

Лаптев С.К., Шацов А.А., Гребеньков С.К. Структура соединений среднеуглеродистой стали после сварки трением и наплавки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 29–35. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.04

Lapte S.K., Shatsov A.A., Grebenkov S.K. Structure of joints of medium-carbon steel after friction welding and surfacing. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 29–35. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.04

УДК: 621.791.92.051.6+669.112.22.017

С.К. Лаптев, А.А. Шацов, С.К. Гребеньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ
ПОСЛЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ И НАПЛАВКИ

Одной из основных задач современного материаловедения является повышение ресурса и надежности оборудования. В добывающих отраслях промышленности строительство нефтяных и газовых скважин сопряжено со значительным износом наружной поверхности бурильного инструмента, в особенности на горизонтальных интервалах, поэтому для ремонта бурильных труб применяют различные технологии наплавки, как восстановления наружного диаметра, так и удлинения замковых соединений.

При производстве сварочных работ по удлинению замкового соединения наплавляемый слой перекрывает участки сварки трением и ЗТВ (зона термического влияния) на высаженной части трубы и замка. Влияние наплавки на основной металл и сварной шов в данном случае недостаточно изучено.

Настоящая работа направлена на определение роли наплавки в формировании структуры и механических свойств низколегированных перлитных сталей.

Исследовали структуру наплавки, ЗТВ наплавки, зону сварки трением, перекрытие ЗТВ наплавки и ЗТВ сварного шва. Показано слабое влияние на механические свойства перекрытия зон. Механические свойства до и после создания соединений почти не отличались. Определены размеры зерен и межпластинчатые расстояния. Размеры элементов структуры, пластинок у второго (внешнего) слоя наплавки почти в 1,5 раза меньше размеров реек и межпластинчатого расстояния в других областях изделий, но пластинчатая структура перлита сохранялась, ферритных полей мало.

Это означает, что возможно применение конструкции бурильных труб, изготовленных из перлитных среднеуглеродистых низколегированных сталей, в случае их соединения сваркой трением.

Ключевые слова: бурильная труба, сварка трением, зона термического влияния, замковое соединение, наплавленный слой, перлит, феррит, аустенит, твердость, ударная вязкость, конструкционная прочность.

S.K. Laptev, A.A. Shatsov, S.K. Grebenkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

STRUCTURE OF JOINTS OF MEDIUM-CARBON STEEL AFTER
FRICTION WELDING AND SURFACING

One of the main tasks of modern materials science is to increase the resource and reliability of equipment. In the extractive industries, the construction of oil and gas wells is associated with significant wear on the outer surface of the drilling tool, especially at horizontal intervals, therefore, various surfacing technologies are used to repair drill pipes, both restoration of the outer diameter and lengthening of tool joints.

During welding to lengthen the tool joint, the deposited layer overlaps the friction and HAZ (heat affected zone) welding areas on the upset part of the pipe and the joint. The effect of surfacing on the base metal and the weld, in this case, is not well understood.

This work is aimed at determining the role of surfacing in the formation of the structure and mechanical properties of low-alloy pearlitic steels.

The structure of the surfacing, the HAZ of the surfacing, the friction welding zone, the overlap of the HAZ of the surfacing and the HAZ of the weld were investigated. A weak effect on the mechanical properties of the overlapping zones is shown. The mechanical properties before and after creating the joints were almost the same. The sizes of grains and interlamellar distances are determined. The dimensions of the structural elements, the plates at the second (outer) layer of the surfacing are almost one and a half times smaller than the dimensions of the laths and the inter-plate distance in other areas of the products, but the lamellar structure of pearlite was preserved, there are few ferrite fields.

This means that it is possible to use the construction of drill pipes made of pearlitic medium-carbon low-alloy steels in the case of friction welding.

Keywords: drill pipe, friction welding, heat affected zone, tool joint, surfaced, pearlite, ferrite, austenite, hardness, impact strength, structural strength.

