

УДК 639.43

Д.Ю. Петрина, С.Д. Вуйцік
ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, Україна
Тел. (066) 2288604, E-mail: mtf@nung.edu.ua

ВПЛИВ НАКЛЕПУ РОЗТЯГОМ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Досліджено загартовану та відпущену сталь 40XH на статичну та циклічну тріщиностійкість. Встановлено, що попередня пластична деформація зразків на 2% несуттєво знижує короточасну тріщиностійкість сталі, проте відчутно уповільнює ріст втомної тріщини на припороговій ділянці циклічного навантаження. Виявлений позитивний ефект, зумовлений зростанням вкладу закриття втомної тріщини.

Ключові слова: *в'язкість руйнування, механічні властивості, попереднє пластичне деформування, довговічність, циклічна тріщиностійкість.*

Вступ. Проблема забезпечення надійної експлуатації бурильної колони залишається на даний час актуальною, оскільки показники надійності суттєво залежать не лише від конструкції і технології виготовлення елементів колони, але й від діючих навантажень [1]. Рівень навантажень, що діють на елементи бурильної колони у свердловині визначається станом стовбура свердловини, величиною його викривлення, режимом буріння, властивостями пробурюваних порід тощо. Здійснення прогностичної оцінки довговічності бурильної колони безпосередньо пов'язане з визначенням кількісних характеристик експлуатаційного навантаження [2].

Аналіз аварій, пов'язаних з руйнуванням бурильних колон, які зареєстровані на виробничому об'єднанні "Укрнафта" [3], показує, що переважна більшість з них зумовлена втомним руйнуванням на ділянках трубної різьби, замкового різьбового з'єднання бурильних труб, ніпельної частини бурильних замків.

Експертні висновки про причини аварій свідчать, що досить часто руйнування відбуваються в результаті незначної кількості циклів навантаження труб за умов високих напружень, які виникають під час операцій нарощування їхньої довжини, звільнення від прихватів, опускання та піднімання [4]. Розрахунок бурильних колон здійснюють за границею витривалості гладких зразків при симетричному циклі навантаження або натурних труб при згині з крученням з низькою амплітудою навантаження. Проте, труби верхньої частини бурильної колони навантажені, в основному, одноісним розтягом з віднульовим циклом. Враховуючи наявність конструктивно передбачених концентраторів напружень, слід брати до уваги можливі разові перевантаження [5], які можуть призвести до пластичної деформації матеріалу на локальних ділянках елементів бурильної колони, наприклад, різьбових з'єднань. Внаслідок цього, в таких місцях можуть виникнути тріщини, здатні до субкритичного підростання, що відіб'ється на здатності колони витримувати навантаження, а відповідно, і на її довговічності. Звідси зрозуміло, наскільки важливим є врахування впливу попереднього пластичного деформування на тріщиностійкість сталей бурильних колон як за статичного, так і циклічного навантаження. Разом з тим у літературі немає однозначної думки щодо впливу цього чинника на опір росту тріщин у конструкційних сталях. Після холодної деформації їхня тріщиностійкість може зменшуватись, збільшуватись або залишатись незмінною порівняно з її значенням для сталі в недеформованому стані [6].

Тому в даній роботі поставлена задача — дослідити вплив попереднього пластичного деформування розтягом на короткочасну та циклічну тріщиностійкість термообробленої сталі 40ХН, яка використовується на Дрогобицькому долотному заводі для виготовлення замків бурильних колон.

Основний зміст і результати роботи. Після гартування сталь проходила двогодинний відпуск за 763К, що відповідає заводському технологічному процесу. При цьому досягалися наступні характеристики: границя плинності $\sigma_{0,2} = 1050$ МПа, відносне звуження $\psi = 41$ %. Після термічної обробки та кінцевого шліфування частину зразків пластично деформували розтягом до $\varepsilon = 2\%$, а недеформовані зразки використовували для порівняння.

В експерименті додатково визначали закриття тріщини. Відзначимо, що появу цього ефекту зв'язують із залишковою пластичністю, неспівпаданням впадин і виступів на спряжених поверхнях в циклі навантаження, автокаталітичним нарощуванням товщини оксидних плівок, завдяки яким береги тріщини поблизу її вершини впродовж певної частини циклу навантаження не розкриваються [7, 8].

