

УДК 621.78:669.15'74-194

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.270421.70.743

## ПІДВИЩЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ ТРУБ НАФТОВОГО СОРТАМЕНТУ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

ЧМЕЛЬОВА В. С.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 ПЕРЧУН Г. І.<sup>2\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2\*</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659.

**Анотація. Постановка проблеми.** Розглянуто питання щодо шляхів підвищення конструкційної міцності труб нафтового сортаменту. Легування і термічна обробка середньолегованих сталей повинні забезпечувати: прогартованість на структуру мартенситу і нижнього бейніту за мінімального вмісту вуглецю ( $C \leq 0,3 \%$ ), високий опір крихкому руйнуванню і водневу окрихченню, формування рівномірно розподілених дрібнодисперсних карбідів і сульфідів округлої форми для зниження дифузійно-рухомого водню, що абсорбується сталлю. Запропоновано режими термічної обробки обсадних труб, що забезпечують необхідний рівень механічних та експлуатаційних властивостей і підвищення конструкційної міцності. **Методика.** Застосовано стандартні методики визначення механічних властивостей за розтягу, випробувань на динамічний вигин і дослідження зламів. **Результати.** Запропоновано режими термічної обробки обсадних труб категорії міцності E, L, що забезпечують необхідний рівень механічних та експлуатаційних властивостей. **Наукова новизна.** Проведено системний аналіз впливу різних чинників на конструкційну міцність труб нафтового сортаменту, що працюють в агресивному середовищі. Показано високий ступінь кореляції між величиною ударної в'язкості і в'язкою складовою у зламі. Запропоновано охолодження труб форсуноковим спреером конструкції кафедри термічної обробки металів НМетАУ, яке забезпечує високий опір крихкому руйнуванню за рахунок підвищення частки в'язкої складової та зміни мікрорельєфу чашкового зламу. **Практична значимість.** Запропоновано технологію термічної обробки труб нафтового сортаменту, що працюють в агресивному середовищі, яка забезпечує необхідний рівень механічних властивостей та стійкість проти сірководневого розтріскування.

**Ключові слова:** конструкційна міцність; труби нафтового сортаменту; легування; термічна обробка; категорії міцності; температурно-деформаційні параметри; сірководневе розтріскування; опір крихкому руйнуванню

## INCREASING THE CONSTRUCTION STRENGTH OF PETROLEUM PIPES OPERATING IN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

CHMELIOVA V.S.<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
 PERCHUN H.I.<sup>2\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

<sup>1</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Naharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2\*</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Naharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Abstract. Purpose.** Questions about ways to increase the structural strength of oil country tubular goods are considered. Alloying and heat treatment of medium-alloy steels should ensure: pro-carbonization to the structure of martensite and lower bainite with a minimum carbon content ( $C \leq 0.3 \%$ ), high resistance to brittle fracture and hydrogen embrittlement, the formation of uniformly distributed finely dispersed carbides and sulphides of a round shape to reduce diffusion mobile hydrogen is absorbed by steel. Propose modes of thermal treatment of casing pipes that provide the required level of mechanical and operational properties. **Methodology.** We used standard techniques for determining the mechanical properties in tension, dynamic bending tests and fracture studies. **Results.** The modes of heat treatment of casing pipes of strength category E, L are proposed, which provide the required level of mechanical and operational properties and an increase in structural strength. **Originality.** A systematic analysis of the influence of various factors on the structural strength of oil country tubular goods operating in an aggressive environment has been

carried out. The highest degree of correlation between the value of the impact toughness and the tough component in the fracture is shown. Cooling of pipes with a nozzle sprayer of the design of the Department of Heat Treatment of Metals of NMetAU, which provides high resistance to brittle fracture by increasing the proportion of the viscous component and changing the microrelief of the cup fracture. **Practical value.** The proposed technology of heat treatment of oil pipes, working in an aggressive environment, provides the required level of mechanical properties and resistance to hydrogen sulfide cracking.

