

УДК 620.179.14

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260319.13.296

СПОСІБ ПОЛІПШЕННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРУБ З НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

БОЛЬШАКОВ В. І.¹, *д. т. н., проф.*,
 ДЕРГАЧ Т. О.^{2*}, *д. т. н.*,
 СУХОМЛИН Г. Д.³, *д. т. н., проф.*

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(056)745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(050)867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID 0000-0003-0235-5342

³ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(050)657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Анотація. *Мета роботи* – підвищення властивостей труб та іншого прокату з низьколегованих сталей шляхом застосування науково обгрунтованої технології термічної обробки. *Методики.* Дослідження мікроструктури і тонкої структури труб з низьколегованих сталей здійснювали методами світлової і електронної мікроскопії; корозійні випробування зразків труб проводили за методикою NACE TM 0177; визначення механічних властивостей – шляхом випробувань на розтягування і ударний вигин при від'ємних температурах. *Результати.* Розроблено і випробувано на трубах з низьколегованих сталей 06X1-У і 30ХМА новий режим термічної обробки, який включає гартування і короткочасний подвійний високий відпуск за температур (°С): (Ac₃ – 10) + (Ac₃ – 30), наближених до температур початку α→γ перетворень. Розробка дозволила підвищити тривкість проти сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН) і характеристики міцності труб при збереженні їх високої пластичності. *Наукова новизна.* Вперше методом електронної мікроскопії, мікродифракції і подвійних стереографічних проєкцій в мартенситних і бейнітних структурах низьколегованих сталей знайдено спеціальні низькоенергетичні границі (СГ). Доведено, що СГ зберігаються в структурі сталей після термічної обробки за розробленою технологією. *Практична значимість.* Розробка дозволяє поліпшувати властивості труб та іншого прокату з низьколегованих сталей та може бути здійснена на діючому обладнанні заводів без додаткових капітальних витрат.

Ключові слова: низьколеговані сталі; труби; термічна обробка; гартування; відпуск; мікроструктура; спеціальні границі зерен; корозійна тривкість; механічні властивості

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТРУБ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, *д. т. н., проф.*,
 ДЕРГАЧ Т. А.^{2*}, *д. т. н.*,
 СУХОМЛИН Г. Д.³, *д. т. н., проф.*

¹ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38(056)745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38(050)867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID 0000-0003-0235-5342

³ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38(050)657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Аннотация. *Цель работы* – повышение свойств труб и другого проката из низколегированных сталей путем применения научно обоснованной технологии термической обработки. *Методики.* Исследование микроструктуры и тонкой структуры труб из низколегированных сталей осуществляли методами световой и электронной микроскопии; коррозионные испытания образцов труб проводили по методике NACE TM 0177; определение механических свойств – путем испытаний на растяжение и ударный изгиб при отрицательных температурах. *Результаты.* Разработан и опробован на трубах из низколегированных сталей 06X1-У и 30ХМА новый режим термической обработки, который включает закалку и

кратковременный двойной высокий отпуск при температурах ($^{\circ}\text{C}$): $(A_{c1} - 10) + (A_{c1} - 30)$, приближенных к температуре начала $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения. Разработка позволяет повысить стойкость против сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением (СКРН) и характеристики прочности труб при сохранении их высокой пластичности. **Научная новизна.** Впервые методом электронной микроскопии, микродифракции и двойных стереографических проекций в мартенситных и бейнитных структурах низколегированных сталей найдены специальные низкоэнергетические границы (СГ). Доказано, что СГ сохраняются в структуре сталей после термической обработки по разработанной технологии. **Практическая значимость.** Разработка позволяет улучшать свойства труб и другого проката из низколегированных сталей и может быть осуществлена на действующем оборудовании заводов без дополнительных капитальных затрат.

