

УДК 620.193:622.226

ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ НАВАНТАЖЕННЯ ТА РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ДОВГОВІЧНІСТЬ БУРИЛЬНИХ ТРУБ

Д.Ю. Петрина

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 42342;
e-mail: public@nuing.edu.ua

Експлуатаційні перевантаження часто призводять до утворення залишкової пластичної деформації трубних сталей. Встановлено вплив пластичної деформації на величини модуля пружності E і коефіцієнта поперечної деформації μ сталей бурильних труб у складних умовах навантаження. Отримано зв'язок між зміною E і μ . Дається якісне пояснення впливу наклепу з точки зору дислокаційної картини будови металів.

Розглянуто проблеми, пов'язані зі зміною механічних характеристик трубних сталей. Показано, що пластична деформація досліджуваної сталі призводить до істотного викривлення початкової ділянки діаграми розтягу, а також зменшення модуля пружності та границі пропорційності.

Одержано нові експериментальні дані про зміну характеристик циклічної тріщиностійкості трубних сталей залежно від сумісного навантаження та корозійних середовищ.

Стаття стосується результатів теоретичних і експериментальних досліджень втомних властивостей бурильних труб при таких екстремальних режимах буріння свердловин, як разові та циклічні перевантаження, наявність робочих середовищ і тріщин в конструкціях.

Ключові слова: бурильна колона, ніпель, в'язкість руйнування, циклічна тріщиностійкість, корозійно-втомна міцність, втомна тріщина.

Эксплуатационные перегрузки часто приводят к образованию остаточной пластической деформации трубных сталей. Установлено влияние пластической деформации на величины модуля упругости E и коэффициента поперечной деформации μ сталей бурильных труб в сложных условиях нагружения. Получена связь между изменением E и μ и дано качественное объяснение влияния наклепа с точки зрения дислокационной картины строения металлов.

Рассмотрены проблемы, связанные со сменой механических характеристик трубных сталей. Показано, что пластическая деформация исследуемой стали приводит к существенному искривлению начального участка диаграммы растяжения, а также уменьшению модуля упругости и предела пропорциональности.

Получены новые экспериментальные данные об изменении характеристик циклической трещиностойкости трубных сталей в зависимости от совместного влияния нагружения и коррозионных сред.

Статья касается результатов теоретических и экспериментальных исследований усталостных свойств бурильных труб при таких экстремальных режимах бурения скважин, как разовые и циклические перегрузки, наличие рабочих сред и трещин в конструкциях.

Ключевые слова: бурильная колонна, ниппель, вязкость разрушения, циклическая трещиностойкость, корозионно-усталостная прочность, усталостная трещина.

The operating overloads often result in formation of remaining plastic deformation of pipe steel. Influence of plastic deformation is set on the quantity of the modulus of elasticity E and coefficient of transversal deformation μ of steel of drilling pipe in the difficult conditions of loading. Condition is got between the E change and μ and qualified explanation of influencing of workhardening is given from point of distribution picture of structure of metals.

The problems with mechanical characteristic of the pipe steel are observed. The plastic deformation of the investigated steel lead to substantial curvature of the initial part of the extension diagram and increasing of the modulus of elasticity and threshold of proportional are shown.

The new experimental data on the corrosion fatigue crack growth behaviour of pipe steels were received and analysed depending on the loading and the presence of corrosion environments.

The article deals with the results of theoretical and experimental investigations for fatigue properties of drilling pipes at the following extreme conditions of drilling of holes: single and cyclic overloading, availability of working environments and crack in constructions.

Key words: drill string, nipple, fracture toughness, cyclic crack resistance, corrosion fatigue strength, fatigue crack.

Вступ

Вирішення важливої державної проблеми – забезпечення паливно-енергетичного комплексу сировиною – вимагає для цієї галузі розробки і впровадження високоефективного устаткування, а також розвитку наукових методів його оптимальної експлуатації [1 – 5]. Ефективність експлуатації та будівництва свердловин значною мірою залежить, насамперед, від якості трубного господарства. Сучасна наука про міц-

ність і руйнування матеріалів розробляє теоретичні основи процесів деформування та руйнування тіл в екстремальних умовах експлуатації, якими можуть бути, наприклад, свердловинні умови (разові та циклічні перевантаження, фізико-хімічна дія агресивних середовищ, високих тисків і підвищених температур), наявність у трубах гострих концентраторів напружень – різьб, тріщин тощо [1, 6, 7]. Тому створювати нове обладнання необхідно з врахуванням цих чинників.

Особливо небезпечним, з точки зору руйнування елементів бурильної колони, є змінні напруження, що призводять до розвитку втомних процесів. Сумарна частка аварійних відмов бурильних колон в загальному балансі аварій у процесі буріння свердловин складає близько 70% [1, 7]. Це, в першу чергу, пов'язано з відсутністю належного контролю за дефектністю елементів бурильних колон і недостатніми знаннями закономірностей росту втомних тріщин в деталях свердловин, обладнання [3, 5]. Руйнування колони створює аварійні ситуації, на ліквідацію яких часто витрачаються значні кошти та час.