Введение

Структура и состав стали существенно влияют на процессы сварки и наплавки. Современные транспортные среды большинства нефтяных месторождений характеризуются наличием растворенных CO_2 , H_2S . Исходя из этого, стоят задачи получения прочной, надежной и однородной, с повышенной коррозионной стойкостью структуры стали [1, 2].

Трубы обычно изготавливают из сплавов системы Fe–Mn–Si–(V), стали типа 09Г2С, 20Ф, 09ГСФ, 17Г1С, 14Г2, имеют невысокий уровень механических характеристик и низкую коррозионную стойкость в средах с CO_2 . Наибольшую стойкость к коррозионно-механическому разрушению имеет сталь 08ХМФА, характеристики которой можно еще несколько улучшить микролегированием [3].

Структура низкоуглеродистых сталей, применяемых для сварки, ферритно-перлитная (ФПС). ФПС шва и зоны термического влияния (ЗТВ) получают после сварки в широких интервалах варьирования температуры нагрева и скорости охлаждения. Стали с содержанием углерода до 0,25–0,3 % обеспечивают качественные сварные швы, равномерное распределение участков перлита и феррита в сердцевине свариваемых деталей и в ЗТВ.

Радикальным способом повышения прочности является применение перлитных сталей (ПС). Для низколегированных сталей рост прочности $\Delta\sigma$ за счет увеличения доли перлита может быть определен из выражения

$$\Delta\sigma = 2,4\Pi,$$

где Π – объемная доля перлитной составляющей, %.

Другим фактором, определяющим прирост прочности, является дисперсность ПС. В легированных сталях образуется псевдоперлит с содержанием углерода меньше эвтектоидного [4].

Качество бурильных труб зависит от двух основных показателей: коррозионной стойкости [5, 6] и конструкционной прочности [7–13]. В свою очередь, структурный состав стали определяет эксплуатационные свойства [14–21]. Работоспособность изделий во многом также определяет конструкция [22–25].

ПС имеют более высокую прочность по сравнению с ФПС, и предпочтительным способом их соединения является сварка трением.

Цель работы – определение структуры ЗТВ, сердцевины, наплавки и области ее соединения с поверхностью трубы после сварки трением перлитных сталей.

Методы исследования и эксперимента

Сварку осуществляли с помощью аппарата для сварки трением Thompson-125Т при частоте вращения 1100 об / мин, давление при нагреве составляло 80 кН, давление при сварке 160 кН.

В процессе трения свариваемые участки заготовок нагревали до пластического состояния и соединяли под давлением, обеспечивающим образование металлической связи. Термическую обработку стыковых швов проводили на установке индукционного нагрева: температура нагрева – 650 °С, продолжительность нагрева – 60 с, продолжительность выдержки – 15 с.

Наплавку осуществляли с помощью сварочного аппарата Castolin DS-ХМ с вращателем и шаговым двигателем продольного перемещения производства ООО «ПЛАТИНУМ-Сервис», допускающим автоматические режимы наплавки. Для наплавки использовали сварочную проволоку диаметром до 3 мм, газовую смесь типа $\text{Ar}/(15\text{--}25)\text{CO}_2$, обратную полярность; продольная подача горелки 5–10 мм/об в мин, скорость подачи проволоки 5–8 м/мин; расход газа определяли по ротаметру: 10–15 л/мин.

Анализ содержания углерода и серы проводили кулонометрическим методом с помощью экспресс-анализатора АН-7529М (на углерод) и АС-7932М (на серу).

Состав сталей исследовали химическим анализом и рентгеноспектральным методом на электронном микроскопе MIRA 3 TESCAN OXFORD INSTRUMENTS X-MAX.

Химический состав материала исследуемых деталей представлен в табл. 1.