**Keywords:** *structural strength; oil country tubular goods; alloying; heat treatment; strength categories; temperature and deformation parameters; hydrogen sulfide cracking; brittle fracture resistance*

**Конструкційна міцність** – комплексна характеристика реалізації механічних властивостей металу (сплаву) у готовому виробі за даних умов експлуатації.

Відмітні риси конструкційної міцності (порівняно з механічними властивостями зразків у лабораторних випробуваннях):

1. Комплексність.
2. Урахування впливу масштабного фактора.
3. Статистична природа.
4. Вплив жорсткості конструкції.
5. Вплив запасу пружної енергії.
6. Вплив фактора часу експлуатації.

1. **Конструкційна міцність** як комплексна характеристика механічних властивостей, як правило, визначається не однією, а сполученням усіх чотирьох груп механічних властивостей – опором деформації, опором руйнуванню, пружністю і пластичністю, причому, залежно від конкретних умов конструктивного оформлення виробу та умов його експлуатації, одна із груп може мати переважне значення.

Особлива роль характеристик опору руйнуванню для конструкційної міцності визначається повною втратою несної здатності під час руйнування і переважним впливом факторів на характеристики опору руйнуванню.

**2. Вплив масштабного фактора на конструктивну міцність** зумовлений значним розходженням у масах реальних виробів і зразків, відповідно – зростанням ролі різних неоднорідностей і пружної енергії, що запасається під час навантаження.

**3. Статистична природа конструкційної міцності** тісно пов'язана із впливом масштабного фактора та зумовлена:

1) наявністю точно не зумовлених розподілів механічних властивостей металу (сплаву) й експлуатаційних напруг (у зв'язку з ліквідацією хімічного складу, структури, неоднорідного напруженого стану);

2) наявністю неврахованих факторів експлуатації;

3) зміною зазначених у п. 1 розподілів за часом.

**4. Жорсткість конструкції функціональна** визначається збереженням (зі зміною в припустимих розмірах) форми та розмірів, за яких вироб може бути використаний за функціональним призначенням. Недостатня функціональна жорсткість спричинює втрати стійкості форми і розмірів.

Функціональна жорсткість конструкції зростає зі збільшенням відношення модуля пружності до діючих експлуатаційних напруг і збільшенням жорсткості з'єднання частин конструкції.

**Жорсткість конструкції енергетична** визначається величиною пружної енергії, що запасається, у зв'язку з конструктивними особливостями виробу: способом з'єднання частин конструкції й наявністю або відсутністю зовнішнього демпфірування (створення умов для «стоку» пружної енергії шляхом конструктивних заходів). Зростає зі збільшенням жорсткості з'єднання частин конструкції та зі зменшенням зовнішнього демпфірування.

**5. Запас пружної енергії в конструкції** визначається системою залишкових напруг у готовому виробі в сполученні з рівнем силового впливу на нього під час експлуатації. Зростає зі збільшенням маси (об'єму) виробу, енергетичної жорсткості конструкції, зі зменшенням здатності до внутрішнього демпфірування (розсіювання пружної енергії за рахунок різних

релаксаційних процесів усередині металу) і пропорційний квадрату діючих експлуатаційних напруг.

**Вплив запасу пружної енергії** – підвищення запасу пружної енергії знижує конструктивну міцність в основному за рахунок зниження опору руйнуванню.

**Вплив енергетичної жорсткості конструкції** – підвищення енергетичної жорсткості конструкції знижує конструкційну міцність за рахунок збільшення пружної енергії, що запасується, а в разі перетворення конструкції на моноліт також внаслідок відсутності переривчастості у розвитку тріщин.

Для підвищення конструкційної міцності труб нафтового сортаменту хімічний склад та структура повинні забезпечити:

- високий опір крихкому руйнуванню, щоб тріщина, що зароджується під час крихкого руйнування, не розвивалася;

- запобігання утворенню місць можливої локалізації водню, зниження рівня залишкових напружень для запобігання зародженню тріщини;

- зниження кількості водню, що проникає в сталь за рахунок утворення поверхневого захисного шару.

