

УДК 621.325:669.539.43

ОСОБЛИВОСТІ РОСТУ ВТОМНИХ ТРІЩИН У СТАЛІ 36Г2С БУРИЛЬНИХ ТРУБ ПІСЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Є. І. КРИЖАНІВСЬКИЙ¹, І. М. ГОЙСАН¹, О. З. СТУДЕНТ²

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено вплив повторної нормалізації експлуатованої сталі 36Г2С бурильних труб на її структуру, ріст втомних тріщин та фрактографічні особливості руйнування. Встановлено зниження швидкості росту тріщин та зникнення крихких елементів на зламах після усунення текстури феритних виділень та карбідів з меж зерен внаслідок повторного термічного оброблення сталі. Водночас на 5% всіх досліджених зразків не виявили позитивного впливу відновлювального термічного оброблення на швидкість росту втомної тріщини в експлуатованому металі, що свідчить про доцільність попереднього (перед термічним обробленням) контролю технічного стану металу за показниками, чутливими до розсіяної пошкодженості.

Ключові слова: експлуатована сталь, бурильні труби, структура, фрактографічні ознаки, швидкість росту втомних тріщин, розсіяна пошкодженість, високотемпературна фазова перекристалізація, продовження ресурсу.

Особливість експлуатаційної деградації конструкцій тривалої експлуатації проявляється у зниженні початкових фізико-механічних характеристик металу [1–5]. Це стосується і свердловинного обладнання нафто- та газовидобувного комплексу, зокрема бурильних колон, які працюють за впливу циклічних навантажень, тому здатність матеріалу чинити опір накопиченню втомних пошкоджень вважають однією з найважливіших властивостей. Досвід експлуатації бурильних труб свідчить, що їх вихід із ладу значною мірою спричинений ростом утомних тріщин [6], які зароджуються у місцях максимальної концентрації напружень, а час до їх виникнення становить 10...20% від загального ресурсу труб [7].

Згідно з чинними нормативними документами бурильні труби з дефектами глибиною 3...5 mm відбраковують [8]. Іноді через тріщини усі труби бурильної колони повністю замінюють. Дефектоскопією відбракованих, але не зламаних труб виявляють тріщини глибиною до 7 mm [9]. Макроаналіз зламів бурильних труб свідчить, що значна частина площі їх поперечного перерізу припадає на зону втомного підростання тріщини, а швидкість та характер її росту суттєво залежать від структури матеріалу.

Мета цього дослідження – виявити вплив повторної нормалізації попередньо експлуатованої сталі 36Г2С бурильних труб на швидкість росту та фрактографічні особливості втомного руйнування та обґрунтувати можливість підвищення довговічності експлуатованих бурильних труб.

Матеріали та методики. Зразки для втомних досліджень вирізали з експлуатованих бурильних труб ТБВ 140 (діаметром 140 mm) з висадженими всередину кінцями зі сталі 36Г2С (0,35% С; 1,5 Mn; 0,6 Si; 0,045 P; 0,045% S) групи міцності Л ($\sigma_B = 784$, $\sigma_{0,2} = 637$ МПа), які відпрацювали 30...45% свого ресурсу і відбракова-

ні за результатами дефектоскопії [10]. Використали балкові зразки осьової орієнтації (4×10×100 mm) з V-подібним (кут при вершині 60°) концентратором напружень глибиною 1 mm та радіусом у вершині 0,1 mm, або зі заздалегідь наведеними втомними тріщинами довжиною 1 або 2 mm. Їх бічні поверхні шліфували, а в зоні поширення тріщини полірували. Напрямок та площа поширення утомної тріщини в зразках відповідали спостереженням на трубах, пошкоджених в експлуатаційних умовах (колові тріщини в радіальному напрямі).

Зразки експлуатованої сталі повторно нормалізували від 850°C за витримування при тій же температурі 10 min та охолодження з піччю (9,5°C/min), забезпечуючи так високотемпературну фазову перекристалізацію матеріалу. Їх циклічно деформували консольним згином за жорсткої системи навантаження в пружно-пластичній області навантаження (початкове напруження в бруто-перерізі зразків 22,5 МПа) з частотою 24,2 Hz та асиметрією циклу 0,05. Підростання тріщини фіксували мікроскопом МБС 10 з точністю до 0,02 mm. Мікротвердість сталі заміряли мікротвердоміром ПМТ-3. Для металографічних та фрактографічних досліджень застосували сканівний електронний мікроскоп ZEISS EVO 40XVP.