Для определения механических свойств материала бурильной трубы высаженной части, сварного шва, наплавки и основного материала трубы проведены испытания на растяжение продольных пятикратных образцов типа III № 7 на разрывной машине УЭМ-10Г при комнатной температуре, скорости нагружения 5 мм/мин и масштабе записи 25 в соответствии с ГОСТ 1497–84 с учетом требований ASTM A370; испытания ударной вязкости стандартных образцов типа 11 – при температуре +20 °С на маятниковом копре КМ-30 в соответствии с ГОСТ 9454–78 с учетом требований ASTM E23; измерение твердости по методу Бринелля – в соответствии с ГОСТ 9012–59, по Роквеллу вдавливанием конуса – по ГОСТ 9013–59 и микротвердости на приборе ПМТ-3 – по ГОСТ 9450–71; металлографический анализ – на Neophot-32 и цифровом инвертированном микроскопе Zeiss Axiovert 40МА, электронно-микроскопический анализ на Hitachi S-3400N и Phenom Pro X.

Результаты и их обсуждение

Как следует из табл. 1, для изготовления трубы и замка использовали близкие по составу и механическим свойствам низколегированные стали с достаточно высоким пределом прочности (на уровне 1000 МПа) и ударной вязкостью KCV не менее 120 Дж/см² (табл. 2).

Таблица 1

Химический состав элементов буровой трубы и наплавочной проволоки

Название детали	Химический состав, мас. %											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Mo	Al	S	P
Тело трубы	0,26	0,23	1,07	0,99	–	–	–	0,07	0,30	0,035	0,001	0,007
Тело замка	0,36	0,27	0,93	1,07	0,04	0,30	0,06	–	0,30	–	0,001	0,007
НП (1Т46785)*	0,34	1,16	1,01	1,04	0,07	0,01	0,1	0,01	0,01	–	0,006	0,014

Примечание: НП – наплавляемая проволока; * – условное обозначение плавки.

Таблица 2

Механические свойства элементов буровой трубы и наплавочной проволоки

Механические свойства Название детали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость КСV ⁺²⁰ , Дж/см ²	Твердость, HRC (зона на рис. 1)
Тело трубы	1020	1090	21	159	31,8 (8)
Сварной шов	810	890	19	120	28,6 (5)
Тело замка	1010	1100	21	128	31,7 (1)
НП	830	1080	10	–	30,0

Примечание: НП – наплавляемая проволока.

Схематическое изображение сварного шва и наплавки показано на рис. 1.

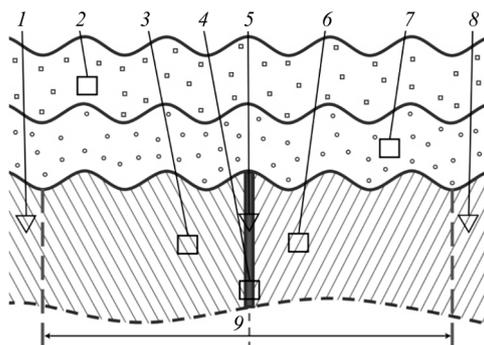


Рис. 1. Схематическое изображение сварного шва и наплавки: 1, 5, 8 – место замера твердости на замке, сварном шве и трубе соответственно; 2, 7 – первая и вторая наплавки; 3 – замок; 4 – сварной шов; 6 – труба; 9 – ширина зоны термического влияния (ЗТВ)

Результаты измерений механических свойств при испытании на растяжение, распределение твердости (рис. 2) и ударная вязкость указывают на то, что стали имеют структуру перлитного типа.

Твердость в поверхностном слое наплавки имеет значения 290–300 HV, что объясняется высокой скоростью охлаждения расплава и формированием сорбито-перлитной структуры. В средней части наплавленного слоя значения монотонно снижаются, что обусловлено замедленным охлаждением.

При движении от наплавки к материалу основы замка и тела трубы твердость монотонно повышается до 280–340 HV (см. рис. 2, а, б), изменения твердости в области наплавки видны и в зонах термического влияния. В ЗТВ сохраняется твердость на уровне 260–280 HV, минимальная твердость определена на расстоянии 6 мм от наружной поверхности наплавки.