Легування і термічна обробка середньолегованих сталей повинні забезпечувати: прогартованість на структуру мартенситу і нижнього бейніту за мінімального вмісту вуглецю ( $C \leq 0,3 \%$ ), високий опір крихкому руйнуванню і водневому окрихченню, формування рівномірно розподілених дрібнодисперсних карбідів і сульфідів округлої форми для зниження дифузійно-рухомого водню, що абсорбується сталлю.

Система легування цих сталей включає елементи, масова частка (%) яких така:  $C \leq 0,3$ ;  $Mn \leq 1,2$ ;  $Cr \leq 1,5$ ;  $Ni \leq 1$ ;  $Mo \leq 1 + [\Sigma(V, Nb, Al, N_2) \leq 0,15 + P_3M + Ca \leq 0,1 + (P \leq 0,015, S \leq 0,010)]$ .

Нікель у кількості до 1 % підвищує опір сталі водневому окрихченню, нікель в кількості більше 1 % знижує опір водневому окрихченню, що зумовлено підвищенням оклюзійної здатності сталі.

Карбідотвірні елементи підвищують опір в'язкому руйнуванню і водневому окрихченню. Опір крихкому руйнуванню підвищується тільки за оптимального значення карбідотвірних елементів. Домішки: фосфор (P), сурма (Sb) й олово (Sn) сприяють розвитку в сталі, що поліпшується, процесів оборотної відпускної крихкості. Сірка утворює сульфід марганцю, що знижує стійкість до водневого окрихчення ( $t_p$ ) – триває накопичення водню на межі розділу сульфід – матриця. Модифікування рідкоземельними металами (РЗМ) або кальцієм (Ca) проводиться для глобуляризації сульфідних включень. Мідь (Cu)  $\leq 0,5 \%$  на поверхні сталі сприяє утворенню захисної плівки, яка перешкоджає проникненню в сталь водню, за рахунок чого зростає стійкість до водневого окрихчення.

Ця система легування стала основною у розробленні низки середньолегованих конструкційних сталей, стійких до водневого окрихчення у сірководнеумісних середовищах.

Для виготовлення обсадних труб категорії міцності E ( $\sigma_{0,2} \geq 549$  МПа) використовується сталь 18Х1ГМФА. Після гарту і високого відпуску в сталі забезпечується необхідний рівень механічних властивостей ( $\sigma_{0,2} > 549$  МПа,  $\sigma_B > 647$  МПа,  $\delta_5 > 18 \%$ ,  $\psi > 70 \%$ ), а також опір крихкому і в'язкому руйнуванню ( $T_{50} = -110$  °C,  $KCU = 2,1$  МДж/м<sup>2</sup> за 100 °C). Досягається необхідна стійкість проти сірководневого розтріскування – 720 годин за напруги 440 МПа ( $0,8\sigma_{0,2}$ ).

Мікроструктура складається із продуктів відпуску рейкового мартенситу; в практично повністю полігонізованій матриці рівномірно розподілені карбіди округлої форми. Режим термічної обробки обсадних труб категорії міцності E зі сталі 18Х1ГМФА наведений на рисунку 1. Охолодження під час загартування здійснюється водяним форсуноковим спреєром (конструкція кафедри термічної обробки металів НМетАУ), що забезпечує швидкість охолодження понад 40 °C/с.

Для труб вищої категорії міцності Л ( $\sigma_{0,2} \geq 657$  МПа) використовується сталь 25ХМАФБ4, яка в порівнянні зі сталлю 18Х1ГМФА додатково модифікована ніобієм, азотом та РЗМ. За рахунок карбонітридних частинок досягається додаткове подрібнення аустенітного зерна (№12-14). Обробка РЗМ дозволяє глобулізувати сульфідні включення. В результаті за підвищеного рівня міцності зберігається високий опір крихкому руйнуванню ( $T_{50} \leq -100$  °С) і достатня

стійкість проти сірководневого розтріскування – 720 годин за напруги 520 МПа, що становить  $0,8\sigma_{0,2}$ .