Дана робота спрямована на встановлення закономірностей впливу екстремальних режимів буріння свердловин на довговічність елементів бурильної колони, має не тільки наукову актуальність, але й важливе народногосподарське значення. Бурильні труби часто руйнуються в результаті прикладання незначної кількості циклів за підвищених напружень [2, 8]. Верхня частина бурильної колони піддається, як правило, суттєвому осьовому розтягуючому навантаженню [2]. В деяких випадках (наприклад, під час ліквідації прихоплень) ці напруження можуть перевищувати напруження пропорційності, що призводить до наклепу матеріалу і, як наслідок, до зміни його механічних властивостей [8-10]. В зв'язку з цим вивчення впливу малого числа циклів великих змінних осьових розтягуючих напружень на працездатність бурильних труб приділяється значна увага [1, 7].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Одним з суттєвих недоліків відомих гіпотез накопичення втомного пошкодження в металах є те, що вони не враховують кінетики пошкодження і не базуються на аналізі структурних змін у металах, які відбуваються в процесі втомного пошкодження [7, 11-13].

У зв'язку з різноманіттям даних про закономірності накопичення пошкоджень при різних режимах програмного навантаження, проведенню складних програмних випробувань повинні передувати попередні дослідження закономірностей накопичення пошкоджень в металах при найпростіших режимах однократних перевантажень, де в чистому вигляді можна дослідити вплив різних чинників на ці закономірності. Такі спрощення досліджень необхідні, як крок до розуміння більш складних явищ. Режими однократних перевантажень можуть бути віднесені до режимів найпростіших програмних навантажень, коли руйнування настає в кінці одного періоду зміни напружень.

Такі дослідження уже набувають певного розвитку [1, 8 – 10], однак для повного розуміння названих вище проблем їх недостатньо.

Тому мета даної роботи полягає у встановленні закономірностей впливу таких екстремальних режимів буріння свердловин, як разові і циклічні перевантаження, робоче середовище, наявність тріщин на довговічність елементів бурильної колони.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Спочатку дослідження проводили на зразках, виготовлених з сталі групи міцності Д в стані поставки ($\sigma_B = 660$ МПа; $\sigma_{0,2} = 390$ МПа; $\delta_5 = 17\%$; $\psi = 41\%$; КСУ = 43 Дж·см⁻²).

Встановлено, що пластична деформація сталі веде до значного викривлення початкової (квазілінійної) ділянки діаграми при повторному розтягу. Модуль пружності суттєво зменшується, а коефіцієнт поперечної деформації зростає. Вплив пластичної деформації проявляється незалежно від знаку напружень, що викликають наклеп. Якщо знаки поперечної пластичної деформації та напружень, при яких визначають модуль, співпадають, то спад модуля не дуже суттєвий і складає 10-13% від початкової величини. Наклеп протилежного знаку викликає більш суттєве зменшення модуля (до 35%).

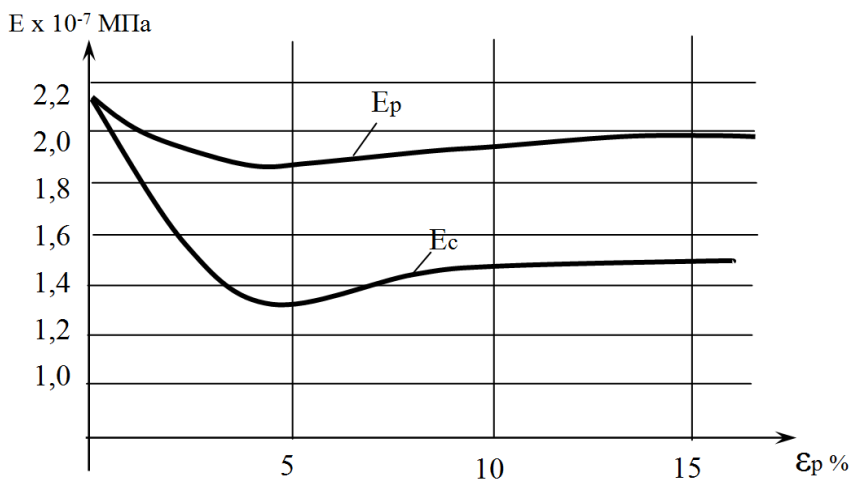
На рис. 1 зображено криві зміни модуля пружності сталі групи міцності Д залежно від величини поперечної пластичної деформації розтягу (ϵ_p , %).

Максимум падіння величини модуля пружності відповідає значенню поперечної пластичної деформації 5-6%. Наступне збільшення наклепу веде до зменшення спаду модуля.

Динаміка зміни коефіцієнта поперечної деформації μ наклепаного матеріалу мала характер, протилежний зміні модуля пружності. Так, з рис. 2 видно, що коефіцієнт поперечної деформації (до $\epsilon \approx 3\%$) зростає, а потім залишається на практично постійному рівні. Величина максимальної зміни залежить, як і в попередньому випадку, від знаку пластичної деформації. Так, наклеп розтягом ϵ_p збільшує коефіцієнт поперечної деформації при розтягу μ_p на ~ 10%, а при стиску μ_c на ~ 15%.

Встановлено нестабільність зміни пружних властивостей досліджуваної сталі після наклепу. Через певний проміжок часу вихідні властивості матеріалу поновлюються. При нормальній температурі процес поновлення протікає дуже повільно, і для повного повернення властивостей потрібен проміжок часу близько півроку.

