УДК 622.24.05
Д.Ю. Петрина, доцент, д-р техн. наук
М.І. Квас, інженер
Р.С. Яким, доцент, канд. техн. наук
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, Україна, 76019, м. Івано-Франківськ,
mtf@nung.edu.ua

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ШТОКІВ ПОРШНЕВИХ БУРОВИХ НАСОСІВ МЕХАНОУЛЬТРАЗВУКОВИМ ЗМІЦНЮЮЧИМ ОБРОБЛЕННЯМ

Аналізується вплив структурних і механічних показників зміцнених механоультразвуковим обробленням зразків зі сталі 40Х на механізм зародження тріщин та встановлені рекомендації для застосування такого оброблення у технологічному процесі виготовлення штоків бурових насосів.

Ключові слова: *механоультразвукове зміцнення, шток, буровий насос.*

Довговічність штоків поршневих бурових насосів суттєво залежить від якості їх робочих поверхонь. Оскільки кінцеве формування поверхневих шарів відбувається на стадії фінішних обробок то це вимагає застосовувати шліфування і полірування. Одночасно, за останні роки інтенсивно розробляються технологічні процеси, що включають механоультразвукове зміцнення, як альтернативне шліфуванню. Тим не менше, механоультразвукове зміцнення у сучасному нафтогазовому машинобудуванні не знайшло широкого застосування. Тому вивчення експлуатаційних показників штоків оброблених на фінішних операціях механоультразвуковим зміцненням є актуальним і має важливе практичне значення для розробки високоефективних технологічних процесів.

За останні роки у вирішенні проблеми здійснено важливі кроки в роботах [1-3] та ін. Однак питання про фізико-механічні властивості деталей після механоультразвукового оброблення вивчені ще недостатньо. Це суттєво утруднює ефективне застосування такого оброблення не тільки штоків бурових насосів, а й подібних довгомірних деталей машин нафтогазової промисловості, що працюють в умовах знакозмінних навантажень і корозійного середовища. Зокрема, потребує докладного вивчення вплив структурних і механічних показників зміцнених механоультразвуковим обробленням зразків на механізм зародження тріщин.

Для вирішення цієї задачі були проведені лабораторні дослідження над зразками обробленими згідно існуючої технології та згідно розроблених в [4] параметрів механоультразвуково оброблення (частота ультразвукових коливань – 20кГц, а також такі параметри оброблення: частота обертання зразка n=630об/хв, подача S=0,11мм/об, навантаження на зразок P=1000Н, припуск на оброблення 0,02мм). Для оцінки ефективності такого оброблення порівнювали з силовим точінням, яке часто застосовується у нафтогазовому машинобудуванні.

Відомо, що за рахунок ультразвукового впливу спостерігається розповсюдження пластичного деформування на значну глибину зміцненого зразка. Крім цього таке оброблення створює комплексне зміцнення – пластичною деформацією і гартуванням в умовах впливу імпульсних температур, тисків і швидкого гартування. Це пояснює отримані відмінності в товщині зміцнених шарів і особливо в білих шарах (таблиця 1).

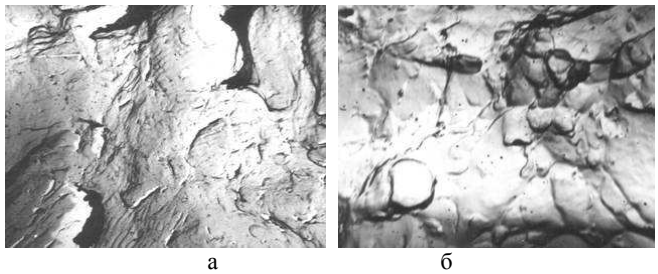
Таблиця 1 – Залежність товщини білого шару від виду попереднього оброблення та зміцнення штоків зі сталі 40Х

Вид термообробки	Вид механічного оброблення	Товщина білого шару, мкм
гартування + низький відпуск	механоультразвукове	40, 48, 52, 55
	силове точіння	15, 22, 33, 35
покращення	механоультразвукова	30, 34, 38, 40
	силове точіння	12, 16, 18, 20

Електронномікроскопічне вивчення зломів деталей дає цінну інформацію про руйнування металу в процесі того чи іншого виду навантаження, в тому числі втоми. Хоч вказаний аналіз не дає можливості отримати додаткову інформацію про процес зародження тріщини, але дозволяє зрозуміти механізм розвитку тріщини залежно від різних чинників. Для встановлення чіткої кореляції між фрактографічними особливостями і якістю поверхневого шару був проведений прицільно-статистичний аналіз зломів у місці зародження і розвитку втомних тріщин, в перехідних зонах і в місцях долому.