Замеры твердости в продольном направлении (см. рис. 2, в), выполненные в основном материале через весь образец, показали, что при сварке трением зона сварки по твердости несильно отличается от других областей. В ЗТВ сварного шва микротвердость находилась в интервале 209–220 HV. Микроскопически и визуально изменения видны (рис. 3, 4). Небольшой рост твердости вблизи поверхностей и зон термического влияния объясним более высокой скоростью охлаждения.

В результате электронно-микроскопических исследований получены следующие данные о структуре (см. рис. 4, табл. 3).

Величина среднего действительного размера зерна варьируется в узком интервале от 15 мкм в зоне поверхности наплавки до 44 мкм в зоне основного материала (табл. 4). Результат хорошо согласуется с данными механических испытаний.

Стоит отметить, что дефекты металлургического характера типа несплошностей, микротрещин, пор в исследуемых структурах не обнаружены.

Выводы

1. Применение сварки трением позволяет соединять стали с перлитной структурой и сохранять в ЗТВ структуру перлитного типа.

2. Высокая скорость охлаждения поверхности после оплавления является причиной образования сорбито-перлитной структуры в поверхностном слое, которая переходит в перлитную в удаленных от поверхности областях.

3. Полученные результаты дают основания для применения среднеуглеродистых низколегированных перлитных сталей в качестве материала буровых труб.