На рис. 3 зображено залежності поновлення модуля пружності досліджуваної сталі з перебігом часу. Крива 1 представляє величини модуля сталі зразку після наклепу. Крива 2 – після витримки в розвантаженому стані протягом доби. Після тижневої витримки представляє крива 3, а після витримки в 20 тижнів –



E_p – модуль при наступному розтягу; E_c – модуль при наступному стиску

Рисунок 1 – Залежність модуля пружності сталі групи міцності Д від величини попередньої пластичної деформації розтягу

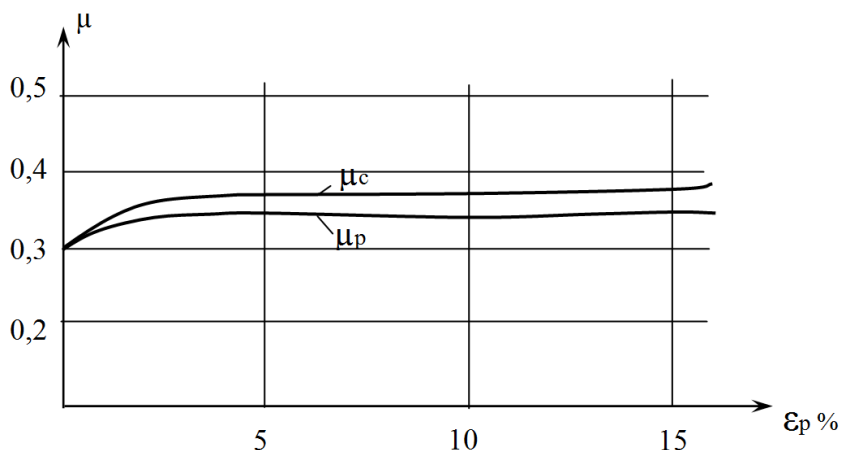


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта поперечної деформації сталі групи міцності Д від величини попередньої пластичної деформації розтягу

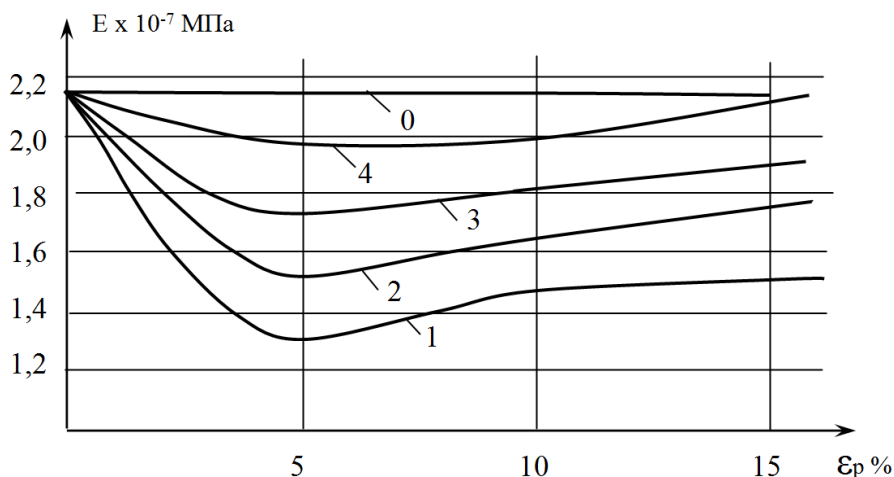


Рисунок 3 – Залежності поновлення модуля пружності сталі групи міцності Д з часом

крива 4. З рисунку видно, що остання крива близька за своїм характером до кривої 0 для вихідного матеріалу.

Враховуючи той факт, що абсолютна більшість поломок деталей бурильних колон має характер корозійно-втомного руйнування,

останньому приділяється значна увага в сучасних наукових дослідженнях. Однак в них практично випущене питання вивчення впливу різного роду екстремальних навантажень при бурінні на втому бурильних труб. Тому вивчали одну з сторін цієї проблеми.

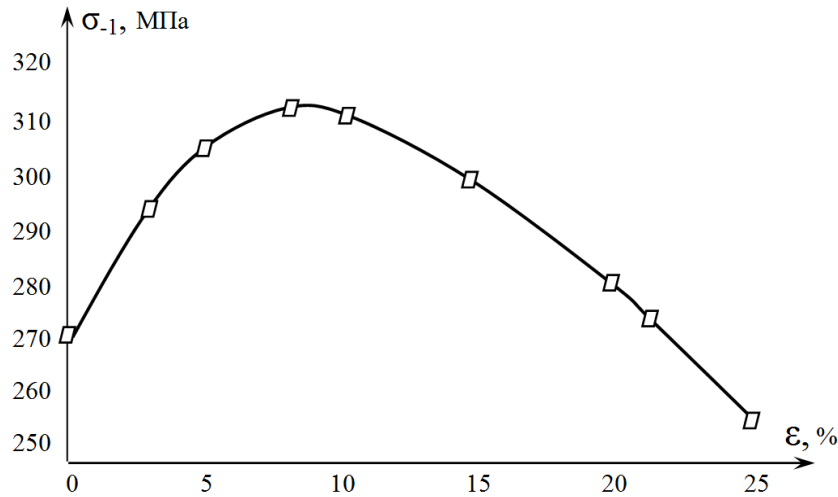


Рисунок 4 – Залежність границі втоми сталі групи міцності Д від величини попередньої пластичної деформації

Зразкам надавались різні величини попередньої пластичної деформації (до 25%). Після цього кінцевини зразків, якими вони кріпились до розривної машини, відрізалися. Конструкція такого зразка дозволяла проводити подальше його випробування на втомній машині ИМА-5.

Як видно з даних, приведених на рис. 4, в результаті пластичного деформування до 22% границя втоми сталі групи міцності Д зростає. Найбільший ефект спостерігали при $\epsilon = 5... 10\%$. Однак він не перевищував 20% від вихідного значення σ_{-1} .