Результати та їх обговорення. Металографічні дослідження. Як правило, на завершальному етапі виготовлення бурильні труби зі сталі 36Г2С нормалізують від температури 850°C. За зміни товщини стінки труб від 7 до 30 mm тривалість їх нагрівання в печах коливається від 70 до 140 min, а час витримування – від 10 до 25 min [11]. Внаслідок такого термічного оброблення в мікроструктурі експлуатованої сталі зазвичай переважає сорбітоподібний перліт з виділеннями фериту. Під час обстеження експлуатованого металу виявили стрічкоподібні виділення фериту та великі карбіди вздовж меж зерен (рис. 1а). Перші можуть свідчити про знижену температуру під час вальцювання труб на етапі їх виготовлення, або про порушення режиму їх охолодження під час нормалізації, а карбіди вважали наслідком експлуатаційної деградації сталі, оскільки після нормалізації їх не повинно було би бути на межах зерен.

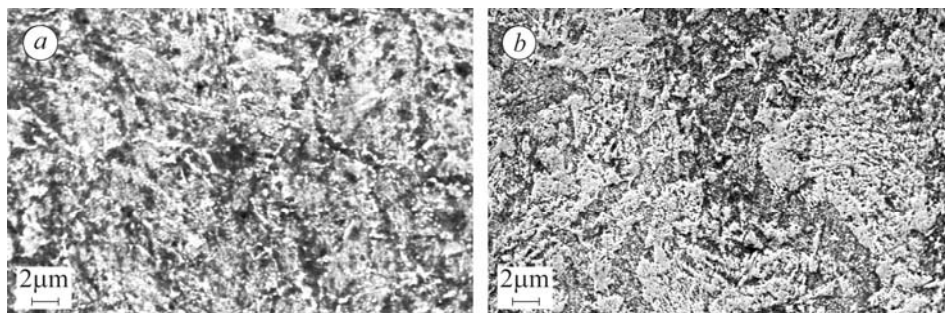


Рис. 1. Структура експлуатованої сталі 36Г2С бурильних труб без (а) та після (б) високотемпературної фазової перекристалізації; ×2500.

Fig. 1. Microstructure of the operated 36G2C steel of drilling pipes without (a) and after (b) high temperature phase recrystallization; ×2500.

Після повторної нормалізації експлуатованої сталі, внаслідок якої відбулася її високотемпературна фазова перекристалізація, в структурі переважали сорбітоподібний перліт з виділеннями фериту без явного його текстурування, зросли розміри зерен, а карбіди вздовж їх меж не ідентифікували (рис. 1б). Таку структуру повинна була б мати сталь після первинної нормалізації. І те, що на лабораторних зразках не виявили стрічковості розташування фериту, підтверджує важливість дотримання регламенту температурного режиму вальцювання, швидкості охолодження труб під час їх виготовлення та вхідного контролю структури сталі перед допуском до експлуатації.

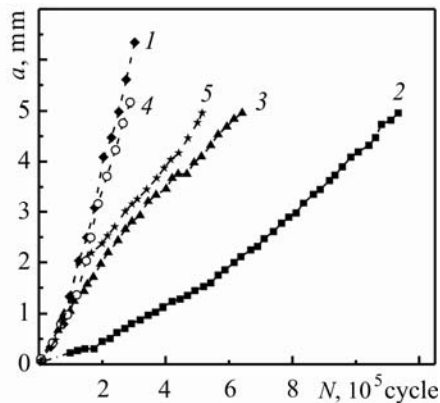


Рис. 2. Ріст утомних тріщин у зразках з концентратором (1, 2) та з попередньо наведеними втомними тріщинами довжиною 1 (3, 4) та 2 mm (5) експлуатованої сталі 36Г2С без (1) та після (2–5) повторної нормалізації.

Fig. 2. Fatigue crack growth in the specimens with stress concentrators (1, 2) and fatigue cracks of length 1 (3, 4) and 2 mm (5) of the operated 36Г2С steel without (1) and after re-normalization (2–5).

Результати механічних випроб.

