

УДК 621.787:620.194.8

ВПЛИВ МЕХАНОУЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НА КОРОЗІЙНО-ВТОМНУ МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Ю.Д.Петрина, Р.С.Яким

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024,
e-mail: public@nung.edu.ua

Установлено, что белые слои, полученные механоультразвуковой обработкой, эффективно повышают коррозионно-усталостную прочность среднеуглеродистой стали в присутствии бурового раствора. Микрогеометрия поверхности образцов не имеет ведущего влияния на коррозионно-механическую выносливость в буровом растворе с pH7 и ниже. Выявлено благоприятное влияние старения закаленной и низкоотпущенной стали 40X, упрочненной механоультразвуковой обработкой, на ее коррозионно-механическую выносливость в буровом растворе. При улучшении этой стали, наблюдали незначительное понижение коррозионно-механической выносливости.

На сьогоднішній день нафтогазова промисловість несе суттєві втрати через недостатню надійність і довговічність машин. Так, за весь період експлуатації затрати на їх ремонт та технологічне обслуговування через зношення та корозійно-втомне руйнування деталей у декілька разів перевищують вартість нової машини. Тому проблема підвищення стійкості деталей машин нафтогазової промисловості до корозійно-втомного руйнування є актуальною. Оскільки довговічність деталей машин здебільшого визначається технологічною спадковістю при утворенні їх робочих поверхонь [1, 2, 3], то постає питання вивчення ефективних методів технологічної зміцнюючої обробки. До найбільш перспективних сучасних методів зміцнення деталей машин нафтогазової промисловості належить механоультразвукова обробка [4], в процесі якої суттєво змінюються фізико-механічні, фізико-хімічні властивості поверхневих шарів та виникають специфічні структури, так звані білі шари [5]. Вплив механоультразвукової обробки на формування і структуру білих шарів досліджували такі вчені, як Бабей Ю.І., Петрина Ю.Д., Бережницька М.Ф. та ін.

Випробування на циклічну міцність зразків з середньовуглецевої сталі, зміцнених механоультразвуковою обробкою, показали [6], що визначальним фактором стійкості є мікрогеометрія поверхні. При цьому фізико-механічні властивості зміцнених шарів меншою мірою визначають циклічну міцність.

У роботі [5] встановлено підвищення корозійної втоми середньовуглецевої сталі в синтетичній морській воді до 84-97%. Спостерігали понижену травматичність білого шару, що забезпечувала його високий опір корозійно-втомному руйнуванню. Зроблено важливий висновок про те, що для малоциклової втоми є сприятливе

Clit is determined that the white layers obtained by mechanical ultra-sonic treatment increase effectively corrosive-fatiguing strength of medium-carbonic steel in boring solution presence. Microgeometry of the patterns surface doesn't have dominating influence on the corrosive-mechanical endurance in the boring solution with pH7 and lower. The positive influence of ageing on the hardened and low-tempered steel 40X strengthened by mechanical ultra-sonic treatment in the boring solution is shown. The slight lowering of corrosive-mechanical endurance was noticed in case of this steel improvement.

співвідношення міцності і в'язкості зміцненого металу.

Результати досліджень на корозійне розтріскування зразків з середньовуглецевої сталі, зміцнених механоультразвуковою обробкою, описані в [7]. Було встановлено, що опір корозійному розтріскуванню таких зразків в 20%-ному розчині сірчаної кислоти збільшується у 1,8 рази порівняно з шліфованими. При роботі деталей при температурах 150-200°C спостерігалось підвищення корозійної витривалості до 18%. Автори пояснювали це виділенням дрібнодисперсних карбідів та інтенсивним розпадом метастабільного залишкового аустеніту, а також великою гомогенізацією структури.

У [8] показано, що обробка ультразвуковим поверхневим пластичним деформуванням дає змогу формувати в поверхневих шарах напруження стиску з фазовим складом відбіленого шару. Ці види обробки рекомендується використовувати для усунення розтягуючих залишкових напружень.

Проте вплив механоультразвукового зміцнення на корозійно-втомну міцність деталей машин і обладнання нафтогазової промисловості вивчено ще явно недостатньо. У зв'язку з цим було поставлено завдання дослідити вплив механоультразвукового зміцнення на корозійно-втомну міцність в середовищі бурового розчину.