Збільшення амплітуди напруження і ступеня попередньої деформації обумовлюють виникнення вогнищ зародження тріщин, пов'язаних з концентрацією напружень, продовжують період до зародження втомних тріщин, гальмують їх подальший розвиток і, як наслідок, підвищують циклічну довговічність деформованих металічних матеріалів. Цьому відповідають збільшення зони втомної тріщини в зламах зразків, а також більш в'язкий характер руйнування і доламу.

В роботі [11] показано, що підвищення під впливом попереднього деформування обмеженої границі витривалості $\sigma_{RN\epsilon}$ (на базі 10^6 циклів) і довговічності N_ϵ (при $\sigma_a \cong 0,5\sigma_e$) посилюється за мірою досягнення матеріалом у вихідному положенні здатності до деформаційного зміцнення, що оцінюється показником зміцнення A . Ці закономірності апроксимуються рівняннями

$$\epsilon_{RN\epsilon} / \epsilon_{RN} = 0,615 \cdot e^{2,7A}; r = 0,93; \quad (1)$$

$$N_\epsilon / N = 0,187 \cdot e^{10,5A}; r = 0,92. \quad (2)$$

Тут $\sigma_{RN\epsilon}$ і σ_{RN} – обмежена границя витривалості деформованого і вихідного матеріалу; N_ϵ і N – довговічність деформованого і вихідного матеріалу.

Результати наших досліджень (рис. 5, 6) співпадають з даними роботи [11].

З них випливає, що ефект пластичної деформації, в основному рівномірної, який викликає підвищення обмеженої границі витривалості та циклічної довговічності, зростає із збільшенням здатності матеріалу до деформаційного зміцнення за статичного розтягнення. Встановлені залежності дають можливість оптимізувати доцільність введення в технологічний процес виготовлення деталей операцій пластичного деформування з метою підвищення їх довговічності. Технологічна обробка, що приводить до росту показника A , обумовлює позитивний вплив на опір руйнуванню деформованих металічних матеріалів при циклічному навантаженні.

З метою об'єктивної оцінки ресурсу та вибору періодичності неруйнівного контролю бурильних колон останнім часом значно удосконалюються методи їх розрахунку [12]. Вони все ширше ведуться на основі критеріїв механіки руйнування [1, 6, 7]. Однак прогнозування ресурсу бурильних труб, ніпелів, муфт здійснюється без врахування нерегулярності навантаження. В той же час встановлено, що експлуатаційний спектр згинаючих моментів, діючих на бурильну трубу в свердловині, може мінятися в широких межах [1, 5]. Крім циклічного навантаження та недовантаження певної тривалості можливі також пікові (імпульсні) однократні перевантаження, випадкове навантаження і т.п. [1, 4, 8]. Ряд досліджень свідчить про суттєві перехідні ефекти зміни швидкості поширення втомних тріщин [1, 7]. Вони затруднюють оцінку ресурсу роботи деталей з тріщинами. До числа експлуатаційних факторів, які сприяють розвитку різних зовнішніх дефектів і полегшують розвиток тріщин, відносяться також рідкі робочі середовища. Так, границя витривалості деталей бурильної колони понижується в корозійних середовищах на 30...50% і може приймати дуже малі значення, особливо при великих базах випробувань [12].

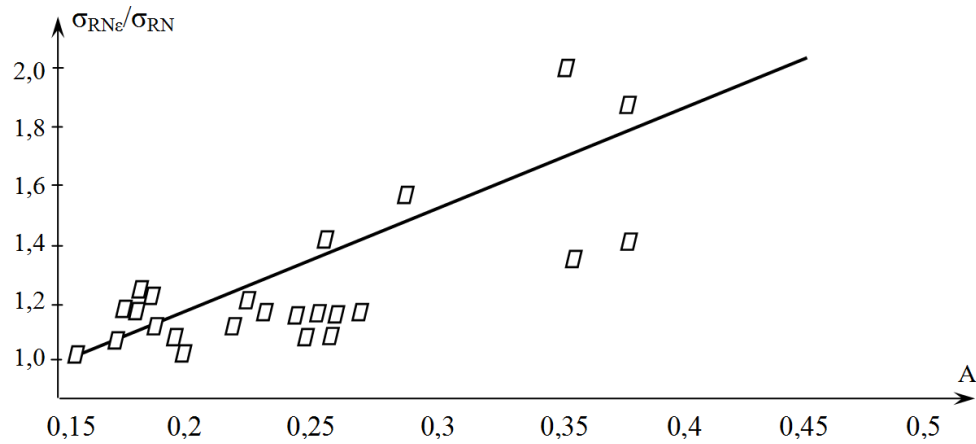


Рисунок 5 – Залежність ефекту попереднього пластичного деформування, що обумовлює зміну границі обмеженої витривалості на базі $N = 10^6$ циклів, від показника деформаційного зміцнення A матеріалу в вихідному стані