Зміна структури сталі після повторної нормалізації вплинула на її механічні властивості. Зокрема, дещо знизилася мікротвердість (від ~ 2600 до ~ 2450 МПа) та підвищився опір втомному руйнуванню. Після повторної нормалізації швидкість росту тріщини в експлуатованій сталі знизилася до $5 \cdot 10^{-9}$ m/cycle проти $2,4 \cdot 10^{-8}$ m/cycle відразу після експлуатації (рис. 2, криві 2 і 1 відповідно). Зростання опору втомному руйнуванню пов'язали з меншою дефектністю металу після попередньої експлуатації та відновленням його пластичності. Такий ефект повторного термічного оброблення проявився у зразках і з надрізами (крива 2), і з тріщинами (криві 3, 5). За наявності заздалегідь наведених утомних тріщин позитивний ефект термічного оброблення дещо слабшає (швидкість росту тріщини завдовжки 1 mm у зразках з тріщиною знизилася до $7,1 \cdot 10^{-9}$ m/cycle, а довжиною 2 mm – до $1,1 \cdot 10^{-8}$ m/cycle), що пов'язали з невідповідністю напружено-деформованого стану в околі тріщин і концентраторів

та, відповідно, розмірів зон передруйнування в їх околі. Причому, що коротша тріщина у зразку, який підлягає повторному термічному обробленню, то сильніший його позитивний вплив на загальну довговічність зразків (криві 3, 5).

Водночас зафіксували нестабільність такої закономірності, бо на 5% випробуваних зразків з тріщинами не виявили позитивного впливу повторного термічного оброблення на швидкість їх росту (крива 4). Це пов'язали з різною мірою розсіяної пошкодженості і нерівномірністю її розподілу в експлуатованих трубах, з яких вирізали зразки. Отже, існує певна критична міра розсіяної пошкодженості, яку не усуває високотемпературна фазова перекристалізація.

Результати фрактографічної експертизи зламів. Виявили зростання рельєфності утомних макрозламів у термічно обробленій сталі на етапі зародження тріщини від вершини надрізу. Сильнішу рельєфність зламів зазвичай пов'язують з більшими енергозатратами на руйнування. Отже, після термічного оброблення енергозатрати на ріст утомної тріщини зросли, що узгоджується з результатами механічних випроб, за якими однакове підростання тріщини досягається в термічно обробленій сталі після більшої кількості циклів навантаження, ніж у необробленій (див. рис. 2, криві 1 і 2).

Зона зародження втомної тріщини від вершини надрізів зразків обох варіантів (експлуатованого і відновленого) виявилася пошкодженою внаслідок контактування берегів тріщини в циклі навантаження, спричиненого ефектом її закриття, що перешкоджало з'ясуванню особливостей механізму руйнування. Лише на віддалі 0,5...0,7 mm від вершини надрізу вже можна було спостерігати фрагменти утомних борозенок за збереження істотного наклепу гребенів між суміжними фестонами, які виступали над загалом плитким рельєфом.

За довжини тріщини понад ~ 3 mm кількість неушкоджених фрагментів зламів зростає і став можливим їх детальніший аналіз. Зафіксували велику кількість

вторинних тріщин в експлуатованій сталі (рис. 3а), які практично відсутні на зламах термічно обробленої. Крім того, після оброблення зростає фрагментованість зламу в'язкими елементами витягування внаслідок затримок просування тріщини.

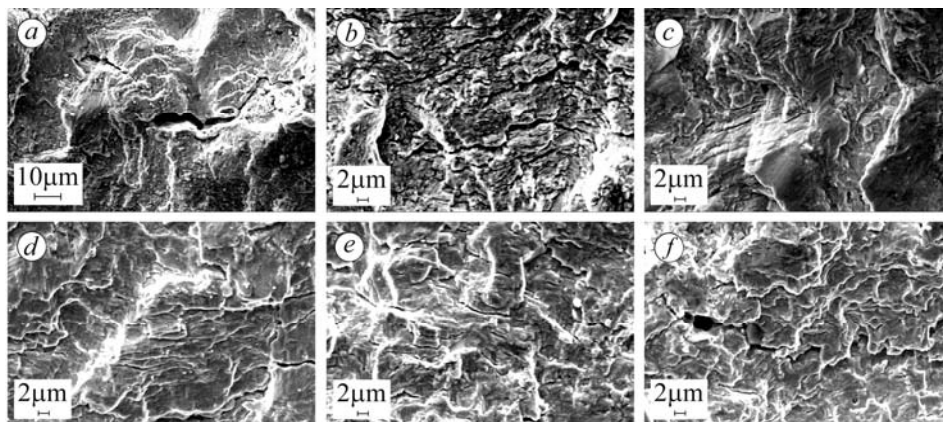


Рис. 3. Мікрофрактограми сталі 36Г2С після експлуатації (а, б) та подальшого рекристалізаційного термічного оброблення (с-ф) зразків з надрізом (а-с) та з утомними тріщинами довжиною 1 (d) та 2 мм (e, f) на віддалі ~3,0 мм від вершини концентратора.