Проведені дослідження показали, що випробування сталі у вихідному стані на короткочасну тріщиностійкість виявили особливість форми діаграм $P - \delta$ (рис. 1).

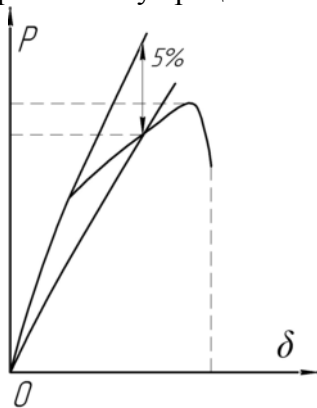


Рис. 1. Схематичне зображення діаграми $P - \delta$ для визначення критичного значення P_Q

Ім властиве відхилення від лінійності з досягненням екстремальної сили на зразку, яка після цього відчутно знижується за незначної деформації. Лише після цього відбувається спонтанне руйнування зразка. Такий тип діаграми може свідчити про інтенсивне докритичне підростання тріщини під час навантаження. Цей висновок підтвердили результати візуального аналізу зламів, на яких у внутрішніх (за товщиною зразків) шарах відразу за фронтом втомної тріщини детермінували специфічну трикутну за формою зону субкритичного підростання тріщини. Аналіз кривих навантаження зразків свідчить, що критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_c , визначений за силою P_Q (сила в точці перетину діаграми з 5%-ною січною), не відповідає вимогам щодо реалізації плоскодеформованого стану, і за цією причиною його не можна вважати характеристикою матеріалу згідно з вимогами [9]. Звертає на себе увагу та особливість, що величина P_Q є іншою від максимального навантаження P_{\max} . Це означає, що визначення K_{Ic} для цієї сталі на зразках вибраної геометрії і з використанням прийнятої схеми навантаження без запису діаграми $P - \delta$, а лише за величиною сили P_{\max} , дало б завищені значення статичної тріщиностійкості K_c .

Попереднє пластичне деформування якісно не змінило вигляду діаграми $P - \delta$. Що ж стосується конкретних значень K_c визначених для кожного з досліджених варіантів як середнє арифметичне значення за результатами 5-ти випробувань, то можна відзначити незначне зниження короткочасної тріщиностійкості зразків, які попередньо пластично деформували розтягом до $\varepsilon = 2\%$. Так, середнє значення K_c , визначене на зразках у вихідному стані, становило $114 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а на попередньо деформованих зразках - $98 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Результати випробувань на циклічну тріщиностійкість подано на

рис. 2. Встановлено, що для діапазону високих значень $\Delta K = 20 - 25 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ попереднє оброблювання пластичним деформуванням практично не впливає на циклічну тріщиностійкість сталі. Із зниженням рівня циклічного навантаження стає відчутним позитивний ефект обробки матеріалу. Він збільшується зі зменшенням ΔK і максимально проявляється на припороговій ділянці навантаження.

Так, пороговий рівень розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} зростає від $4,9 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для сталі у вихідному стані до $7,3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для пластичнодеформованих зразків.

Оцінка закриття втомної тріщини дозволила побудувати ефективні діаграми $dl/dN - \Delta K_{eff}$. У результаті

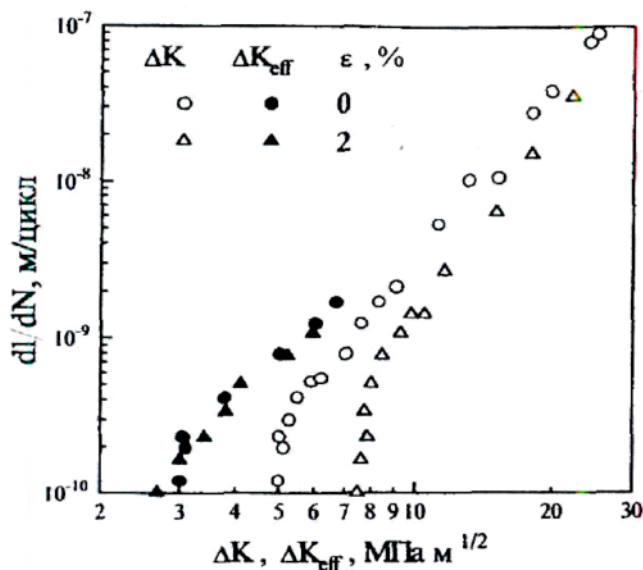


Рис. 2. Кінетичні діаграми втомного руйнування $dl/dN - \Delta K$ (світлі символи) та $dl/dN - \Delta K_{eff}$ (темні символи), побудовані для сталі 40ХН у вихідному стані (\bullet , \circ) та після її попереднього пластичного деформування (Δ , \triangle)

