \qquad (1)$$



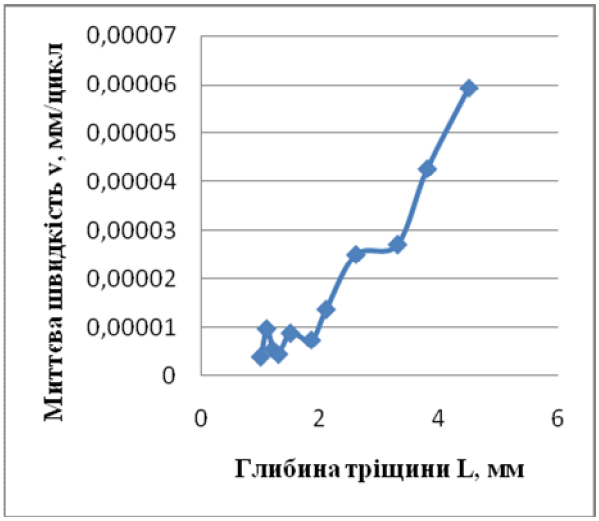

а)




б)




в)




г)

д)

*а) $a_{мін}$=const = 0,8 мм; б) (рис.1, А); в) (рис.1, Б); г) (рис.1, В); д) (рис.1, Г)*

**Рисунок 3 – Залежність миттєвої швидкості від глибини втомної тріщини після перевантажування**

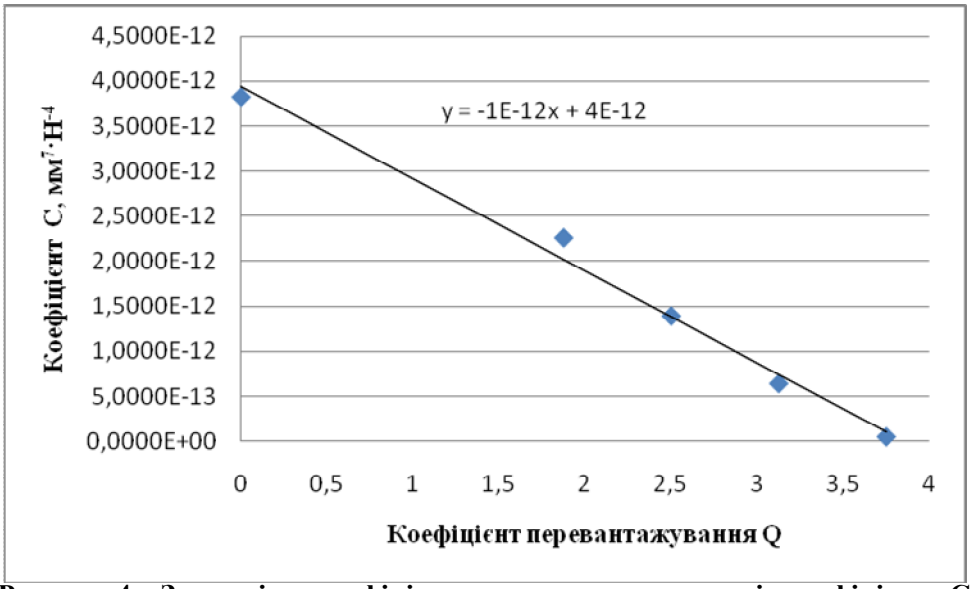



**Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта перевантажування від коефіцієнта С**

де $C = 10^{-10} \ldots 10^{-12}$ мм$^7$/Н$^{-4}$ і $m \approx 4$ – коефіцієнти, яких, зазвичай, набувають вуглецеві сталі за незначних напружень;

$\Delta K = (K_{max} - K_{min})$ – різниця максимального і мінімального коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) циклу.

Швидкість поширення тріщини в даному випадку залежить від розмаху КІН ($\Delta K$) та від коефіцієнтів $C$ та $m$. В роботі [21] зазначено, що розмах коефіцієнта інтенсивності напружень для даної схеми навантажування залежить від матеріалу, кута згину чи амплітуди деформацій та відношення довжини зразка і тріщини до ширини зразка. Отже, для однакових зразків при рівних довжинах тріщини та амплітудах деформації розмах коефіцієнта інтенсивності напружень матиме однакове значення.

Розглянемо вплив коефіцієнта перевантажування від коефіцієнта С при сталому показнику степеня $m = 4$. При цьому середня швидкість росту тріщини після перевантажування згином для кожного з варіантів навантажування (рис. 1) відповідно становить: $0{,}518 \cdot 10^{-7}$, $0{,}319 \cdot 10^{-7}$, $0{,}147 \cdot 10^{-7}$ та $0{,}111 \cdot 10^{-7}$ *м/цикл*. При рівномірному навантажуванні ($a_{мін} = 0{,}8$ *мм*) – $0{,}877 \cdot 10^{-7}$ *м/цикл*.

Максимальний КІН визначено за формулою [23]:

$$K_{I\,i} = \frac{1{,}3\mu\varphi_i X_0^{3/2}}{Y_0}, \qquad (2)$$

де $\mu$ – модуль зсуву;

$X_0$ – половина ширини експериментального зразка, *м*;

$Y_0$ – половина відстані між захватами експериментальної установки, *м*;

$\varphi$ – кут повороту навантажувальних ланок випробувальної машини, *рад*.