Для вирішення цієї проблеми були проведені втомні випробування зразків в присутності лабораторного бурового розчину, рекомендованого авторами [9] для використання при дослідженнях на корозійно-втомні випробування. Лабораторний буровий розчин складається з відстою водяного глинистого розчину (вміст твердої фази 5-7% по об'єму), мінералізованого 3%-ним вмістом NaCl з домі-

Таблиця 1 – Корозійно-втомна міцність сталей, зміцнених механоультразвуковою обробкою

Марка сталі	Термообробка	Метод створення білого шару	Шорсткість R_a , мкм	σ_{-1}^N , МПа	β , %
40X	Гартування + низький відпуск	Шліфування	0,32	4,5	100
		Механоультразвукова обробка	0,16	25	555
	Поліпшення	Шліфування	0,8	7	100
		Механоультразвукова обробка	0,16	24	342
45	Гартування + низький відпуск	Шліфування	0,32	7	100
		Механоультразвукова обробка	0,16	39	557
	Нормалізація	Шліфування	1,00	9	100
		Механоультразвукова обробка	0,16	17	190

$$\text{де } \beta = \frac{\sigma_{-1}(\text{білий шар})}{\sigma_{-1}(\text{вихідний})} \times 100\%$$

шками 5% конденсованої сульфат-спиртової барди і 0,5% піногасника П-79. Такий вибір був обґрунтований тим, що цей розчин, досить точно імітує властивості бурових розчинів, які найбільш широко використовуються при бурових роботах.

Випробовування здійснювали на машинах ИМА-30, що дають можливість випробовувати зразки діаметром 10-30 мм в робочій частині та чистим циклічним згином з частотою 50 Гц згідно з методикою, описаною в [10, 11]. Відповідно до цього при згині симетричним циклом в корозійному середовищі призначали $N=50 \times 10^6$ циклів навантаження. Прийнята база випробовувань дає змогу з достатньою достовірністю судити про характер кривих втоми в корозійних середовищах. Для випробовувань виготовляли зразки циліндричної форми діаметром 20 мм згідно з рекомендаціями [11].

Подачу середовища в зону робочої частини зразків при випробовуванні здійснювали капанням з частотою, яка забезпечує надійну змочуваність зразків, що обертаються.

Зразки виготовляли зі сталей 40X, 45, які широко використовуються в нафтогазовому машинобудуванні. Для зміцнення зразки попередньо піддавали гартуванню при $t = 850^\circ\text{C}$ (сталь 40X в масло, сталь 45 у воду) з подальшим низьким відпуском при $t = 180^\circ\text{C}$ та високим при $t = 560^\circ\text{C}$, а також проводили нормалізацію на повітрі. Добивалися для сталі 40X з високим відпуском твердості 30HRC, для низьковідпущеної — 50HRC. Сталь 45 після низького відпуску мала 48HRC, у випадку нормалізації отримували твердість 187HB.

Шорсткість поверхні перевіряли за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 згідно з відомою методикою [12].

Поверхню зламів досліджували на електронному мікроскопі УЭМ-100. Мікрофрактографічні дослідження проводили при збільшенні в 2700-7000 разів згідно з методикою, описаною в [13, 14].

Рентгеноструктурний аналіз здійснювали на зразках $6 \times 9 \times 15$ мм. Рентгенографування здійснювали в камері РКУ-114М методом шліфа при куті нахилу 27° на устаткуванні УРС-70 в залізному випромінюванні. Напруга на трубі становила 33 кВ. Концентрацію аустеніту визначали візуально методом гомологічних пар [15].

Механоультразвукову обробку здійснювали на верстаті 1К62 при подачі $S=0,11$ мм/об, навантаженні твердосплавного різця на зразок $P=1000$ Н, частоті обертів $n=630$ об/хв, глибині різання $t=0,02$ мм. Ультразвуковий вплив здійснювали за допомогою магнетострикційної головки з робочою частотою 20 кГц.

При дослідженнях спостерігали збільшення значення умовної межі корозійної втоми зразків з досліджуваних сталей, зміцнених механоультразвуковою обробкою (табл. 1).

Спостерігали збільшення приблизно в 5,5 рази умовної межі корозійної втоми зразків, загартованих і низьковідпущених порівняно з шліфованими (рис. 1).