Для бурильних труб категорії міцності Л ( $\sigma_{0,2} \geq 657$  МПа) використовується сталь 28Х2МФБД, яка порівняно зі сталлю 25ХМАФБ4 вміщує дещо більше вуглецю і хрому для підвищення прогартуваності висаджених кінців труб і мідь (~0,5 %) для підвищення стійкості проти сірководневого розтріскування і корозії.

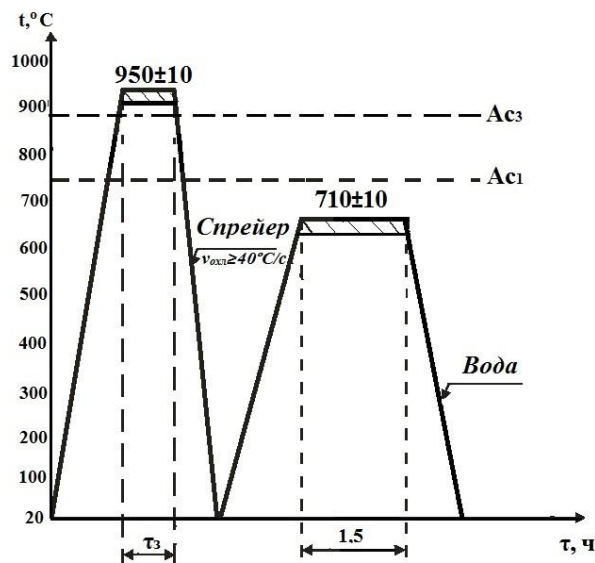


Рис. 1. Режим термічної обробки обсадних труб зі сталі 18Х1ГМФА :  
 $\tau_3$  – час витримки за нагріву під загартування залежно від товщини стінки труби

Після термічної обробки забезпечується високий опір пластичній деформації ( $\sigma_{0,2} > 657$  МПа,  $\sigma_B > 755$  МПа), необхідна пластичність ( $\delta_5 > 12$  %,  $\psi > 40$  %), високий опір в'язкому і крихкому руйнуванню ( $KCU_{-100} \geq 0,5$  МДж/м<sup>2</sup>,  $T_{50} = -70$  °С), а також високий опір сірководневому розтріскуванню – 720 годин за  $\sigma_{0,2} = 550 \dots 730$  МПа.

Для вибору легованої сталі і технології виготовлення з неї нафтогазопровідних труб підвищеної корозійної стійкості необхідно керуватися додатковими даними:

– про корозійну активність нафтопромислових середовищ: вміст у них агресивних компонентів (хлоридів, вуглекислого газу, вуглекислоти, сірководню), їх кислотності, температури, тиску та ін.;

– про вплив хімічного складу сталі (легуючих елементів і домішок) на опір труб корозійному впливу нафтопромислових середовищ;

– про вплив температурно-деформаційних параметрів виготовлення труб на їх мікроструктуру, корозійні і механічні властивості.

Високі темпи відбору нафти з вилученням величезної кількості високомінералізованих пластових вод, всезростаючі обсяги закачування в нафтові пласти агресивних стічних вод, а також широке застосування хімічних реагентів для збільшення нафтовіддачі пластів, спричинюють прискорений корозійний й ерозійний знос нафтопромислового обладнання й особливо нафтопроводів, водоводів для підтримки пластового тиску,

трубопроводів для перекачування солоних пластових вод, викидних трубопроводів, систем скидання води і нафтогазозбору та інших видів нафтового обладнання.