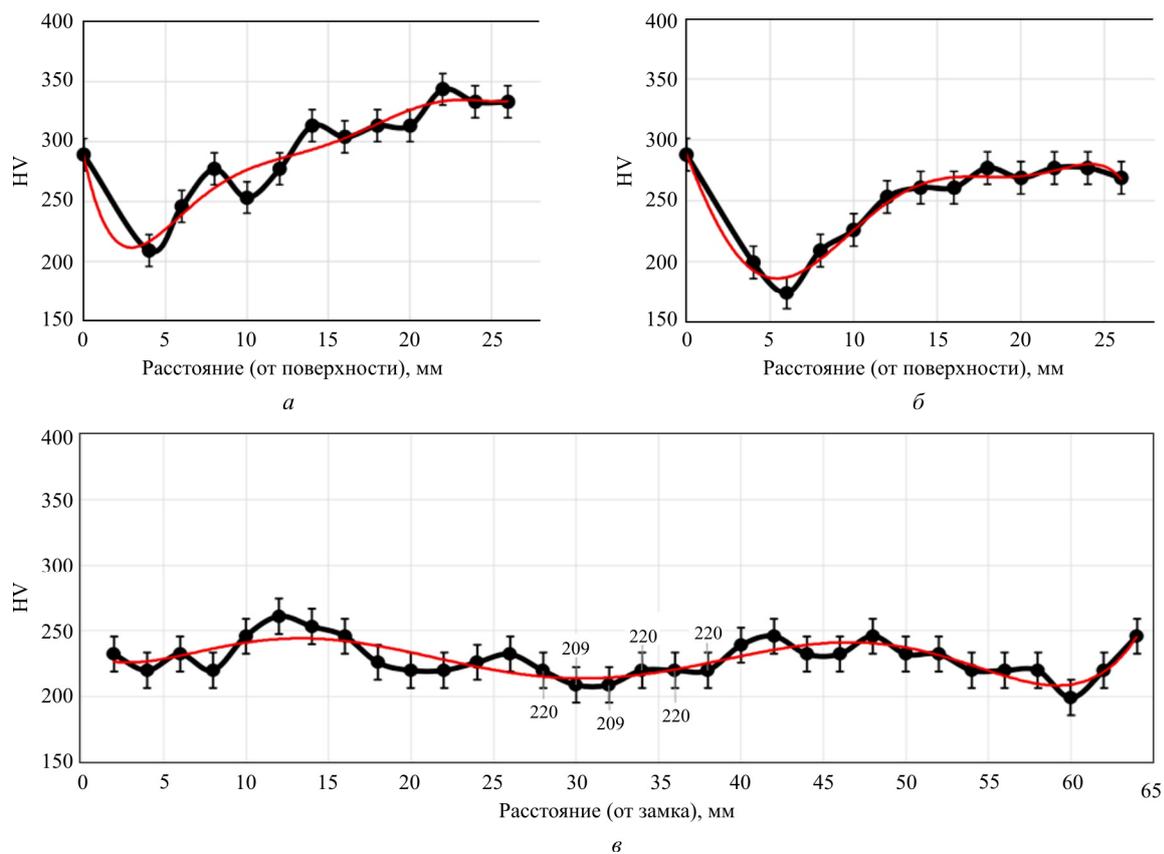


Рис. 2. Изменение микротвердости в замке (а), трубе (б) и при измерении от замка к трубе через зону сварного шва (в)

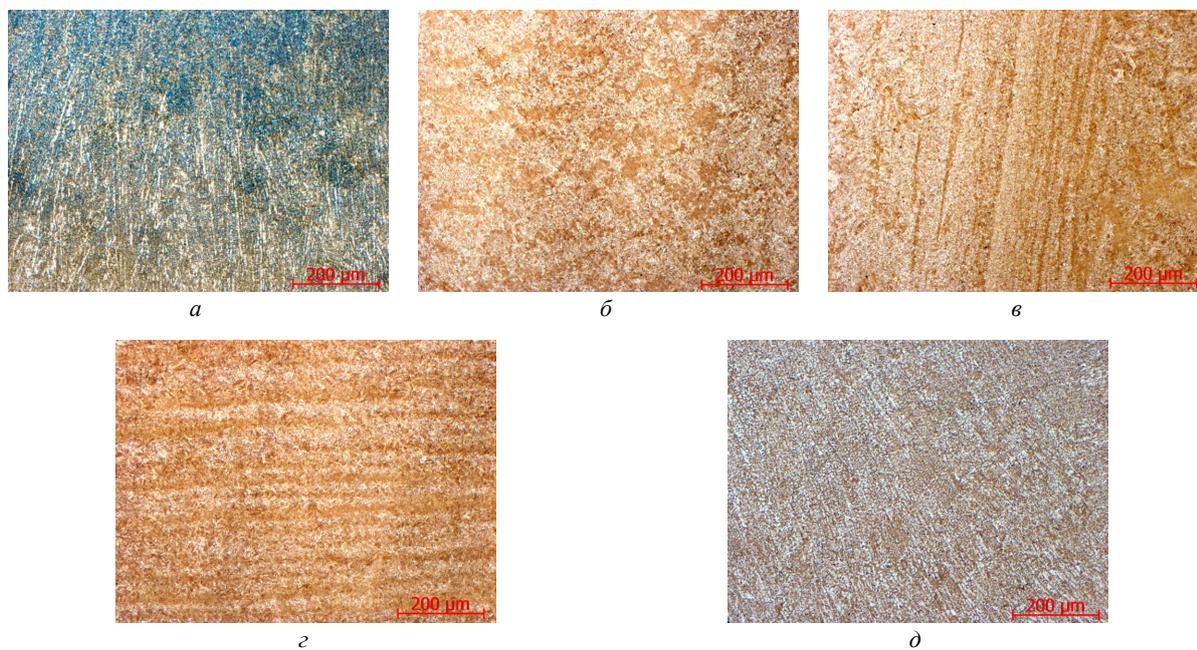


Рис. 3. Микроструктура первой (а) и второй (д) наплавки, замка (б), сварного шва (в) и тела трубы (г)