Ключевые слова: низколегированные стали; трубы; термическая обработка; закалка; отпуск; микроструктура; специальные границы зерен; коррозионная стойкость; механические свойства

METHOD OF IMPROVING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PIPES FROM LOW-ALLOY STEELS

BOLSHAKOV V.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DERGACH T.O.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.)*,
SUKHOMLIN G.D.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

¹ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel.+38(056)745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (050) 8673097, ta_dergach@i.ua, ORCID ORG 0000-0003-0235-5342

³ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(050)657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Abstract. Purpose – increase of properties of pipes and other rolled products from low-alloy steels by application of scientifically reasonable technology of heat treatment. **Methodologies.** Research of micro- and fine structure of pipes from low-alloy steels was carried out by the methods of light and electron microscopy, the corrosive tests of standards of pipes are conducted on methodology of NACE TM 0177; determination of mechanical properties – by tests on a stretch and shock bend at negative temperatures. **Results.** It is worked out and tested on pipes from low-alloy steels 06X1-Y and 30XMA new mode of heat treatment, that includes tempering and brief double tempering at high temperatures ($^{\circ}\text{C}$): $(A_{c1} - 10) + (A_{c1} - 30)$, close to the start temperature of $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation. Development allows to promote resistance against the sulfide corrosive cracking under tension and descriptions of durability of pipes at maintenance of high plasticity. **Scientific novelty.** First by the method of electronic microscopy, microdiffraction and double stereography projections the special low-energy CSL grain boundary (SGB) are found in the martensite and bainite structures of low-alloy steels. It is well-proven that SGB is saved in the structure of steels after heat treatment on the worked out technology. **Practical utility.** Development allows to improve properties of pipes and other rolled products from low-alloy steels and can be carried out on the operating equipment of plants without additional capital costs.

Keywords: low-alloy steel; pipe; heat treatment; tempering; microstructure; special grain boundary; corrosive firmness; mechanical properties

Вступ

Відомо, що для підвищення стійкості труб нафтогазового сортаменту з низьколегованих сталей проти сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН), вони мають володіти дрібнозернистою структурою з рівномірно розподіленими в ній дисперсними сфероїдизованими карбідами. Низка відомих способів термічної обробки прокату і труб нафтогазового сортаменту, що включає гартування і відпуск, а також інші види температурно-деформаційних обробок [1–10], не гарантують високу тривкість сталей проти СКРН при напруженні $\sigma_p \geq 0,85 \sigma_{0,2}$, що пред'являються сучасними вимогами до виробів, які експлуатуються в сірководень вмісних середовищах з вмістом до 5 % сірководню.

Для виробництва насосно-компресорних труб (НКТ) підвищеної тривкості проти СКРН ($\sigma_p \geq 0,8 \sigma_{0,2}$ при випробуванні за методом NACE TM 0177) у зарубіжній практиці застосовують сталь AISI 4130 (30XMA), яку піддають гартуванню з наступним високим тривалим відпуском при температурі 700°C протягом 60 хвилин [3]. Заводи України, які виготовляють труби нафтогазового сортаменту, для термічної обробки труб застосовують секційні печі, в яких час витримки не перевищує 10...12 хвилин, що унеможливило отримання труб необхідної якості.

Мета роботи – поліпшення властивостей труб та іншого прокату, з низьколегованих сталей шляхом застосування науково обгрунтованої технології термічної обробки.

Матеріали і методи досліджень

Для проведення досліджень було застосовано зразки нафтогазо-провідних труб зі сталі 06Х1-У і насосно-компресорних (НКТ) труб зі сталі 30ХМА. Структуру сталей досліджували методами світлової та просвічуючої електронної мікроскопії. Корозійні випробування труб на тривкість проти СКРН здійснювали за методикою NACE TM 0177, визначення механічних властивостей, – випробуваннями на розтягування і ударний вигин при від’ємних температурах.