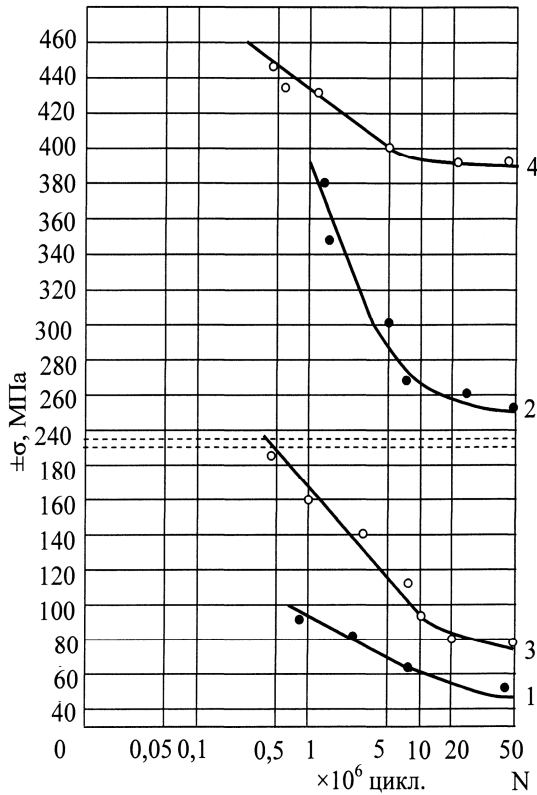
У випадку обробки поліпшених і нормалізованих сталей тих же марок корозійно-втомна міцність збільшилася приблизно в 2-3,4 рази порівняно з шліфованими (рис. 2).

Підвищення корозійно-втомної міцності зразків пояснюється дрібнозернистою структурою мартенситу білого шару.

Аналіз результатів засвідчив, що мікрогеометрія поверхні досліджуваних сталей не має домінуючого значення при випробовуваннях на корозійно-втомну міцність в даних умовах. (табл. 1).

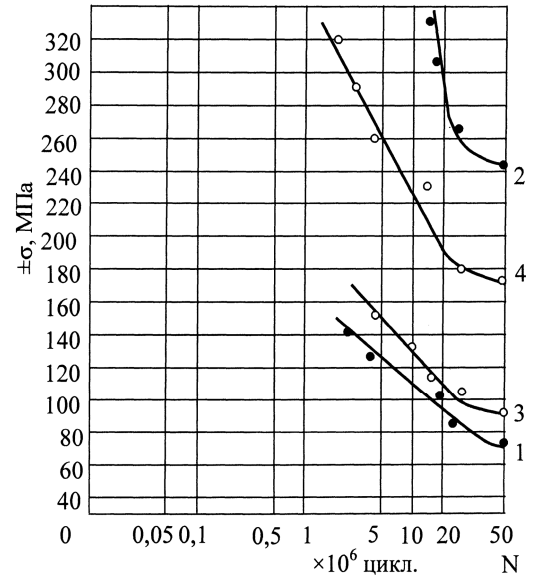
З огляду на сказане в нафтогазовому машинобудуванні є ефективним та перспективним використання механоультразвукової технологічної обробки при виготовленні деталей, що працюють в умовах корозійно-втомних навантажень.

Оскільки в процесі експлуатації деталі машин піддаються впливу високих температур, то



1 – Сталь 40X без білого шару;
 2 – Сталь 40X з білим шаром;
 3 – Сталь 45 без білого шару;
 4 – Сталь 45 з білим шаром

Рисунок 1 — Криві корозійно-втомної міцності зразків з загартованих сталей, зміцнених механоультразвуковою обробкою



1 – Сталь 40X (покращена) без білого шару;
 2 – Сталь 40X (покращена) з білим шаром;
 3 – Сталь 45 (нормалізована) без білого шару;
 4 – Сталь 45 (нормалізована) з білим шаром

Рисунок 2 – Криві корозійно-втомної міцності зразків з покращених та нормалізованих сталей, зміцнених механоультразвуковою обробкою

актуальним є питання впливу нагріву досліджуваних сталей, зміцнених механоультразвуковою обробкою, на їх корозійно-втомну витривалість. Зразки після механоультразвукового зміцнення піддавали старінню при температурі 150°C впродовж 2 годин і випробовували на корозійно-втомну міцність в буровому розчині.

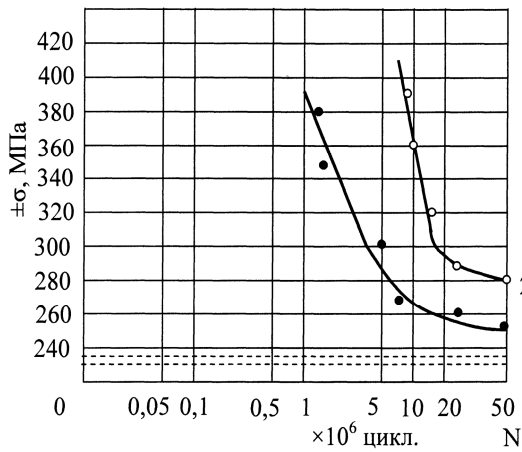
Дослідження впливу нагріву зразків зі сталі 40X (гартування, низький відпуск) з білим шаром, отриманим механоультразвуковою обробкою, на їх корозійно-втомну міцність засвідчили, що старіння білого шару призводить до незначного підвищення цієї характеристики (рис. 3).