Fig. 3. Microfractograms of 36Г2С steel after exploitation (a, b) and after following recrystallization thermal treatment (c-f) of the specimens with mechanical notch (a-c) and fatigue cracks of length 1 (d) and 2 mm (e, f) at the distance ~3.0 mm from the notch tip.

За вищої роздільної здатності в обох випадках рельєф формують утомні борозенки, орієнтовані перпендикулярно до напрямку росту тріщини. В необробленій сталі вони декоровані вторинними мікротріщинами і тому їх класифікували як крихкі (рис. 3b). Тоді як після оброблення вторинне розтріскування практично відсутнє і очевидна істотна пластична деформація металу під час формування борозенок (рис. 3c). Зі зростанням довжини тріщини в обох варіантах сталі всі описані особливості руйнування зберігаються, але зростають крок утомних борозенок і їх рельєфність, що є ознакою поступового підвищення швидкості росту тріщин. За підростання тріщини до 5 mm в необробленій сталі все ще домінує фестонна будова зламів з крихкими утомними борозенками, а в обробленій в'язкі борозенки практично вироджуються і на зламі переважають ділянки зі слідами значного пластичного деформування, перемежовані елементами квазівідколу. Ця особливість домінує в обох варіантах сталі, коли тріщина досягає критичного розміру, після чого зразки спонтанно руйнуються. Сліди контактування спряжених поверхонь зламів у вигляді вм'ятин та затирів уздовж меж розділу суміжних фестонів все ще залишаються характерними фрактографічними елементами утомного руйнування.

Як і в зразках з концентратором, на зламах термічно оброблених з утомними тріщинами (ними моделювали можливі тріщини в реальних бурильних трубах перед їх термічним обробленням) крихкі борозенки майже зникають, а натомість з'являються в'язкі (рис. 3c, d). Істотно зменшились кількість і розкриття вторинних тріщин, які декорують утомні борозенки, та суттєво підвищилась кількість в'язких елементів. На ділянках, де ще збереглися крихкі борозенки (рис. 3f), їх кількість, густина і розкриття вторинних мікротріщин, що декорують їх, істотно зменшились проти спостережених у необробленій сталі. Тому вважали, що дефекти в перерізі труб розподілені нерівномірно і за наявності в експлуатованих трубах тріщин не слід сподіватися на повне усунення їх впливу після рекристалізації. Це підтвердили результати досліджень 5% зразків з тріщинами, на яких по-

зитивний ефект термічного оброблення практично знівельовано. Зрозуміло, що за відсутності впливу термічного оброблення на швидкість росту втомної тріщини фрактографічні ознаки рельєфу практично повторювали спостережені на зразках без оброблення. Але попри це, на зламах траплялися також ділянки з в'язкими борозенками, яких не було на зламах необроблених зразків. Крім того, у цьому випадку зберігається велика кількість довгих і широко розкритих вторинних тріщин (рис. 3f). Можливо, ці тріщини виникли ще на етапі експлуатації труб і термічне оброблення не могло усунути їх. Тому припустили, що існує критичний рівень розпорошеної пошкодженості бурильних труб, за досягнення якої позитивний ефект термічного оброблення не досягається навіть за високотемпературної фазової перекристалізації сталі.

Отримані результати дають підстави рекомендувати рекристалізаційне оброблення труб як перспективний спосіб продовження їх ресурсу. Однак необхідний неруйнівний контроль стану металу, який давав би можливість відбракувати труби з критичним рівнем пошкоджень, які неможливо усунути термічним обробленням.

ВИСНОВКИ

У структурі експлуатованої сталі 36Г2С бурильних труб виявили сорбітоподібний перліт зі стрічковим розташуванням фериту та великими карбідами вздовж меж зерен. Внаслідок повторної нормалізації експлуатованої сталі зросли розміри зерен сорбітоподібного перліту, зникли текстування фериту та карбіди вздовж їх меж. Цим аргументували потребу вхідного контролю структури бурильних труб.

Швидкість росту тріщини у повторно нормалізованій після експлуатації сталі знизилася порівняно з визначеною відразу після її експлуатації (в ~4,5 рази у зразках з надрізом та в 3,4 і в 2,2 рази – у зразках з тріщиною довжиною 1 і 2 mm відповідно), що відкриває непогані перспективи повторного термічного оброблення, щоб відновити роботоздатність бурильних труб. На зразках з попередньо наведеними утомними тріщинами позитивний ефект повторного термічного оброблення дещо слабший, ніж на зразках з надрізами. Що коротша тріщина в зразку, то сильніший його позитивний вплив.