Результати досліджень

Проведеними дослідженнями встановлено, що для забезпечення знеміцнювання сталей 30ХМА і 06Х1-У при короткочасному відпуску протягом 10 хвилин, температура відпуску має бути не нижчою 750°C (рис. 1). Через близькість цієї температури до критичних температур початку фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення A_{c1} досліджуваних сталей та існування внаслідок цього ймовірності утворення в їх структурі ділянок невідпущеного мартенситу (особливо це стосується сталей з підвищеним вмістом вуглецю), що різко знижує тривкість проти СКРН і ударну в’язкість при від’ємних температурах), запропоновано після першого короткочасного високого відпуску при температурі $t_1 = A_{c1} - 10^\circ C$ ($\approx 750^\circ C$), здійснювати другий короткочасний відпуск при $t_2 = A_{c1} - 30^\circ C$ ($\approx 720^\circ C$) [10; 11]. Перший відпуск при 750 °С, 10 хв., сприяє прискореному протіканню дифузійних процесів у загартованих сталях і швидкому виділенню дисперсних, рівномірно розподілених в їх структурі карбідів заліза, хрому, молібдену й інших карбідотворюючих елементів. Другий відпуск при 720 °С, 10 хв., сприяє додатковій коагуляції і сфероїдизації карбідів, що виділилися при першому відпуску й забезпечує відсутність в структурі сталі невідпущеного мартенситу, утворення якого не виключено у разі перевищення при першому відпуску температури A_{c1} , що можливо в умовах масового виробництва продукції.

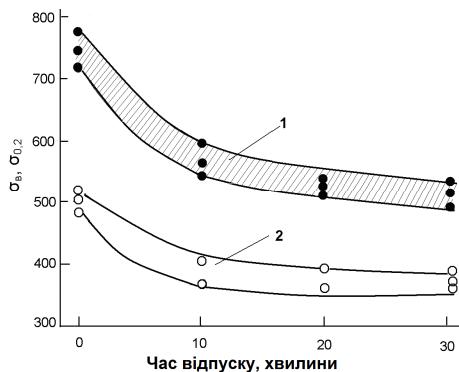


Рис. 1. Вплив часу відпуску при 750 °С на міцність сталі 06Х1-У: σ_y (область 1) і $\sigma_{0,2}$ (область 2) / Fig. 1. Influence of time of tempering at 750 °С on durability of steel of 06Cr1-U: σ_y (1), $\sigma_{0,2}$ (2)

Дослідження структури сталей 06Х1-У і 30ХМА, підданих гартуванню від 900 °С і наступному відпуску, показали, що після гартування вона представлена рейковим мартенситом і голчастим феритом. Металографічними і електронно-мікроскопічними дослідженнями методом екстракційних реплік встановлено, що після короткочасного подвійного високого відпуску структура сталі 06Х1-У представлена відпущеним мартенситом з дисперсними (середнім розміром 83 нм) сфероїдизованими рівномірно розподіленими в ньому карбідами (рис. 2 а, б і с, лінія 2).

Після тривалого відпуску при 700 °С карбіди були більш грубодисперсними, середнім розміром 105 нм (рис. 2 с, лінія 1), – внаслідок їх більшої коалесценції.