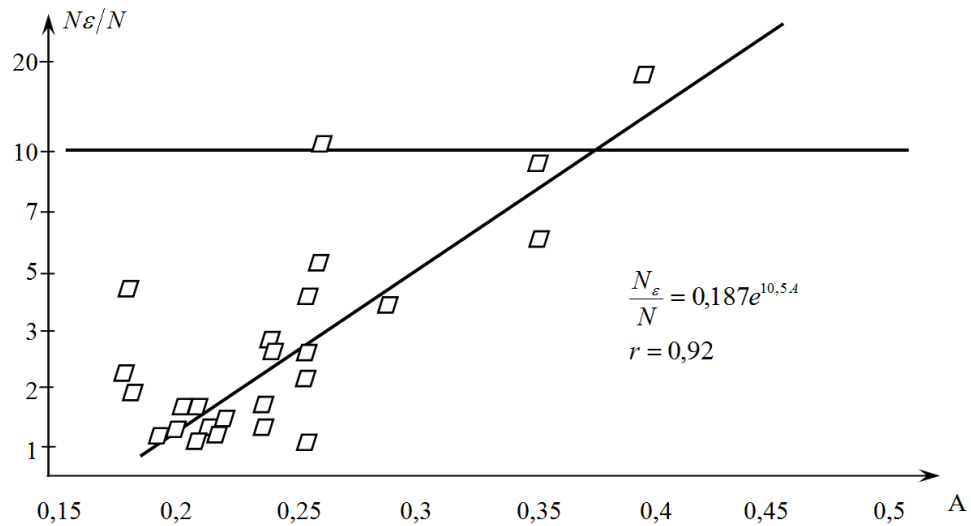


Рисунок 6 – Залежність ефекту попереднього пластичного деформування, що викликає зміну довговічності при $\sigma_a \cong 0,5\sigma_s$, від показника деформаційного зміцнення A матеріалу в вихідному стані

Враховуючи наведене вище, в даному дослідженні була поставлена задача оцінити характер впливу рідинних середовищ на процеси наклепу і старіння, що супроводжують розвиток тріщини при циклічному навантаженні елементів бурильної колони [13].

Для випробувань були вибрані сталі групи міцності Д і 40ХН, які широко застосовуються для виготовлення бурильних труб і ніпелів. Зразки підлягали гартуванню з наступним відпуском при 575, 675 і 825 К. Робочими середовищами слугували 3%-ний розчин олеїнової кислоти в вазеліновому маслі та дистильована вода.

Число циклів N_3 необхідне для зародження кільцевої осесиметричної тріщини глибиною 1 мм (при нетто-січенні діаметром 7 мм), залежить не тільки від рівня амплітуди при тренуванні, але й від виду середовища. В таблиці 1 вказано встановлене дослідниками число циклів

N_0 залежно від рівня амплітуди навантаження σ_a і виду середовища (повітря, масло, вода).

Тривалість тренування, необхідного для утворення тріщини, в 3%-ному розчині олеїнової кислоти більша, ніж на повітрі, а коли тренування проводиться у воді, N_3 різко скорочується. Ця тенденція характерна для обох досліджуваних сталей.

Найбільшу увагу приділено нами вивченню впливу поверхнево-активного середовища – 3%-ного розчину олеїнової кислоти в вазеліновому маслі на характер наклепу та старіння, обумовлених циклічним навантаженням. Після наведення тріщини в присутності вказаного середовища всі зразки підлягали 2-годинному старінню при 425 К, під час якого масло в вершині тріщини повністю висушувалося. Вплив наклепу і старіння оцінювали шляхом випробувань зразків на в'язкість руйнування в повітрі.

Як видно з рис. 7, для зразків, тренуваних в повітрі, при малих амплітудах в'язкість руйнування спочатку зростає, а при великих – падає. Якщо тріщина наведена при малих амплітудах, то наступне старіння призводить рівень K_{Ic} до “ювенільних” значень. Очевидно, що підвищенню опору поширення тріщини сприяє наклеп матеріалу в вершині тріщини. Наступне старіння знімає залишкові напруження в матеріалі в вершині тріщини і повертає рівень в'язкості руйнування до вихідних значень. Тренування зразків при підвищених рівнях амплітуди приводить до зниження значень K_{Ic} , що пов'язано з пошкодженням матеріалу в вершині тріщини. Це підтверджується наступним старінням, яке не повертає параметри тріщиностійкості матеріалів у вихідне положення. В той же час зразки, тренувані в розчині олеїнової кислоти з наступним старінням, показали стабільний рівень в'язкості руйнування при всіх амплітудах навантажень. Подібний вплив на характер наклепу при циклічних навантаженнях проявила також дистильована вода (рис. 8).

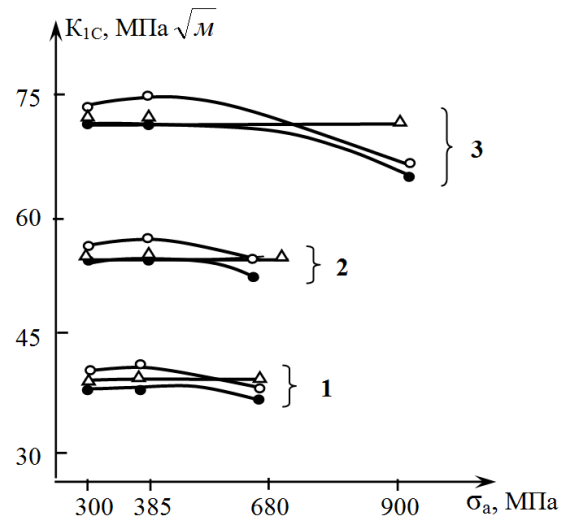
Приведені дані свідчать про повне усунення впливу циклічного наклепу і старіння на величину K_{Ic} у випадку, коли тріщину створюють в присутності середовища. Це означає, що внаслідок зменшення під впливом середовища ефективної поверхневої енергії різко знижується пластична деформація матеріалу попереду фронту тріщини.