Аналіз літератури свідчить про переважний вплив на аварійність промислових трубопроводів внутрішньої корозії (до 90 % випадків), причини якої – наявність у нафтовому газі і пластових водах, що видобуваються спільно з нафтою, корозійно-агресивних елементів: сірчистих і кисневих сполук нафти, сірководню і

вуглекислого газу, а також мінеральних солей, переважно хлорид-іонів.

Найбільш поширені види корозії нафтогазопровідних труб такі: виразкова, зумовлена дією хлорид-іонів, збільшення концентрації яких спричинює безперервне зростання швидкості корозії вуглецевих сталей; вуглекислотна, зумовлена підвищеним вмістом у водній фазі розчиненого вуглекислого газу, кисню і бікарбонатних іонів; водневе і сульфідне корозійне розтріскування, що відбувається в сірководневмісному середовищі.

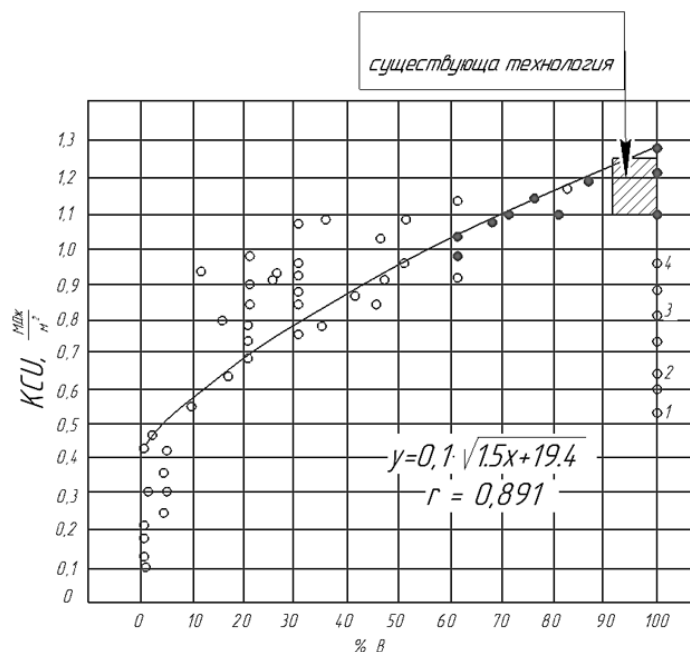


Рис. 2. Співвідношення між величиною ударної в'язкості та часткою в'язкої складової у зламі

Контакт металу з сірководневмісними водними середовищами супроводжується загальною та локальною корозією, а також наводненням. Останнє вважається найбільш небезпечним, оскільки ініціює розвиток сульфідного корозійного розтріскування під напругою і водневого розтріскування.

Негативно впливає на корозійну стійкість труб із вуглецевих сталей в нафтопромислових середовищах підвищений вміст марганцю, який збільшує ліквідаційну неоднорідність, сприяє утворенню на поверхні труб у процесі експлуатації пухких продуктів корозії зі слабкою адгезією. Під час їх відшарування

утворюються гальванопари метал – продукти корозії, і, як наслідок, – виразкова корозія, яка за наявними даними може досягати 8 мм/рік. Крім того, підвищений вміст марганцю спричинює утворення шкідливих із точки зору стійкості до сульфідного корозійного розтріскування під напругою і водневого розтріскування сульфідів марганцю.

Відповідно до даних провідних зарубіжних фірм, добавка в сталь 1...2 % хрому підвищує корозійну стійкість труб у вуглекислотних і хлоридумісних середовищах і, отже, термін експлуатації буде в 2...4 рази і більший. Це пояснюється

міграцією хрому з обсягу сталі на межу розділу сталь – осад (продукти корозії) і подальшим переходом до складу продуктів корозії.

Для забезпечення стійкості до сульфідного корозійного розтріскування, як правило, необхідна дрібнозерниста структура сталі з дрібнодисперсними виділеннями карбідів, яка досягається гартуванням і відпуском труб.