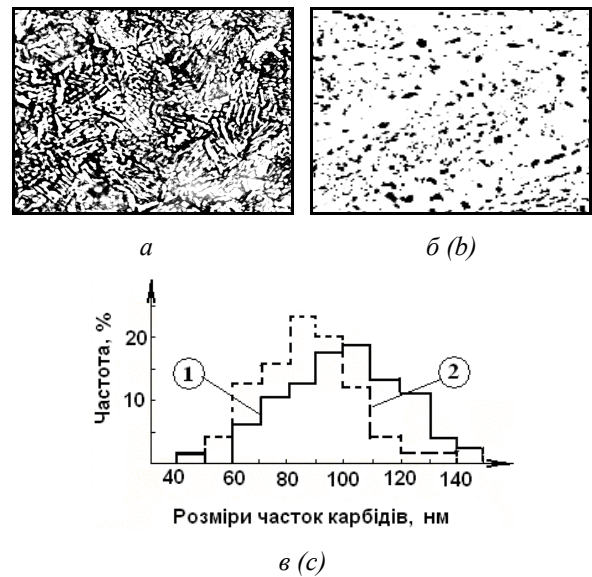
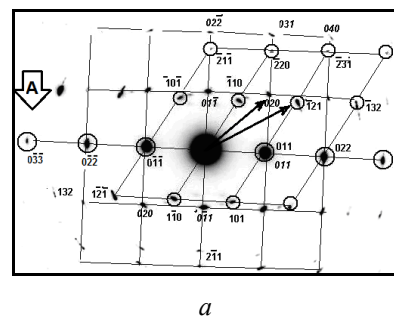


Рис. 2. Мікроструктура сталі 06Х1-У після відпуску при 750 + 720 °С (а, $\times 500$), б – карбіди, $\times 5000$; с – розміри карбідів після одинарного (1) і подвійного (2) відпусків / Fig. 2. Microstructure of steel 06Cr1-U after the tempering at 750 + 720 °С (а, $\times 500$), б – carbides, $\times 5000$; с – distribution on the sizes of carbides after single (1) and double (2) temperings

Вперше з застосуванням розробленої електронно-дифракційної методики [11; 12] у рейкових структурах мартенситу і бейніту (голчастого фериту) загартованих труб зі сталей 30ХМА і 06Х1-У знайдено спеціальні границі $\Sigma 11$ і $\Sigma 33$ у теорії ґраток співпадаючих вузлів (рис. 3).



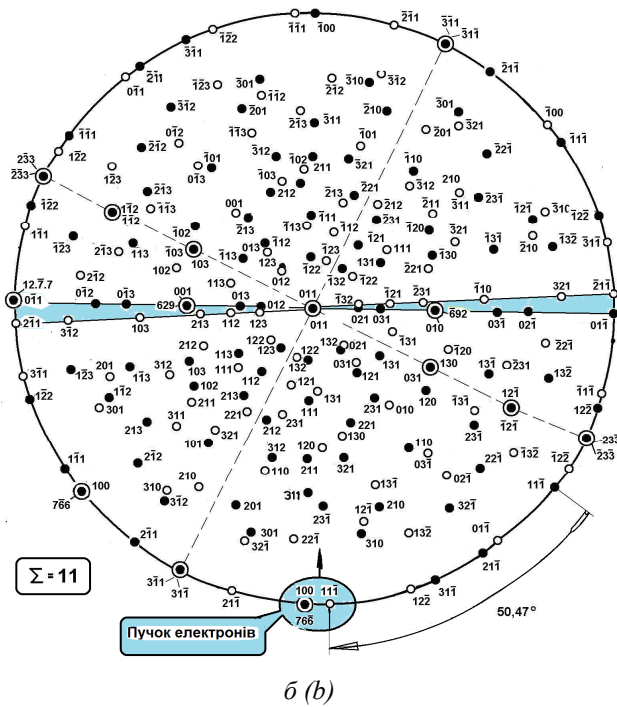
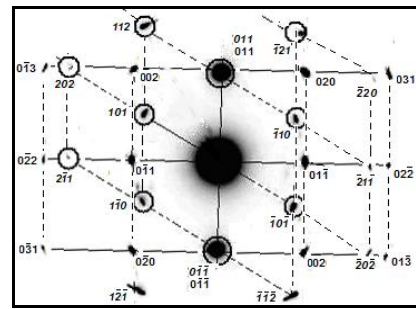


Рис. 3. СГ $\Sigma = 11$ $[011]$, $50,47^\circ$ у мартенситній структурі сталі 06Х1-У: а – електронограма; б – подвійна стереопроєкція кристалів, сполучених СГ $\Sigma 11$ / Fig. 3. SG $\Sigma = 11$ $[011]$, $50,47^\circ$ in the martensite structure of 06Cr1U steel: a – electronogram; b – double stereoprojection of crystals, united SG $\Sigma 11$