Зменшення ефективної поверхневої енергії, необхідної для утворення одиниці площі втомної тріщини, якісно подібно спаду ефективної поверхневої енергії при руйнуванні зразків з тріщинами під дією короткочасних навантажень. Рисунок 8 ілюструє, зокрема, вплив розчину олеїнової кислоти та дистильованої води на величину K_{Ic} сталі 40XH. Як видно з наведених даних, зниження в'язкості руйнування при короткочасному навантаженні суттєве.

Отже, під впливом рідинних середовищ поширення тріщини полегшується. Проте, як видно з таблиці 1, тривалість утворення тріщини регламентованої довжини у вершині конструктивного концентратора під дією розчину олеїнової кислоти не зменшується, а навпаки – навіть трохи збільшується. Для більш детального аналізу цього явища визначали окремо число циклів N_p , необхідне для руйнування зразка з тріщиною заданої глибини (1 мм), і число циклів N_3 необхідне для утворення такої тріщини (при цьому повна кількість циклів до руйнування зразка з конструктивним концентратором $N = N_3 + N_p$). Досліди проводили на зразках з сталі 40XH після відпуску 675K при амплітуді навантажень 685 МПа.

Як видно з таблиці 2, при наведенні тріщини в присутності розчину олеїнової кислоти час утворення тріщини більший, ніж на повітрі. В той же час тривалість навантаження, необхідного для поширення тріщини на критичну глибину, дещо зменшується. Більш радикальною є

дія води. В цьому випадку значно скорочується як період зародження тріщини, так і період її поширення.



○ - випробування безпосередньо після утворення втомної тріщини;
● - після старіння;
Δ - після утворення втомної тріщини в розчині олеїнової кислоти з подальшим старінням;
1 – температура відпуску 575K;
2 – 675K; 3 – 825K

Рисунок 7 – Вплив циклічного тренування і старіння на в'язкість руйнування сталі 40XH

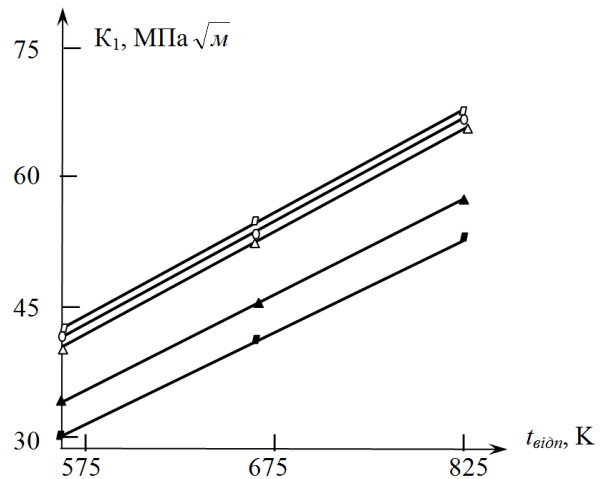


Рисунок 8 – Вплив способу отримання втомної тріщини та середовища на в'язкість руйнування сталі 40XH ($\sigma_a = 685$ МПа) при випробуваннях безпосередньо після наведення втомної тріщини на повітрі (○); після утворення втомних тріщин у розчині олеїнової кислоти (Δ) і воді (□) з наступним старінням; в розчині олеїнової кислоти (▲) і воді (■) безпосередньо після утворення втомних тріщин в присутності відповідних середовищ

Таблиця 1 – Вплив рівня амплітуди навантаження та виду середовища на число циклів N_3

Сталь	$t_{\text{відп}}, \text{K}$	$\sigma_a, \text{МПа}$									
		900		685		385		300			
		N_3									
		Повітря	Масло	Повітря	Масло	Вода	Повітря	Масло	Повітря	Масло	Вода
40ХН	825	580	640	5200	6100	3800	30000	33000	70000	75000	40000
	675	-	-	4600	5700	3500	27000	30000	68000	72000	-
	575	-	-	3500	3900	1200	19000	21000	60000	64000	-
Гр. міцн. Д	825	550	600	4900	5800	3400	26000	28000	67000	7200	36000

Таблиця 2 – Вплив середовища на параметри циклічної довговічності сталі 40ХН

Середовище	N	N_3	N_p
Повітря	7700	4600	3100
Масло	8300	5700	2600
Вода	4800	3500	1300

Ріст N_3 при випробуваннях зразків в розчині олеїнової кислоти в вазеліновому маслі пояснюється тим, що хімічно неактивна рідина оберігає метал від дії зовнішнього корозійного середовища, а адсорбційний ефект масла проявляється в пластифікуючому впливі на матеріал в зоні конструктивного концентратора на стадії зародження тріщини. Що стосується періоду поширення тріщини при циклічному навантаженні, то тут у зв'язку з більш жорсткими умовами навантаження проявляється окрихчюча дія середовища, яка полегшує ріст магістральної втомної тріщини.

Результати механічних випробувань підтверджуються електроннофрактографічним аналізом зламів зразків, виготовлених з сталі 40ХН, відпущеної при 675К (рис. 9). На мікроповерхні руйнування, що відповідає підростанню тріщини при випробуванні на повітрі, переважальними є нерегулярні, з багаточисленими розривами боріздки, характерні для втомного підростання тріщини в гартованих сталях. Будова боріздок свідчить про суттєву мікропластичну деформацію, з якою пов'язаний ріст тріщини в кожному циклі.

Середовище типу розчину олеїнової кислоти суттєво міняє мікроструктуру зламу. На великих ділянках втомні боріздки поступають місцем безструктурним відкольним фасеткам, наявність яких обумовлена нерегулярним підростанням тріщини при значно зменшеній пластичній деформації. Порівняно легке підростання тріщини на гладких ділянках перемежується, очевидно, з довготривалими зупинками в смугах щільного накопичення боріздчастих виступів.