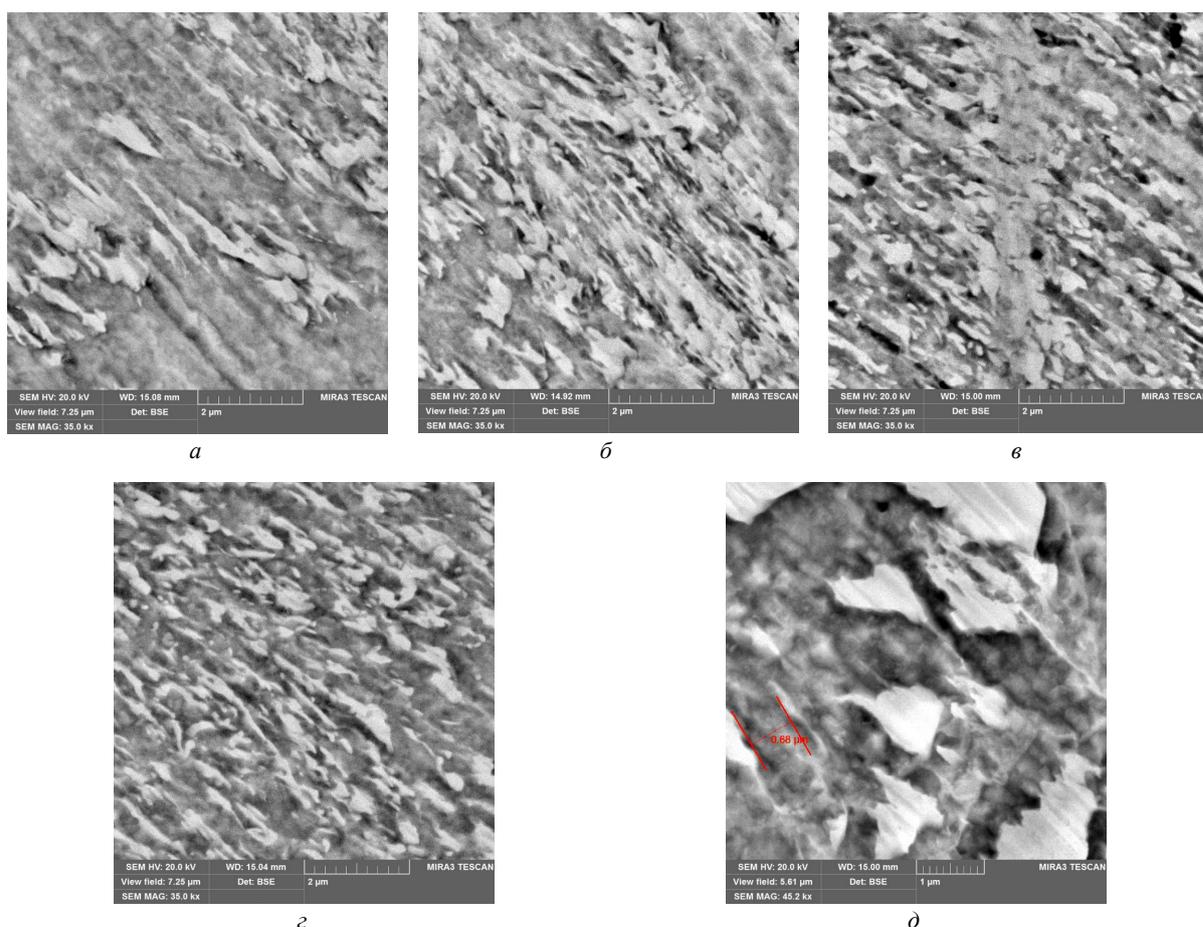


Рис. 4. Электронно-микроскопические исследования первой (а), второй (д) наплавки, замка (б), сварного шва (в) и тела трубы (г)

Таблица 3

Результаты анализа пластинчатой структуры

Место анализа	Средний размер пластинок		Межпластинчатое расстояние, нм
	феррита, нм	цементита, нм	
Наплавка № 1 (см. рис. 4, а)	190	170	360
Замок (см. рис. 4, б)	275	295	570
Сварной шов (см. рис. 4, в)	270	265	540
Труба (см. рис. 4, г)	240	235	475
Наплавка № 2 (см. рис. 4, д)	680	780	1500