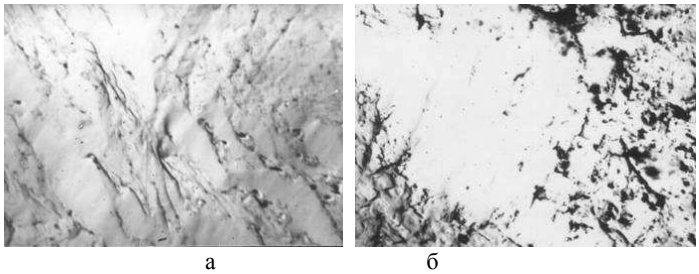
Дослідження зруйнованих зразків при $\sigma = (1{,}06...1{,}09)\sigma_{-1}$ та базі циклів N = 0,1...0,6 млн. циклів, показали, що на поверхні зломів зразків з загартованої і низько відпущеної сталі 40Х у зоні зародження втомної тріщини спостерігається характерна для таких сталей структура у вигляді дрібних борозен. Така будова, як відомо з робіт О.М.Романіва, Ю.В.Зими, свідчить про регулярний ріст втомної тріщини шляхом утворення послідовних надривів (впадин) в фронтально розташованих ділянках інтенсивного зсуву.

Як і слід було очікувати, мікрорельєф у вигляді дрібних борозен не розповсюджується на всю поверхню злому. Він нерідко розмежовується ділянками розшарування по площадках ковзання нерегулярно розташованими слідами розривів і т.п. Вказані мікроособливості притаманні притертій ділянці злому, саме втомному джерелі, яке спричинює наступне катастрофічне руйнування. Основна частина поверхні злому – долом, що характеризується в основному ямковою мікробудовою, яка є відбитком зародження і концентрації мікропустот у вершині тріщини, яка розвивається (рисунок 1). Зауважимо, що мікроструктурні особливості зони долому на інших зразках сталі, яка досліджується, залишаються практично без змін. Тобто у всіх зразків спостерігаються ямки, розміри яких зменшуються тільки після високого відпуску і дещо після старіння. У зв'язку з цим основна увага при фактографічних дослідженнях була зосереджена на вивченні мікроструктури злому джерела втомного руйнування.



а б

Рисунок 1 – Мікрофрактограми джерела втомного руйнування (а) і зони долому (б) шліфованих зразків з загартованої і низько відпущеної сталі 40Х
(а – ×3000×2,5; б – ×4000×2,5)



а б

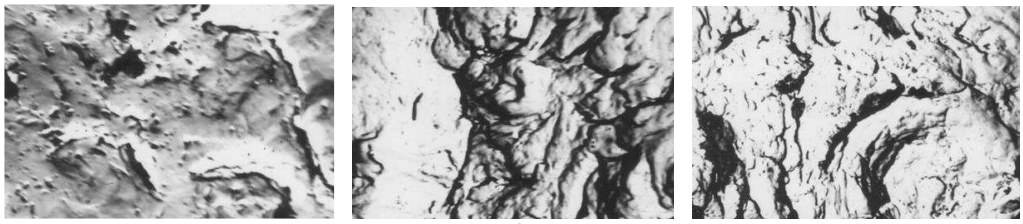
Рисунок 2 – Мікрофрактограми джерел втомного руйнування зразків з білим шаром на загартованій та низько відпущеній сталі 40Х
а – силове точіння (притерта зона) (×3000×2,5)
б – механоультразвуке оброблення (×5000×2,5)

Мікроповерхня зломів зразків з білим шаром в ділянці втомного руйнування суттєво відрізняється від вихідної сталі (рисунок 2). Так, наприклад, в білому шарі, отриманому силовим точінням, спостерігається викривлення класичної мікроструктури борозенного типу в джерелі руйнування. На цій ділянці появляються ряди дрібнодисперсних впадин (рисунок 2, *а*), які утворюються внаслідок накопичення мікродефектів типу субмікропор у вершині тріщини.

Мікробудова втомного злому зразків з білим шаром отриманим механоультразвуковою обробкою на загартованій низько відпущеній сталі 40Х дещо відрізняється від білого шару, отриманого токарною обробкою. Поверхня цих ділянок злому містить велику кількість слідів виступів і впадин дуже дисперсних і, очевидно, неглибоких (рисунок 2, *б*). Можна припустити, що така мікробудова є наслідком накопичення дуже дрібних дефектів в процесі навантаження. Об'єднання цих дефектів здійснюється, очевидно, не без зв'язку з зсувними мікродеформаціями, про що свідчать граничні з цими ділянками зони розшарувань по площинах ковзання.