Повторна нормалізація експлуатованої сталі впливає на фрактографічні ознаки утомного руйнування: зникають елементи вторинного розтріскування, а квазікрихкий відрив з формуванням крихких утомних борозенок з гостро окресленими гребенями, декорованих вторинними тріщинами, змінюється на квазів'язкий з формуванням в'язких утомних борозенок, утворення яких супроводжується істотним пластичним деформуванням.

Позитивний вплив повторної нормалізації не виявили на 5% з усіх досліджених зразків. Тому виникає низка проблем, пов'язаних з необхідністю заздалегідь (перед термічним обробленням) контролювати технічний стан металу за мірою розсіяної пошкодженості.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние повторной нормализации эксплуатированной стали 36Г2С бурильных труб на ее структуру, рост усталостных трещин и фрактографические особенности разрушения. Обнаружено снижение скорости роста усталостных трещин и исчезновение хрупких элементов на изломах после устранения текстуры ферритных выделений и карбидов с границ зерен вследствие повторной термической обработки стали. В то же время на 5% всех исследованных образцов не обнаружили положительного влияния восстановительной термической обработки на скорость роста усталостной трещины в эксплуатированном металле, что свидетельствует о целесообразности предварительного (перед термической обработкой) контроля технического состояния металла за показателями, чувствительными к рассеянной повреждаемости.

SUMMARY. The effect of repeated normalization of the operated 36Г2С steel of drilling pipes on its microstructure, fatigue crack growth and fractography features was investigated. The decrease of fatigue crack growth rate and disappearance of the brittle elements from fracture surfaces were revealed after removing ferrite texture and carbides from the grain boundaries as a result of repeated thermal treatment of the operated steel. The positive influence of the repeated normalisation was not revealed for the 5% investigated specimens. This proves the requirement of the technical state control of the drilling pipes metal using indices sensitive to dissipated damages.

1. *Осташ О. П., Андрейко І. М., Головатюк Ю. В.* Деградація матеріалів і втомна довговічність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 4. – С. 5–17.
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., and Holovatyuk Yu. V.* Degradation of materials and fatigue durability of aircraft constructions after long-term operation // *Materials Science* – 2006. – **42**, № 4. – P. 427–429.)
2. *Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, А. Д. Марков // Там же. – 2010. – 46, № 2. – С. 42–54.*
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Krechkov's'ka H. V., and Markov A. D.* Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants // *Materials Science*. – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
3. *Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurul'nyk et al. // Engng. Failure Analysis. – 2010. – 17, № 3. – P. 624–632.*
4. *Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М.* Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 2. – С. 11–20.
(*Kryzhaniv's'kyi E. I. and Nykyforchyn H. M.* Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 2. – P. 127–138).
5. *Студент О. З., Свірська Л. М., Дзіоба І. Р.* Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики // Там же. – 2012. – **48**, № 2. – С. 111–118.
(*Student O. Z., Svirs'ka L. M., Dzioba I. R.* Influence of the long-term operation of 12Х1МФ steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics // *Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 239–246.)
6. *Кортунов А.* Бурильные колонны – проблемы и решения // Бурение и нефть. – 2006. – № 3. – С. 43–44.
7. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / 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: ФМІ НАН України та ІФНТУНГ, 2006. – 1192 с.*
8. *РД-39-013-90.* Инструкция по эксплуатации бурильных труб: ВНИИ разраб. и эксплуатации нефтепромысловых труб. – Куйбышев: ВНИИТнефть, 1990. – 226 с.
9. *Лялков А. А.* Исследование долговечности бурильной трубы с усталостными трещинами при различных запасах прочности // Разведка и охрана недр. – 1982. – № 5. – С. 5–7.
10. *Артим В. І., Гойсан І. М.* Дослідження втомної довговічності натурних зразків бурильних труб за багатоступеневого навантажування // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: Держ. мідвід. наук.-техн. зб. ІФНТУНГ. – 2010. – № 1. – С. 46–52.
11. *Металловедение и термическая обработка стали: Справ. в 3-х т. / Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. Т. 3: Термическая обработка металлопродукции / М. Л. Бернштейн, Ю. М. Брунзель, С. А. Голованенко и др. – М.: Металлургия, 1983. – 214 с.*

Одержано 30.04.2013