Таблица 4

Результаты анализа зеренной структуры

Характеристика места измерения (номер зоны на рис. 1)	Номер зерна	Средний диаметр зерна, мкм
Наплавка № 1 (2)	8–9	15–22
Замок (3)	6–7	31–44
Сварной шов (4)	8	22
Труба (6)	7	31
Наплавка № 2 (7)	8	22

Список литературы

1. Структура и свойства низкоуглеродистой трубной стали 17Г1С–У, микролегированной бором / А.А. Бабенко, В.И. Жучков, Н.И. Сельменских, А.Г. Уполовникова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 10. – С. 774–779.
2. Углов В.А., Зайцев А.И., Родионова И.Г. Основные направления развития металлургической технологии для обеспечения современных требований по уровню и стабильности технологических и служебных свойств стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2012. – № 3 (1347). – С. 85–94.
3. Иоффе А.В., Денисова Т.В., Тетюева Т.В. Особенности формирования структуры в низколегированной стали 08ХМФБЧА при закалке и отпуске // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 10. – С. 34–38.
4. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Изд-во МИСИС, 1999. – 408 с.
5. Tribological characterization of the drill pipe tool joints reconditioned by using welding technologies / M. Caltaru, M. Badicioiu, R.G. Ripeanu, A. Dinita, M. Minescu, E. Laudacescu // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering – 2018. – Vol. 295. – 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/295/1/012010
6. Corrosion of drill pipes in high mineralized produced waters / I. Chudyk, L. Poberezhny, A. Hrysanuk, L. Poberezhna // 6th Int. Conf. “Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity” Procedia Structural Integrity, Lviv, Ukraine, June 3–6, 2019. – Lviv, Ukraine, 2019. – Vol. 16. – P. 260–264.
7. A new method to determine the required impact toughness for petroleum drill pipe used in critical sour environment / L. Han, F. Hu, H. Wang, Y. Feng, H. Li // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 16. – P. 667–672. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1139
8. Янтурин А.Ш., Султанов Б.З. Спиральная деформация колонны труб в наклонной скважине // Нефть и газ. – 1977. – № 5. – С. 15–20.
9. Failure analysis on fracture of a S135 drill pipe / H. Yan, Z. Xuehu, B. Zhenquan, Y. Chengxian // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 3. – P. 447–453. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.075
10. Fangpo L. Investigation on impact absorbed energy index of drill pipe // Engineering Failure Analysis. – 2020. – Vol. 118. – 104823.
11. Material effects on risk assessment of residual life of oil drilling rig pipe / A. Sedmak, A. Grbović, S. Kirin, Ž. Šarkočević, R. Zaidi // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 28. – P. 1315–1320.
12. Emrea H.E., Kaçarb R. Effect of post weld heat treatment process on microstructure and mechanical properties of friction welded dissimilar drill pipe // Materials Research. – 2015. – Vol. 18 (3). – P. 503–508. DOI: 10.1590/1516-1439.308114
13. Priymak E., Atamashkin A., Stepanchukova A. Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties and mechanism of fracture of joint welds made by thompson friction welding // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 11. – P. 295–299.
14. Фонштейн М.Н. Фундаментальные особенности фазовых превращений низколегированных сталей

при термической обработке из межкритического интервала температур // Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. науч. тр. / под ред. В.Н. Урцева. – Магнитогорск, 2008. – Вып. 5. – С. 62–75.