Отже, залежність між коефіцієнтом $Q$ та $C$ можна апроксимувати прямою лінією, рівняння якої матиме вигляд:

$$C = 4 \cdot 10^{-12} - Q \cdot 10^{-12}. \qquad (3)$$

Таким чином, отримана закономірність дає підстави вказати на таке ж зменшення коефіцієнта $C$ після перевантажувань і в натурних деталях та більш точно прогнозувати залишковий ресурс елементів конструкцій, виготовлених із сталі 40ХН.

## Висновки

Досліджено закономірності росту втомної тріщини після перевантажування для сталі 40ХН. Встановлено, що при перевантажуванні амплітудою $a = 1{,}5 – 2{,}0$ *мм* присутня зона затримки РВТ, яку умовно можна поділити на три характерні ділянки: початкового пришвидшення РВТ, стрімкого сповільнення швидкості та ділянки її стабілізації.

Після перевантажування амплітудою $a = 2{,}5$ зона пришвидшення РВТ практично відсутня. Спостерігається ділянка відносно постійної мінімальної швидкості РВТ та зона її стабілізації. Кількість циклів затримки РВТ склала близько $N$=280 *тис. циклів*, що практично відповідає довговічності зразка за постійної мінімальної амплітуди *0,8 мм*.

Перевантажування амплітудою $a = 3$ *мм* підтвердило відсутність зони пришвидшення РВТ. В даному випадку можна виділити дві характерні зони: сповільнення росту тріщини та стабілізації швидкості РВТ. Перевантажування такого рівня призводить до значного сповільнення росту тріщини по всій її довжині. Загальна кількість циклів затримки РВТ склала близько $N = 550$ *тис. циклів*.

Досліджено вплив параметра перевантажування $Q$ від коефіцієнта $C$ за сталого показника степеня $m = 4$. Встановлено, що із збільшенням перевантажування коефіцієнт $C$ зменшується за лінійною залежністю.

*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 Олейник Н. В. Выносливость деталей машин / Н. В. Олейник. – К.: Техника, 1979. – 200 с.

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

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

5 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 родовищ. – 1996. – Вип. 33. – С. 3-30.

6 Крыжановский Е. И. Исследование усталостной прочности замковых резьбовых соединений бурильных труб: дисс. канд. техн. наук: 05.04.07 "Машины и агрегаты нефтяной и газовой промышленности" / Крыжановский Евстахий Иванович. – Москва, 1980. – 171 с.

7 Koutnik M., Kudrman J. Vliv predchozi stridave opakovane plasticke deformace na rozvoj dislokacni struktury a lomovy relief po namahani v oblasti vyskocyclove unavy / M. Koutnik, J. Kudrman // Vyzkumna zprava SVUM Praha, Z-78-3983. Praha, 1978. - S. 41 – 76.

8 Дунин-Барковский И. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть) / И. В. Дунин-Барковский, Н. В. Смирнов. – М.: Гостехиздат, 1955. – 356 с.

9 Івасів В. М. Порівняльна оцінка втомної міцності різьбових з'єднань бурильних труб / В. М. Івасів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 1996. – Вип. 33. – С. 58-59.

10 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб.; під заг. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / під ред. В.І. Похмурського, Є.І. Крижанівського. – Львів – Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.

11 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.

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

13 Ясній П. В. Вплив одноразового перевантажування на ріст втомної тріщини в сплаві Д16Т / П. В. Ясній, Ю. І. Пиндус // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 2. – С. 57-60.

14 Емельянов О. В. Влияние перегрузок на скорость роста усталостных трещин / О. В. Емельянов, М. П. Пелипенко // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 35 (13). – С. – 21-24. – (строительство и архитектура).

15 Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

16 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.

17 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.

18 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.

19 Смирнова Л. Л. Влияние малоцикловых перегрузок на усталость конструкционных материалов / Л. Л. Смирнова, Р. Ф. Меренкова, Л. И. Романов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1979. – №4. – С. 34–37.

20 Прохоров А. Г. Влияние перегрузок напряжений на долговечность конструктивного элемента / А. Г. Прохоров, А. С. Мостовой, С. Н. Перов // Проблемы прочности. – 1982. – № 4. – С. 64–70.

21 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.

22 Калахан О. С. Визначення відносного градієнту напружень методом скінченно-елементного аналізу / О. С. Калахан, В. М. Івасів, І. І. Яциняк, В. В. Гриців // Вісник Львівського нац. аграрного університету: агроінженерні дослідження. – Львів: Львів. нац. Агроуніверситет. – 2013 – №17. – С. 241–249.

23 Рачкевич Р. В. Прогнозування довговічності бурильної колони в ускладнених умовах буріння свердловини: дис. канд. техн. наук: 05.05.12 / Рачкевич Руслан Володимирович. – Івано-Франківськ. – 2006. – 145 с.

*Стаття надійшла до редколегії 01.10.14*
*Рекомендована до друку професором* ***Петриною Ю.Д.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Стащуком М.Г.*** *(відділ фізичних основ руйнування та міцності матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів)*