При випробовуванні поліпшених зразків зі сталі 40X з білим шаром спостерігали незначне пониження корозійно-втомної міцності (рис. 4).

Фрактографічні дослідження поверхонь зламів в місці зародження і розвитку втомної тріщини показали, що загартовані і низьковідпущені сталі 40X (рис. 5), зміцнені механоультразвуковою обробкою, містять велику кількість слідів невеликих дуже дисперсних виступів і впадин, що свідчать про накопичення дуже дрібних порожнин-дефектів у процесі втомного навантаження. Об'єднання цих дефектів ста-

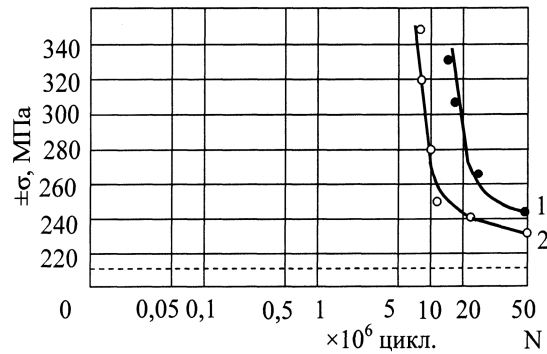
ється, очевидно, під впливом зсувної мікротрещини, про що свідчать граничні з цими областями ділянки розшарувань по площинах ковзання. Доказом того, що в зміцненому шарі розповсюдження втомної тріщини стається шляхом утворення регулярних дуже дрібних мікронадривів є рис. 5, б. На мікрофрактограмі видно щільно розташовані регулярні субмікротріщини, які розриваються сегментами безструктурних ділянок невідомого походження. Така мікробудова зламу відображає неоднорідність матеріалу з точки зору його здатності чинити опір розповсюдженню тріщин – локальні ділянки низького опору розповсюдженню тріщини (безструктурні) чергуються з ділянками більш високого опору (борозноподібні зони).

Рельєф поверхонь зламів втомного руйнування поліпшеної сталі 40X (рис. 6) формується в процесі накопичення дефектів типу мікротріщин, коалесценція яких призводить до утворення макротріщин. При цьому спостерігається також утворення дефектів типу порожнин. Розповсюдження втомної тріщини за межі зміцненого шару здійснюється при зародженні і коалесценції мікротріщин, спричиненого карбідними виділеннями, що проявляється в ямко-



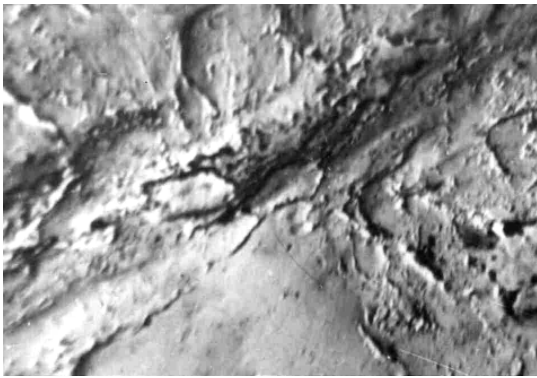
1 – Сталь 40X з білим шаром;
2 – Сталь 40X білий шар + старіння.

Рисунок 3 – Криві корозійно-втомної міцності зразків з загартованої і низьковідпущеної сталі 40X, зміцнених механоультразвуковою обробкою



1 – Сталь 40X з білим шаром;
2 – Сталь 40X білий шар + старіння.

Рисунок 4 – Криві корозійно-втомної міцності зразків з покращаної сталі 40X, зміцнених механоультразвуковою обробкою



а



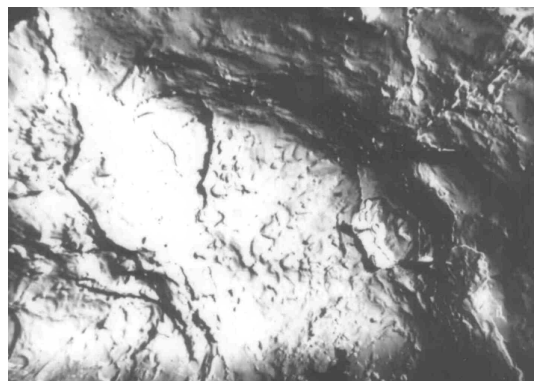
б

а - зміцнений шар, б - основний матеріал

Рисунок 5 — Мікрофрактограми ділянки втомного руйнування зразків зі сталі 40X, зміцнених механоультразвуковою обробкою після гартування і низького відпуску



а



б

а – зміцнений шар, б – основний матеріал

Рисунок 6 — Мікрофрактограми ділянки втомного руйнування зразків зі сталі 40X, зміцнених механоультразвуковою обробкою після покращення

вому рельєфі між борозноподібними зонами (рис. 6, б).