Вихід втомної тріщини за межі білого шару, отриманого механоультразвуковим обробленням, можна встановити за допомогою квазіскольного рельєфу (рисунок 3, *а*), який поступово переходить в більш-менш регулярно розташовані впадини (рисунок 3, *б*), а останні, в свою чергу, бороздоподібну структуру (рисунок 3, *в*). В даному випадку можна твердити про існування деякої проміжної зони, що виникає в результаті ультразвукових коливань, що діють на загартовану сталь. У вершині тріщини, в

межах цієї зони відбувається процес накопичення більш великих неоднорідних за величиною у порівнянні з білим шаром дефектів типу мікротріщин, злиття яких (за невідомим механізмом) веде до наступного руйнування.



а б в

Рисунок 3 – Мікрофрактограми зони за межами білого шару, отриманого механоультразвуковим обробленням на загартованій і низько відпущеній сталі 40Х (×3000×2,5):
а – квазіковзкий; б – впадинковий; в – бороздоподібний рельєф

Проведені дослідження засвідчують, що в результаті одночасної дії імпульсних високих тисків та нагрівів до температур мартенситних перетворень, швидкісного охолодження за рахунок відводу тепла в глибші шари деталі, що обробляється, утворюється відбілений шар, який слабо травиться. В результаті механоультразвукового оброблення в поверхневих шарах сталі (зона впливу) інтенсивно проходять дифузійні процеси, масоперенесення. Підвищений вміст вуглецю і карбідів та дрібнодисперсна мартенситна структура утворених шарів забезпечує підвищення опірності корозійному розтріскуванню досліджуваної сталі.

Корозійне розтріскування в кислих електролітах проходить в результаті наводнювання металу, а попередні дослідження з вивчення водневої оклюзії білих шарів показують, що вони суттєво понижують оклюзію водню в метал.

При дослідженнях на корозійно-втомну міцність спостерігали збільшення значення умовної границі корозійної втоми зразків, зміцнених механоультразвуковим обробленням. У продовження цього, встановлено збільшення приблизно в 5,5 разів умовної границі корозійної втоми зразків загартованих і низько відпущених порівняно з шліфованими. При обробленні покращеної і нормалізованої сталі 40Х, – корозійно-втомна міцність збільшилася приблизно в 2-3,4 рази порівняно з шліфованими. У всіх випадках підвищення корозійно-втомної міцності зразків забезпечується дрібнозернистою і щільною структурою мартенситу, та підвищеною стійкістю до корозії білого шару.

Аналіз результатів досліджень показав, що мікрогеометрія поверхні досліджуваних сталей не має домінуючого значення при випробовуваннях на корозійно-втомну міцність в даних умовах. Проте менша шорсткість позитивно впливає на стійкість до корозійно-втомного руйнування (таблиця 2, 3).

Таблиця 2 – Корозійно-втомна міцність гладких зразків зі сталі 40Х

Термообробка	Метод створення білого шару	Шорсткість R_a, мкм	σ_{-1}^{N}, МПа	β
Гартування + низький відпуск	Шліфування	0,32	45	1
	Механоультразвукове оброблення	0,16	250	5,55
	Силове точіння	0,63	160	3,5
Покращення	Шліфування	0,8	70	1
	Механоультразвукове оброблення	0,16	240	3,42
	Силове точіння	0,63	200	2,86

де $\beta = \frac{\sigma_{-1(зміцнений)}}{\sigma_{-1(вихідний)}}$.

Таблиця 3 – Корозійно-втомна міцність зразків зі сталі 40Х з концентратором

Термообробка	Метод створення білого шару	Шорсткість R_a, мкм	σ_{-1}^{N}, МПа	β
Гартування + низький відпуск	Шліфування	0,32	35	1
	Механоультразвукове оброблення	0,16	190	5,43
	Силове точіння	0,63	90	2,57

Продолжение таблицы 3

Покращення	Шліфування	0,8	56	1
	Механоультразвукове оброблення	0,16	180	3,21
	Силове точіння	0,63	150	2,68

Дані, отримані з випробовувань зразків з концентратором напружень, засвідчили незначне зниження корозійно-втомної витривалості порівняно з гладкими зразками (таблиця 2, 3), на відміну від помітнішого зменшення при силовому точінні. Це може бути пояснене сприятливішим розподілом внутрішніх напружень, що виникли в результаті механоультразвукового зміцнення порівняно з точінням.

Враховуючи, те що у розрахунках на міцність, як це показав В.П. Когаєв, на опір втомі зразків в умовах корозії впливає масштабний чинник, вивчали такий вплив на зміцнених механоультразвуковим обробленням зразках змінюючи їх діаметр від 10 до 30 мм.

Оскільки небезпечним перерізом штока є різь, то випробовування проводили на зразках з концентратором напружень. Результати випробовувань подані на рисунку 4. Одержані дані вказують на те, що зі збільшенням розмірів зразків в досліджуваних межах зростає корозійно-втомна витривалість. Причому в зразків, що пройшли покращення, спостерігається різкіше збільшення корозійно-втомної витривалості за рахунок сприятливішого співвідношення міцності і в'язкості матеріалу в поперечному перерізі.