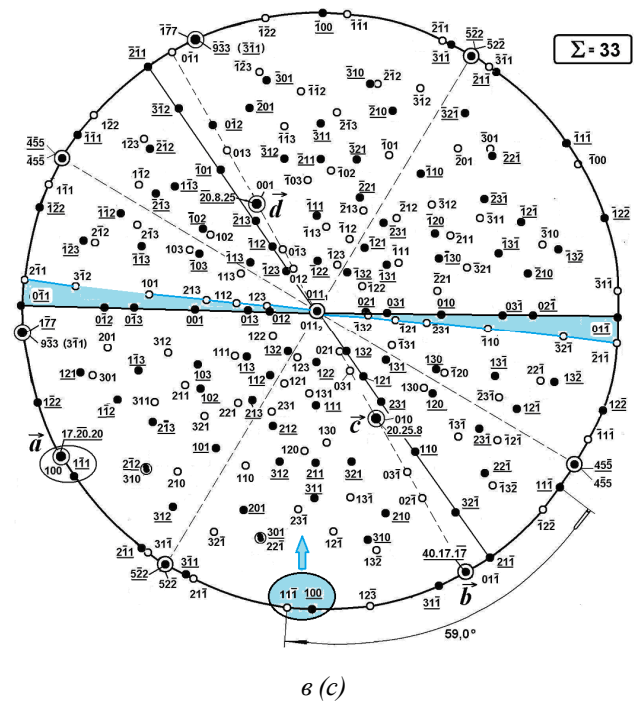
На МДК (рис. 3 а) зафіксовано дві системи рефлексів від двох мартенситних рейок з вісями зон $[100]_1 \parallel [111]_2$. Теоретична дифракційна умова, за якої обидві вісі повинні бути розташовані антипаралельно пучку електронів, виконується, що видно на подвійній стереопроєкції для $\Sigma 11$. Вони розділені кутом, який дорівнює $4 \pm 0,5^\circ$ (рис. 3 б, область, помічена написом «Пучок електронів»). Для з'ясування цього було виміряно на МДК величина азимутального кута між рефlekсами площин, які належать знайденим зонам, наприклад, $(020)_1$ і $(121)_2$, між якими за стере-проекцією має бути кут $16 \pm 0,5^\circ$. Встановлено також, що рейкова морфологія і спеціальні границі зберігаються після відпуску загартованих сталей (рис. 4). СГ зерен характеризуються пониженою поверхневою енергією і підвищеною корозійною тривкістю [13] та позитивно впливають на корозійну тривкість сталей в цілому.



а



б (b)



в (c)

Рис. 4. Рейкова структура відпущеного мартенситу (а); МДК від рейок (б); подвійна СП $[011]$, $\theta = 58,99^\circ$ (с). Співвідношення кутів між площинами різних зон відповідають $\Sigma 33$ / Fig. 4. Claoptype structure of released martensite (a); MDP from rails (b); double to SP $[011]$, $\theta = 58,99^\circ$ (c). The betweenness of corners by the planes of different zones corresponds $\Sigma 33$

Розроблений режим термічної обробки [10] забезпечив підвищення тривкості труб проти СКРН при випробуванні за NACE TM 0177: критичне напруження розтріскування ($\sigma_{кр}$) підвищилося з $0,75$ до $\geq 0,85 \dots 0,9 \sigma_{0,2}$ (рис. 5, табл. 1). Також підвищилися на $\approx 20 \dots 25\%$ характеристики міцності труб зі сталі 06Х1-У (до групи міцності X 56 за стандартом API 5L) при збереженні високої пластичності ($\delta_5 = 34\%$; $KCV^{60} = 250 \dots 280$ Дж/см²). Труби зі сталі 30ХМА за механічними властивостями відповідали класам міцності N 80, T 95, C 95 за стандартом API 5CT (табл. 1).