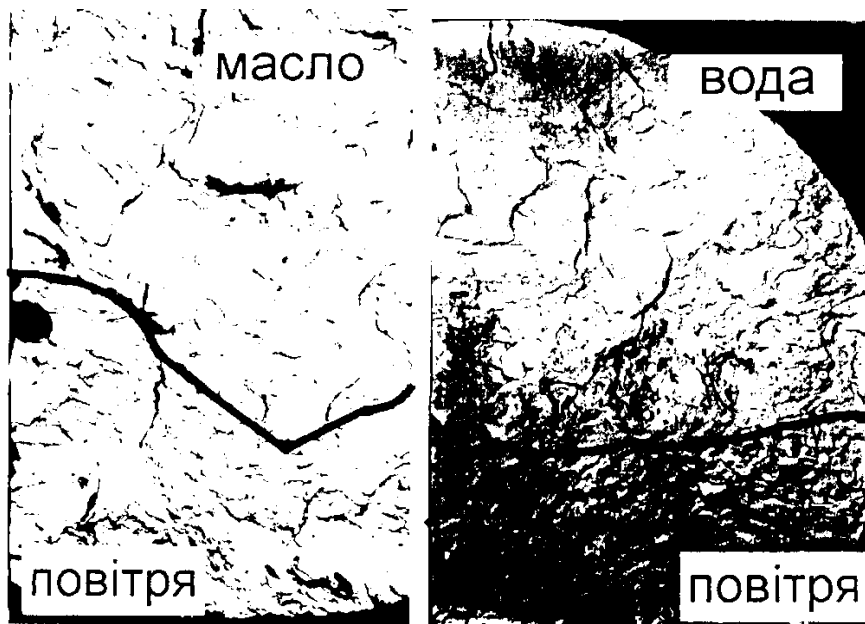
Ще більш різко змінюється характер підростання тріщини під дією води. Тут типовими є чітко окреслені крихіткі фасетки, наявність яких підкреслюється частими поперечними виривами. Фасетки в багатьох випадках декоровані слідами корозії. В цілому характер зламу типовий для корозійно-втомного руйнування загартованої сталі.

Довговічність елементів бурильних колон залежить не тільки від втомної міцності матеріалів, але й від їх зносостійкості. Довготривале тертя різних частин бурильної колони по стінках свердловини, яка має на окремих ділянках абразивні породи, або по металу обсадних труб в процесі експлуатації призводить до інтенсивного зношування – опрацювання зовнішньої поверхні елементів колони. Більшому зносу піддаються деталі замків, перехідники, що мають збільшений зовнішній діаметр порівняно з діаметром бурильних труб.

В цьому випадку дуже актуальним є питання раціонального вибору температури відпуску сталі: надто високе її значення призводить до зниження її твердості і, як наслідок, зносостійкості, а надто низьке - до зниження в'язкості та втомної міцності.

Нами зроблений дуже важливий висновок – сталь буде мати максимальну зносостійкість тоді, коли її структура забезпечує граничне значення фізичної границі втоми. Тому температура відпуску, яка забезпечує граничне значення фізичної границі втоми, є найбільш раціональною з точки зору поєднання найвищих показників втомної міцності та зносостійкості. Ними для хромистих сталей як конструкційного матеріалу деталей бурових доліт були визначені області фізичної границі витривалості в залежності від вмісту вуглецю, температури відпуску та виду втомного навантаження (рис. 10, залежності 1, 2).

Автором даної роботи показано, що положення величини граничної температури відпуску суттєво залежить від ряду факторів (зокрема, характеру легування). Так, легування нікелем знижує граничну температуру відпуску (рис. 10, залежність 3).



а

б

а – повітря - розчин олеїнової кислоти; б – повітря - вода

Рисунок 9 – Фрактограми перехідних ділянок зламів, які відповідають втомному поширенню тріщини (x1500)

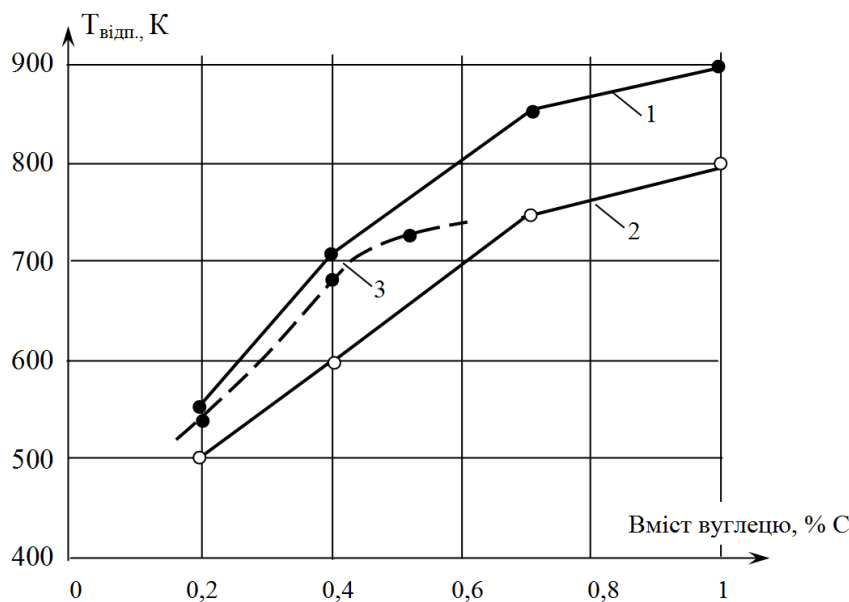


Рисунок 10 - Залежність граничних температур відпуску від вмісту вуглецю в хромистих сталях (пунктиром – для сталей 20ХН3А, 40ХН, 50ХН)