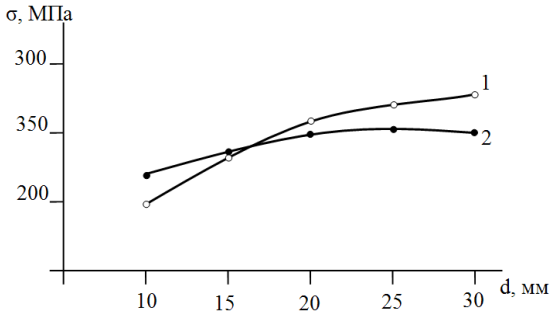


Рисунок 4 – Залежність корозійно-втомної міцності зразків з концентраторами зі сталі 40Х, зміцнених механоультразвуковим обробленням, від їх діаметру
1 – покращення, 2 – гартування + низький відпуск

Таким чином у результаті вивчення впливу структурних і механічних показників зміцнених механоультразвуковим обробленням зразків на механізм зародження тріщин встановлено наступне.

Механоультразвукове оброблення підвищує вміст вуглецю і карбідів та подрібнює й ущільнює мартенситну структуру зміцнених шарів, чим забезпечує підвищення опірності корозійному розтріскуванню сталі 40Х, з якої виготовляють штоки бурових насосів. Таке оброблення дає збільшення приблизно в 5,5 разів умовної границі корозійної втоми зразків загартованих і низько відпущених порівняно з шліфованими. При обробленні покращеної і нормалізованої сталі 40Х, – корозійно-втомна міцність збільшилася приблизно в 2-3,4 рази порівняно з шліфованими. Сформована мікрогеометрія поверхні досліджуваних сталей не має домінуючого значення при випробовуваннях на корозійно-втомну міцність в даних умовах. Проте менша шорсткість позитивно впливає на стійкість до корозійно-втомного руйнування. Зі збільшенням розмірів зразків в досліджуваних межах зростає корозійно-втомна витривалість. Причому в зразків, що пройшли покращення, спостерігається різкіше збільшення корозійно-втомної витривалості за рахунок сприятливішого співвідношення міцності і в'язкості матеріалу в поперечному перерізі.

З огляду на вищевказане є ефективним та перспективним використання механоультразвукового оброблення у технологічному процесі виготовлення штоків бурових насосів, яке слід проводити після операцій гартування і низького відпуску та покращення. При цьому відпадає необхідність у операціях шліфування.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Петрина Ю.Д. Вплив механоультразвукової обробки на опірність деталей нафтогазового обладнання корозійному розтріскуванню / Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким, А.В. Швадчак // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XII международной научно-технической конференции; Севастополь, 12–17 сентября 2005 г. В 5-х томах. — Донецк: ДонНТУ, 2005. — Т. 3. — С. 57–61.

2. Петрина Ю.Д. Вплив механоультразвукового зміцнення на корозійно-втомну міцність деталей машин нафтогазової промисловості / Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2005. — № 3 (16). — С. 76–80.

3. Петрина Ю.Д. Вплив механоультразвукової обробки на опір корозійному розтріскуванню деталей нафтогазової промисловості / Ю.Д. Петрина, А.В. Швадчак, І.М. Стоцький, С.Й. Тараєвський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2004. — № 3 (12). — С. 87–90.

4. Петрина Ю.Д. Оптимізація параметрів механоультразвукової зміцнюючої обробки деталей насосів та компресорів нафтогазової промисловості / Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким, А.В. Швадчак // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — 2005. — Т. 10. — № 3. — С. 65–71.

Надійшла до редакції 22.02.2012 р.

Петрина Д.Ю., Квас М.И., Яким Р.С. Обеспечение эксплуатационных показателей штоков поршневых буровых насосов механоультразвуковой упрочняющей обработкой

Анализируется влияние структурных и механических показателей укрепленных механоультразвуковым обрабатыванием образцов из стали 40Х на механизм зарождения трещин и установлены рекомендации для применения такого обрабатывания в технологическом процессе изготовления штоков буровых насосов.

Ключевые слова: механоультразвуковое укрепление, шток, буровой насос.

Petruna D.Yu., Kvas M.I., Yakym R.S. Establishing operating indices of piston bording pump rods by mechanical-ultrasonic atrengthening treatment

The influence of structural and mechanical indices of models made of 40X and strengthened by mechanical-ultrasonic treatment on the process of cracks appearing is analysed. Recommendations to the use of such treatment in the technological process of boring pup rods manufacturing are determined.

Keywords: mechanical-ultrasonic strengthening, rod, boring pump.