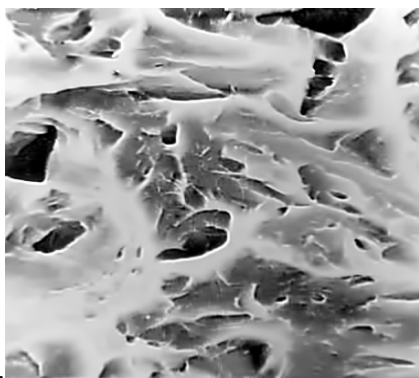
Співвідношення між величиною ударної в'язкості (КСУ) та часткою в'язкої складової в зламі (% В) після термічної обробки обсадних труб зі сталі 18Х1ГМФЛ наведено на рисунку 2. Існує високий ступінь кореляції між величиною ударної в'язкості та часткою в'язкої складової у зламі, коефіцієнт кореляції ( $r$ ) дорівнює 0,891. Ця залежність апроксимується рівнянням типу параболі:  $y = 0,1 \cdot \sqrt{1,5x + 19,4}$ , де  $y$  – значення ударної в'язкості, МДж/м<sup>2</sup>;  $x$  – частка в'язкої складової в зламі, %.

Хоча величина ударної в'язкості для обсадних труб і не обумовлюється стандартом, для технології термічного зміцнення, що використовується та

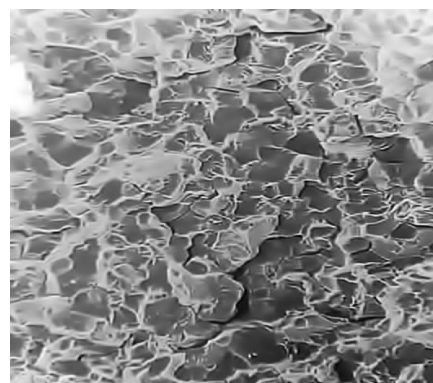
відпрацьовується, ударна в'язкість непрямо гарантується одержанням відповідних рівнів інших властивостей. Це підтверджується досвідом тривалої експлуатації обсадних труб. У відпрацюванні нової технології таку характеристику як ударна в'язкість необхідно включати в комплекс механічних властивостей для оцінювання можливості заміни розробленої раніше технології на нову.

Фрактограми зламу металу обсадних труб зі сталі 18Х1ГМФЛ, оброблених за існуючим та вдосконаленим режимами термічної обробки, наведені на рисунку 3. Із фрактограм ми бачимо, що злами сталі, яка досліджується, в'язкі та характеризуються чашковою будовою. Підвищення ударної в'язкості супроводжується переходом від фасеток крихкого сколу до чашкової будови зламу.

Подальше підвищення ударної в'язкості характеризується не тільки підвищенням частки в'язкої складової, а і зміною мікрорельєфу чашкового зламу: чашки стають більш «глибокими», а лінійний розмір чашок зменшується, що підвищує конструкційну міцність труб нафтового сортаменту.



а



б

Рис. 3. Фрактограми зламу металу обсадних труб зі сталі 18Х1ГМФЛ, що термічно зміцнені за існуючою (а) та вдосконаленою (б) технологією,  $\times 2000$

## Висновки

1. Для підвищення конструкційної міцності труб нафтового сортаменту хімічний склад та структура повинні забезпечити: високий опір крихкому руйнуванню, щоб тріщина, яка зароджується

під час крихкого руйнування, не розвивалася; запобігання утворенню місць можливої локалізації водню, зниження рівня залишкових напружень для запобігання зародженню тріщини; зниження кількості

водню, що проникає в сталь за рахунок утворення поверхневого захисного шару.

2. Легування і термічна обробка середньолегованих сталей повинні забезпечувати: прогартованість на структуру мартенситу і нижнього бейніту за мінімального вмісту вуглецю ( $C \leq 0,3 \%$ ), високий опір крихкому руйнуванню і водневому окрихченню, формування рівномірно розподілених дрібнодисперсних карбідів і сульфідів округлої форми для зниження дифузійно-рухомого водню, що абсорбується сталлю.