Особлива увага була приділена вивченню властивостей сталі 40ХН, з якої на Дрогобицькому долотному заводі виготовляють ніпелі. Встановлено, що найбільш оптимальне поєднання показників втомної міцності та зносостійкості ніпель буде забезпечуватися при їх температурі відпуску 650-670К. В той же час на заводі цей термічний процес здійснюється при $\approx 760\text{K}$. Отже, зниження температури відпуску ніпельів на $\approx 100\text{K}$ призведе не тільки до покращення їх механічних властивостей і зносостійкості, але й до здешевлення термічної операції, економії електроенергії.

Дані рекомендації знайшли своє втілення в технологічному процесі виготовлення буринь замків на Дрогобицькому долотному заводі.

Висновки

1. Попередня пластична деформація сталі групи міцності Д веде до зменшення модуля пружності E і зростання коефіцієнту поперечної деформації μ .
2. Вплив пластичної деформації проявляється незалежно від знаку напружень, що викликають наклеп. Наклеп протилежного знаку

викликає більш суттєвий спад модуля E і збільшення коефіцієнта μ .

3. Встановлена нестабільність зміни пружних властивостей досліджуваної сталі після наклепу. Через певний проміжок часу вихідні властивості матеріалу поновлюються.

4. Ефект рівномірної пластичної деформації, який викликає підвищення обмеженої границі витривалості та циклічної довговічності, зростає із збільшенням здатності матеріалу до деформаційного зміцнення при статичному розтягу. Найбільший ефект спостерігається при $\epsilon = 5 \dots 10\%$.

5. Показана доцільність введення в технологічний процес виготовлення деталей операцій пластичного деформування з метою підвищення їх довговічності.

6. При оцінці втомної міцності бурильних труб слід приймати до уваги здатність матеріалів до експлуатаційного окрихчення, обумовленому їх наклепом і пошкодженістю в вершині тріщини при циклічних перевантаженнях, а також деформаційним старінням.

7. Результатами механічних випробувань і електроннофрактографічного аналізу показано, що ріст втомних тріщин в сталях в присутності рідких середовищ (типу води та розчину олеїнової кислоти в вазеліновому маслі) супроводжується суттєвим пониженням мікропластичної деформації матеріалу порівняно з повітрям. При цьому практично усувається наклеп матеріалу, що прилягає до вершини тріщини.

8. Для хромонікелевих сталей типу ХН визначені області фізичної границі витривалості в залежності від вмісту вуглецю та температури відпуску. На цій основі для сталі 40ХН запропонована оптимальна температура відпуску з точки зору забезпечення найвищих показників міцності та зносостійкості. Дана рекомендація впроваджена в технологічний процес виготовлення ніпелів на Дрогобицькому долотному заводі.

В подальшому планується поширити даний метод обробки на деталі шарошкових бурових доліт.

Література

1 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В.І. Похмурський, Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів [та ін.] / 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.

2 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.

3 Схематизація випадкового навантаження методом вкладених циклів / Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів, В.І. Артım, В.М. Нікітюк //

Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. – № 2. – С. 47 – 54.

4 Артım В. Моделювання накопичення втомних пошкоджень при випадковому навантаженні / В. Артım, П. Пушкар // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 1. – С. 19 – 24.

5 Івасів В.М. Удосконалена методика прогнозування залишкового ресурсу деталей у типових умовах експлуатації / В.М. Івасів, В.І. Артım, П.В. Пушкар // Машинознавство. – 2005. – № 10. – С. 43 – 46.

6 Механіка розрушення и прочность материалов: справ. пособие в 4 т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / С.Е. Ковчик, Е.М. Морозов. – К.: Наукова думка, 1988. – 436 с.

7 Механіка розрушення и прочность материалов: справ. пособие в 4 т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин [и др.]. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с.

8 Артım В. Оцінка навантаженості бурильної колони під час спуско-піднімальних операцій / В. Артım // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 4. – С. 26 – 32.

9 Крижанівський Є.І. Вплив попереднього пластичного деформування розтягом на тріщиностійкість конструкційної сталі бурильної колони / Є.І. Крижанівський, О.Т. Цирульник, Д.Ю. Петрина // Машинознавство. – 1999. – № 4. – С. 14 – 17.

10 Крижанівський Є.І. Вплив наводнювання та попереднього пластичного деформування сталі на її тріщиностійкість / Є.І. Крижанівський, О.Т. Цирульник, Д.Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – № 5. – С. 67 – 71.

11 Сопротивление усталостному разрушению металлов при разных температурах / Д.С. Гусяков, М.Ф. Бережницкая, Г.В. Пачурин, Г.П. Гусякова // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – № 1. – С. 75 – 82.

12 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. Серія: Нафтопромислове обладнання. – 1996. – № 33. – С. 3 – 30.

13 Kryzhanivsky Y.I. Research of fatigue crack spread kinetics in drilling pipes / Y.I. Kryzhanivsky, V.M. Ivasiv, D.Y. Petryna // The international meeting of the Carpathian region specialists in the field of worm gears. Scientific bulletin. Serie C, Volume XII. – Baza Mare. – 1998. – P. 109 – 115.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
04.10.12*

*Рекомендована до друку професором
Г. М. Никифорчиним*