побудови ефективних кінетичних діаграм втомного руйнування матеріалів розглядається вплив пластичної деформації на втомне руйнування сталей. Разом з тим, слід підкреслити, що накладання кінетичних діаграм втомного руйнування для досліджених варіантів сталі, побудованих з урахуванням закриття тріщини, ще не свідчить однозначно про відповідальність за цей феномен залишкових напружень, наведених у матеріалі в процесі попередньої пластичної деформації. Звичайно, наявність залишкових напружень безпосередньо впливає на величину закриття тріщини і, відповідно, на кінетику втомного росту тріщини. Проте в нашому випадку має місце сумарний вплив залишкових напружень і деформаційного зміцнення. А той експериментальний факт, що зміна закриття тріщини визначає вплив обробки сталі на її циклічну тріщиностійкість, свідчить лише про те, що закриття тріщини зумовлене ще й впливом деформаційного зміцнення. При цьому найвідчутніший вплив попереднього пластичного деформування саме в припороговій області навантаження, коли, як відомо, максимально проявляється роль залишкових напружень, також не може служити однозначним аргу-

не виявлено різниці за кінетикою втомного росту тріщини стосовно ефективного розмаху ΔK_{eff} для двох досліджених варіантів сталі (рис. 2)..

Порогове значення ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень $\Delta K_{th,eff}$ знаходиться на рівні $3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, що відповідає діапазону $2...4 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, властивому більшості конструкційних сталей [10]. Крім того, можна зробити висновок про відповідальність закриття тріщини за позитивний ефект попереднього пластичного деформування на циклічну тріщиностійкість сталі. Він узгоджується з аналізом [6], в якому також з позицій закриття втомних тріщин та

ментом на користь такого висновку, оскільки закриття тріщини, незалежно від його природи і механізму реалізації, теж максимальне при низьких рівнях навантаження. На користь такого пояснення можна також навести дані [11] про вплив термічної обробки сталі 40ХН на її циклічну тріщиностійкість. Підвищення температури відпуску загартованої сталі від 470К до 920К різко змінює опір втомному росту тріщини, в першу чергу на припороговій ділянці навантаження (ΔK_{th} зростає від 3,2 МПа·м^{1/2} до 5,2 МПа·м^{1/2}). Разом з тим, трансформація структури внаслідок термообробки відчутно вплинула лише на циклічну в'язкість руйнування K_{fc} і несуттєво змінила хід кінетичних діаграм $dl/dN - \Delta K_{eff}$ на середній ділянці навантаження, залишивши практично незмінним ефективний поріг $\Delta K_{th,eff}$. Це означає, що і в цьому випадку саме закриття тріщини визначає зміну циклічної тріщиностійкості сталі внаслідок трансформації мікроструктури від мартенситу до перліту.

Таким чином, попереднє пластичне деформування термічно зміцненої сталі 40ХН несуттєво знижує її статичну тріщиностійкість, проте суттєво підвищує опір втомному росту тріщини при низьких припорогових рівнях циклічного навантаження. Цей вплив зумовлений виключно зміною закриття втомної тріщини. З прикладної точки зору отриманий результат дозволяє прогнозувати додаткове зниження (за рахунок зменшення короткочасної тріщиностійкості металу) утримувальної здатності ніпелів з тріщиноподібними дефектами, якщо вони знаходяться в матеріалі, який внаслідок одноразового перевантаження вже вичерпав певну частину запасу пластичності. Що ж стосується отриманого позитивного ефекту попереднього пластичного деформування на втомний ріст тріщин з низькими припороговими швидкостями, то слід рахуватися з тим, що він зумовлений саме закриттям тріщини. Адже спостережувані в практиці експлуатації руйнування ніпелів на ділянці різьбового з'єднання свідчать, що лише тріщини невеликої довжини (так звані короткі тріщини [11]) розповсюджуються з низькою припороговою швидкістю. Характерною ознакою їхнього поширення є відсутність закриття тріщини навіть за припорогових рівнів розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень та низької асиметрії циклічного навантаження. А це означає, що виявлений позитивний вплив попереднього пластичного деформування металу у вершині концентратора на швидкість росту таких коротких тріщин може і не проявитися.