3. Вибираючи леговану сталь і технології виготовлення з неї нафтогазопровідних труб підвищеної корозійної стійкості, необхідно керуватися додатковими даними: про корозійну активність нафтопромислових середовищ – уміст у них агресивних компонентів (хлоридів, вуглекислого газу, вуглекислоти, сірководню), їх кислотність, температуру,

тиск та ін.; про вплив хімічного складу сталі (легуючих елементів і домішок) на опір труб корозійному впливу нафтопромислових середовищ; про вплив температурно-деформаційних параметрів виготовлення труб на їх мікроструктуру, корозійні і механічні властивості.

4. Після загартування з охолодженням водяним форсунковим спреєром зі швидкістю охолодження не нижче  $40 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$  та високого відпуску у труб нафтового сортаменту забезпечується необхідний рівень механічних властивостей і необхідна стійкість проти сірководневого розтріскування – 720 годин за напруги  $0,8\sigma_0,2$ .

5. Охолодження водяним форсунковим спреєром забезпечує необхідну конструкційну міцність та супроводжується переходом від фасеток крихкого зламу до чашкової будови зламу.

### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали : учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : МИСИС, 1999. 408 с.
2. Арзамасов Б. Н., Макарова В. И., Мухин Г. Г. и др. Материаловедение : учеб. для вузов. Под общ. ред. Арзамасова Б. Н., Мухина Г. Г. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 648 с.
3. Меськин В. С. Основы легирования стали. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Metallurgiya, 1964. 684 с.
4. Гуль Ю. П., Чмелёва В. С., Ивченко А. В. и др. Перспективные направления развития технологий термического упрочнения труб нефтяного сортамента. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Вып. 80. 2015. С. 128–134.
5. Бойко Р. А., Чмелёва В. С., Кимстач Т. В. Термическая обработка изделий из среднелегированных сероводородостойких конструкционных сталей. Молоді вчені-2019 – від теорії до практики : X Міжнар. конф. молод. вчен. Дніпро, 2019. С. 14–16.

### REFERENCES

1. Goldshteyn M.I., Grachev S.V. and Veksler Yu.G. *Spetsialnyie stali : uchebnik dlya vuzov* [Special steels : textbook for universities]. Moscow : MISIS Publ., 1999, 408 p. (in Russian).
2. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mulin G.G. and oth. *Materialovedenie : uchebnik dlya vuzov. Pod obsch. red. B.N. Arzamasova, G.G. Mikhina* [Materials science : textbook for universities. Total. ed. by Arzamasov B.N., Mukhina G.G.]. Moscow : Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001, 648 p. (in Russian).
3. Meskin V.S. *Osnovyi legirovaniya stali* [Basics of alloying steel]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1964, 684 p. (in Russian).
4. Gul Yu.P., Chmeleva V.S., Ivchenko A.V. and oth. *Perspektivnyie napravleniya razvitiya tehnologiy termicheskogo uprochneniya trub neflyanogo sortamenta* [Prospective directions of development of technologies for thermal hardening of oil country tubular goods]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. No. 80, 2015, pp. 128–134. (in Russian).
5. Boyko R.A., Chmeleva V.S. and Kimstach T.V. *Termicheskaya obrabotka izdeliy iz srednelegirovannykh serovodorodostoykikh konstruksionnykh staley* [Heat treatment of products made of medium-alloyed hydrogen sulfide-resistant structural steels.]. *MolodI vchenI 2019 – vId teorii do praktiki : X Mizhnarodna konferentsiya molodih vchenih* [Youth 2019 – from theory to practice : X International conference of young scholars]. Dnipro, 2019, pp. 14–16. (in Russian).

Надійшла до редакції : 02.04.2021.