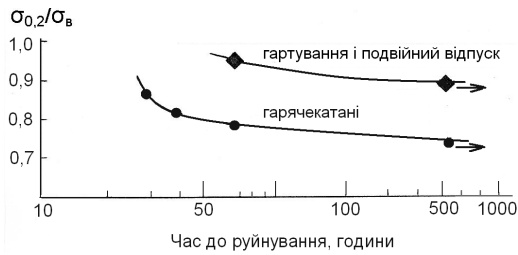


Рис. 5. Вплив термічної обробки на тривкість труб зі сталі 06X1-U проти СКРН / Fig. 5. Influence of heat treatment on durability of pipes from steel of 06Cr1-U against SCCS

Таблиця 1

Вплив режиму відпуску на властивості труб зі сталі 06X1-U / 30XMA
Influence of the mode of vacation is on property of pipes from steel of 06Cr1-U / of 30CrMoA

Режим відпуску	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$	δ_5 , %	$\sigma_{\text{кр}}$ (СКРН)
700 °С, 30 хв.	540	405	0,75	33	$\geq 0,8\sigma_{0,2}$
750 + 720 °С, по 10 хв.	525/766	395/638	0,75/0,82	34/25	$\geq 0,85...0,9\sigma_{0,2}$
Гарячекат.	440/-	320	0,73	34/-	$0,75\sigma_{0,2}$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дергач Т. А. Отечественные разработки в области производства труб нефтяного сортамента высокой коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности / Т. А. Дергач, Е. В. Проскуркин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 3. – С. 51–57.
2. Дергач Т.А. Новые разработки в области производства труб нефтяного сортамента повышенной коррозионной стойкости / Т. А. Дергач, Н. А. Карпов, Г. Д. Сухомлин // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. – 2003. – С. 139–145.
3. Погорелова И. Г. Исследование структурных особенностей и разработка способа повышения прочности и коррозионной стойкости стали при комбинированной термической обработке : автореф. дисс. канд. техн. наук. – 2009. – 19 с.
4. Тихонцева М. Т. Разработка химических составов и режимов термической обработки высокопрочных труб в сероводородостойком исполнении : автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Каменск-Уральский : ОАО СинТЗ, 2007. – 24 с.
5. Дегай А. А. Трубы нового поколения Северского трубного завода / А. А. Дегай // *Нефтегазовая вертикаль*. – 2001. – № 4. – С. 73–75.
6. Ашихмина И. Н. Изучение закономерностей структурообразования при термической обработке высокопрочных труб повышенной эксплуатационной надежности из Cr–Mo–V сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург. – 2008. – 19 с.
7. Пат. 2132396 РФ, МПК7 С 21 D 8/10, С 21 В 9/08. Способ изготовления труб из углеродистой стали / А. И. Брижан, А. И. Грехов, С. Ю. Жукова и др. – СинТЗ. Б. И. – 1999. – № 6.
8. Сухомлин Г. Д. Применение зернограничного конструирования стали для получения труб с высоким комплексом свойств / Г. Д. Сухомлин, Т. А. Дергач // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 6. – С. 50–53.
9. Патент № 88711, Україна, МПК С21D 9/08 (2006/01) Спосіб термічної обробки труб нафтового сортаменту з низьколегованих сталей / Большаков В. І., Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д.; власник ДВНЗ «ПДАБА», № у 2013 13046; заявл. 11.11.2013; опубл. 25.03. 2014, Бюл. № 6.
10. Дергач Т. А. Комплексные исследования нефтегазопроводных труб, изготовленных по энергосберегающей технологии / Т. А. Дергач // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 3. – С. 100–103.
11. Большаков В. І. Методичні основи дослідження зернограничної структури в сталях з γ , α і $\alpha + \gamma$ фазовим станом / В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Т. О. Дергач // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – Дніпро: – 2017. – № 3 (229–230). – С. 10–21.
12. Большаков В. И. Специальные границы и множественные стыки в доэвтектоидном феррите низкоуглеродистых сталей / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов, Т. А. Дергач // *Теоретичні основи будівництва*. – ПДАБА та Варшавський технічний університет. – Варшава, 2007. – С. 72–79.
13. Дергач Т. А. Научное обоснование выбора низколегированной стали и технологии изготовления нефтегазопроводных труб повышенной коррозионной стойкости / Т. А. Дергач // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. – 2012. – Вып. 64. – С. 202–210.