Рентгеноструктурні дослідження зміцнених механоультразвуковою обробкою зразків зі сталі 40X засвідчили незначне збільшення вмісту залишкового аустеніту порівняно з незміц-

неними (до 5%). Старіння зміцненого шару, отриманого механоультразвуковою обробкою, після гартування, низького відпуску чи поліпшення призводить до появи на рентгенограмах ліній карбідів, яких немає в зразках у вихідно-

му стані. Також на фоні аустеніту спостерігалася присутність мартенситу.

Отже, фізико-механічні властивості білих шарів, отриманих механоультразвуковою обробкою, забезпечують ефективне підвищення корозійно-втомної міцності середньовуглецевої сталі в присутності бурового розчину. Мікрогеометрія поверхні зразків не має домінуючого впливу на корозійно-механічну витривалість в буровому розчині з рН7 і нижче. Старіння загартованої і низьковідпущеної сталі 40X, зміцненої механоультразвуковою обробкою, здійснює позитивний вплив на її корозійно-механічну витривалість в буровому розчині. Поліпшення цієї сталі сприяє незначному зниженню корозійно-механічної витривалості, що зумовлено утворенням більш широких локальних втомних тріщин. Все це дає можливість зробити висновок про те, що старіння зразків, зміцнених механоультразвуковою обробкою, слабо впливає на корозійно-втомну витривалість, яка визначає довговічність деталей машин нафтогазової промисловості.

В подальшому актуальним є продовження вивчення впливу технологічної спадковості механоультразвукового зміцнення на стійкість до газообразного та ударнообразного зношення, якому піддаються деталі машин нафтогазової промисловості.

Література

1. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 256 с.
2. Надежность и долговечность машин / Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Бершадский Л.И., Караулов и др. / Под ред. Костецкого Б.И. – К.: Техніка, 1975. – 408 с.
3. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
4. Петрина Ю.Д., Яким Р.С., Швадчак А.В. Шляхи підвищення довговічності деталей машин насосів і компресорів нафтогазової промисловості // Нафта і газ України: Матеріали 8-ї міжнародної науково-практичної конференції „Нафта і газ України 2004”, Судак 29 вересня – 1 жовтня 2004. – 2004. – Т.2. – С.223-225.
5. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наукова думка, 1988. – 240 с.
6. Бабей Ю.И., Стоцкий И.М. Влияние механоультразвуковой обработки на циклическую прочность деталей // Состояние и перспективы промышленного освоения вибрационной обработки. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1974. – С.157-160.
7. Петрина Ю.Д., Швадчак А.В., Стоцкий И.М., Тарасевський С.И. Вплив механоультразвукової обробки на опір корозійному розтріскуванню деталей нафтогазової промисловості // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – №3(12). – С.87-90; Стоцкий И.М. Влияние механоультразвуковой обработки на сопротивление стали коррозионному растрескованию // Физико-химическая механика материалов. – 1980. – №6. – С.101-103.
8. Бережницкая М.Ф. Остаточные макро-напряжения, возникшие при импульсном упрочнении деталей // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – №3. – С.64-68.
9. Северинчик Н.А., Маснык О.Т., Копей Б.В. Коррозия и коррозионная устойчивость подземного бурового оборудования. – Львов: Вища школа, 1981. – 143 с.
10. Карпенко Г.В., Бабей Ю.И., Карпенко И.В., Гутман Э.М. Упрочнение стали механической обработкой / Под ред. Карпенко Г.В. – К.: Наукова думка, 1966. – 204 с.
11. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
12. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – К.: Наукова думка, 1984. – 272 с.
13. Романів О.М., Зима Ю.В., Карпенко Г.В. Електронна фрактографія зміцнених сталей. – К.: Наукова думка, 1974. – 208 с.
14. Изломы конструкционных сталей: Справочник / Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресьев М.М. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
15. Качанов Н.И., Миркин Л.И. Рентгеноструктурный анализ (поликристаллов). – М.: Машгиз, 1960. – 216 с.