Висновки. Встановлено, що попередня пластична деформація термічно зміцненої сталі 40ХН в незначній мірі знижує її статичну тріщиностійкість. Найвідчутніший вплив її полягає в суттєвому підвищенні опору втомному росту тріщини за низьких припорогових рівнів циклічного навантаження. Цей вплив зумовлений виключно зміною закриття втомної тріщини.

Крім того, враховуючи реальні умови експлуатації нафтовидобувного обладнання, слід також рахуватися з можливим негативним впливом агресивних середовищ, зокрема з наводнюванням матеріалу. В цьому випадку вплив попереднього пластичного деформування може мати свої особливості, що вимагає спеціального дослідження, яке буде проведене в подальшому.

Перелік літератури:

1. Методи визначення експлуатаційних навантажень на елементи бурильної колони / [М.В. Лисканич, А.П. Джус, П.І. Огородніков та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2002. - № 1. – С. 28 – 29.

2. Івасів В.М. Удосконалена методика прогнозування залишкового ресурсу деталей у типових умовах експлуатації / В.М. Івасів, В.І. Артим, П.В. Пушкар // *Машинознавство*. – 2005. - № 10. – С. 43 – 46.
3. Щербюк Д.Н. Эксплуатация буровых труб и разрушение резьбовых соединений / Д.Н. Щербюк, Ю.И. Газанчан, А.И. Барышников. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – Вып. 12. – 57 с.
4. Артим В.І. Оцінка навантаженості бурової колони під час спуско-піднімальних операцій / В.І. Артим // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2009. - № 4. – С. 26 -32.
5. Схематизація випадкового навантаження методом вкладених циклів / [Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів, В.І. Артим, В.М. Нікітюк] // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2002. – № 2. – С. 47 – 54.
6. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втомна і тріщинозривкість / П.В. Ясній. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
7. Ritchie R.O. Some considerations on fatigue crack closure at nearthreshold stress intensities due to fracture surface morphology / R.O. Ritchie, S. Suresh // *Metal. Trans.* – 1982. – 13A. – № 5. – P. 937-940.
8. Suresh S. Oxide – induced crack closure: an explanation for near threshold corrosion fatigue crack growth behavior / S. Suresh, G. Zamiski, R.O. Ritchie // *Metal. Trans.* – 1981. – 12A. – № 8. – P. 1435 -1443.
9. ГОСТ 25.506-85. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
10. Романив О.Н. Влияние закрытия и геометрии усталостных трещин на структурную чувствительность припороговой усталости сталей / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин, Б.Н. Андрусив // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1984. – № 1. – С. 71 - 77.
11. Романив О.Н. Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин, Б.Н. Андрусив // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1983. – № 3. – С. 47 - 61.

Надійшла до редакції 29.09.2012.

Д.Ю. Петрина, С.Д. Вуйцик
ВЛИЯНИЕ НАКЛЕПА РАСТЯЖЕНИ-
ЕМ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ БУ-
РИЛЬНОЙ КОЛОННЫ

Исследовано закалённую и отпущенную сталь 40ХН на статическую и циклическую трещиностойкость. Показано, что предварительная пластическая деформация образцов на 2% незначительно снижает кратковременную трещиностойкость стали, однако ощутимо замедляет рост усталостной трещины на припороговом участке циклического нагружения. Установлен положительный эффект, обусловленный возрастанием вклада закрытия усталостной трещины.

Ключевые слова: вязкость разрушения, механические свойства, предварительная пластическая деформация, долговечность, циклическая трещиностойкость.

D.Yu. Petryna, S.D. Vuytcik
INFLUENCE OF THE WORKHARDEN-
ING BY EXTENSION ON CRACK GROWTH RE-
SISTANCE OF STEEL OF DRILL PIPE STRING

Quenched and tempered 40KhN (0,4C-1Cr-1Ni) steel has been studied for the static and fatigue crack growth resistance. It has been shown that the 2% plastic predeformation of the specimens slightly decreases the fracture toughness of steel, but considerably inhibits fatigue crack growth in the pre-threshold region of cyclic loading. This positive effect is caused by increase of fatigue crack closure influence.

Key words: fracture toughness, mechanical properties, plastic predeformation, durability cyclic crack resistance.