Висновки

1. Розроблено технологію короткочасної термічної обробки труб з низьколегованих сталей, яка включає гартування і подвійний короткочасний високий відпуск за температур $t_1 = A_{c1} - 10$ °С, і $t_2 = A_{c1} - 30$ °С та забезпечує утворення дрібнозернистої структури сталі з дисперсними, рівномірно розподіленими в ній сфероїдизованими карбідами, без залишків мартенситу і з наявністю спеціальних низькоенергетичних границь зерен.
2. Випробуванням технології на трубах зі сталей 06X1-U і 30XMA доведена можливість одночасного підвищення їх тривкості проти СКРН і міцнісних властивостей при збереженні високої пластичності.
3. Уперше з застосуванням електронно-дифракційної методики встановлено наявність спеціальних границь $\Sigma 11$ і $\Sigma 33$ у рейковій структурі загартованих низьколегованих сталей, які зберігаються після наступного відпуску.
4. Розроблена технологія може бути здійснена на діючому обладнанні підприємств без застосування капітальних витрат.

REFERENCES

1. Derhach T.A. and Proskurkyn E.V. *Otechestvennye razrabotky v oblasti proizvodstva trub neftianoho sortamenta vysokoi korrozionnoi stoikosti y ekspluatatsionnoi nadezhnosti* [Domestic developments in the field of production of oil pipe with a high corrosion resistance and operational reliability]. *Metallurhicheskaiya y hornorudnaia promyshlennost* [Metallurgical and Mining Industry]. 2006, no. 3, pp. 51–57. (in Russian).
2. Derhach T.A., Karpov N.A. and Sukhomlyn G.D. *Novye razrabotky v oblasti proizvodstva trub neftianoho sortamenta povyshennoi korrozionnoi stoikosti* [New developments in the field of production of oil pipes of improved corrosion resistance]. *Stroytelstvo, materialovedeniye, mashynostroeniye* [Construction, materials science, engineering]. 2003, pp. 139–145. (in Russian).
3. Pohorelova Y.H. *Issledovaniye strukturnykh osobennostey y razrabotka sposoba povysheniya prochnosti y korrozionnoi stoikosti staly pry kombinyrovannoi termicheskoi obrabotke : avtoref... dys. kand. tekhn. nauk* [The study of structural features and the development of a method to increase the strength and corrosion resistance of steel with a combined heat treatment: author. diss ... Cand. Tech. of Science]. 2009, 19 p. (in Russian).
4. Tykhontseva M.T. *Razrabotka khimicheskikh sostavov y rezhimov termicheskoi obrabotki vysokoprochnykh trub v serovodorodostoikom yspolnenii: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of chemical compositions and modes of heat treatment of high-strength pipes in hydrogen sulfide resistant performance: author. diss. Cand. tech. of science]. Kamensk-Uralskiy : OAO SynTZ, 2007, 24 p. (in Russian).
5. Dehai A.A. *Truby novogo pokoleniya Severskogo trubnogo zavoda* [Pipes of the new generation of Seversky Pipe Plant]. *Neftekhazovaya vertykal* [Oil and gas vertical]. 2001, no. 4, pp. 73–75. (in Russian).
6. Ashykhmyrna Y.N. *Yzucheniye zakonomernostey strukturoobrazovaniya pry termicheskoi obrabotke vysokoprochnykh trub povyshennoi ekspluatatsionnoi nadezhnosti yz Cr–Mo–V staley : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk* [Study of the patterns of structure formation during the heat treatment of high-strength pipes of increased operational reliability of Cr–Mo–V steels : author. dis. Cand. Tech. of Science]. Ekaterynburh, 2008, 19 p. (in Russian).
7. Bryzhan A.Y., Hrehov A.Y., Zhukova S.Yu. and oth. Pat. 2132396 RF, MPK7 S 21 D 8/10, C 21 V 9/08. *Sposob yzgotovleniya trub yz uhlerodystoi staly* [A method of making carbon steel pipes]. SynTZ. B. Y., 1999, no. 6, 21 p. (in Russian).
8. Sukhomlyn H.D. and Derhach T.A. *Prymeneniye zernohranychnogo konstruyrovaniya staly dlia polucheniya trub s vysokym kompleksom svoystv* [The use of grain-boundary steel design for the production of pipes with a high set of properties]. *Metallurhicheskaiya y hornorudnaia promyshlennost* [Metallurgical and mining industry]. 2008, no. 6, pp. 50–53. (in Russian).
9. Bolshakov V.I., Derhach T.O. and Sukhomlyn H.D. Patent no. 88711, Ukraine, MPK S21D 9/08 (2006/01). *Sposib termichnoi obrabotky trub naftovoho sortamentu z nyzkolehovanykh staley* [Method of thermal processing of pipes of oil assortment from low-alloy steels]. Vlasnyk DVNZ «PDABA», no. u 2013 13046; zaiavl. 11.11.2013; opubl. 25.03. 2014, byul. no. 6. (in Ukrainian).
10. Derhach T.A. *Kompleksnye yssledovaniya neftekhazoprovodnykh trub, yzgotovlennykh po enerhosberehaiushchei tekhnolohii* [Complex studies of oil and gas pipelines manufactured using energy saving technology]. *Metallurhicheskaiya y hornorudnaia promyshlennost* [Metallurgical and mining industry]. 2009, no. 3, pp. 100–103. (in Russian).
11. Bolshakov V.I., Sukhomlyn H.D. and Derhach T.O. *Metodychni osnovy doslidzhennia zernohranychnoi struktury v staliakh z γ , α i $\alpha + \gamma$ fazovym stanom* [Methodological basis of the study of the grain boundary structure in steels with γ , α and $\alpha + \gamma$ phase state]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipro, 2017, no. 3 (229–230), pp. 10–21. (in Ukrainian).
12. Bolshakov V.I., Sukhomlyn H.D., Laukhyn D.V., Beketov A.V. and Derhach T.A. *Spetsyalnye hranytsy y mnozhestvennye styky v doevtektoidnom ferrite nyzkolehovanykh staley* [Special boundaries and multiple joints in the hypoeutectoid ferrite of low carbon steels]. *Teoretychni osnovy budivnytstva* [Theoretical foundations of construction]. PSACEA and Varshavsky Technical University, Varshava, 2007, pp. 72–79. (in Russian).
13. Derhach T.A. *Nauchnoe obosnovaniye vybora nyzkolehrovannoi staly y tekhnolohii yzgotovleniya neftekhazoprovodnykh trub povyshennoi korrozionnoi stoikosti* [Scientific substantiation of the choice of low-alloy steel and the technology of manufacturing oil and gas pipes of high corrosion resistance]. *Stroytelstvo, materialovedeniye, mashynostroeniye* [Construction, materials science, engineering]. 2012, vol. 64, pp. 202–210. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Л. М. Дейнеко (Україна), д-ром техн. наук, проф. В. Ф. Башевим (Україна).

Надійшла до редакції 15.02.2019.

Прийнята до друку 19.02.2019.