15. Кристиан Д., Ройтбурд А.Л. Теория превращений в металлах и сплавах: пер с англ. // Термодинамика и общая кинетическая теория. – М.: Мир, 1978. – Ч. 1. – 807 с.
16. Сароян А.Е. Трубы нефтяного сортамента: справ. – М.: Недра, 1987. – 504 с.
17. Сароян А.Е. Бурильные колонны в глубоком бурении. – М.: Недра, 1979. – 231 с.
18. Концепция карбидного конструирования сталей повышенной хладостойкости / В.И. Горьнин, С.Ю. Кондратьев, М.И. Оленин, В.В. Рогожкин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 10. – С. 32–37.
19. Рекин С.А. Совершенствование технологии эксплуатации бурильной колонны (на примере АО «Пурнефтегазгеология»): дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 1997. – 137 с.
20. Эрлих Г.М. Эксплуатация бурильных труб. – М.: Недра, 1969. – 312 с.
21. Dong L., Zhu X., Yang D. Study on mechanical behaviors of double shoulder drill pipe joint thread // Petroleum. – 2019. – Vol. 5. – P. 102–112. DOI.org/10.1016/j.petlm.2018.01.004
22. Рекин С.А., Янтурин А.Ш. Устойчивость, упругая деформация, износ и эксплуатация бурильных и обсадных колонн // Механика системы «колонна – скважина – пласт». – СПб.: Недра, 2005. – 439 с.
23. Файн Г.М., Неймарк А.С. Проектирование и эксплуатация бурильных колонн для глубоких скважин. – М.: Недра, 1985. – 237 с.
24. Лачинян Л.А. Работа бурильной колонны. – М.: Недра, 1992. – 212 с.
25. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

References

1. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Sel'menskikh N.I., Upolovnikova A.G. Struktura i svoystva nizkouglерodistoi trubnoi stali 17G1S–U, mikrolegirovannoi borom [Structure and properties of boron microalloyed low-carbon pipe steel 17Mn1Si-U]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii*, 2018, vol. 61, no. 10, pp. 774–779.
2. Uglov V.A., Zaitsev A.I., Rodionova I.G. Osnovnye napravleniia razvitiia metallurgicheskoi tekhnologii dlia obespecheniia sovremennykh trebovaniy po urovniu i stabil'nosti tekhnologicheskikh i sluzhebnykh svoystv stali [The main directions of metallurgical technology development to meet modern requirements for the level and stability of technological and service properties of steel]. *Chernaia metallurgii. Biulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*, 2012, no. 3 (1347), pp. 85–94.
3. Ioffe A.V., Denisova T.V., Tetueva T.V. Oso-bennosti formirovaniia struktury v nizkolegировannoi stali 08KhMFBCChA pri zakalke i otpuske [Peculiarities of structure formation in low-alloy steel 08KhMFBCCHA during quenching and tempering]. *Metallovedenie i termicheskaiа obrabotka metallov*, 2012, no. 10, pp. 34–38.
4. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Iu.G. Spetsial'nye stali [Special steels]. Moscow: Izdatel'stvo MISIS, 1999, 408 p.

5. Caltaru M., Badicioiu M., Ripeanu R.G., Dinita A., Minescu M., Laudacescu E. Tribological characterization of the drill pipe tool joints reconditioned by using welding technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 295, p. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/295/1/012010
6. Chudyk I., Poberezhny L., Hrysanuchuk A., Poberezhna L. *Corrosion of drill pipes in high mineralized produced waters. 6th Int. Conferentsiia. "Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity" Procedia Structural Integrity*. Lviv, Ukraine, 2019, vol. 16, pp. 260–264.
7. Han L., Hu F., Wang H., Feng Y., Li H. A new method to determine the required impact toughness for petroleum drill pipe used in critical sour environment. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 16, pp. 667–672. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1139
8. Ianturin A.Sh., Sultanov B.Z. Spiral'naia deformatsiia kolonny trub v naklonnoi skvazhine [Spiral deformation of a pipe string in a deviated well]. *Neft' i gaz*, 1977, no. 5, pp. 15–20.
9. Yan H., Xuehu Z., Zhenquan B., Chengxian Y. Failure analysis on fracture of a S135 drill pipe. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 3, pp. 447–453. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.075
10. Fangpo L. Investigation on impact absorbed energy index of drill pipe. *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 118, p. 104823.
11. Sedmak A., Grbović A., Kirin S., Šarkočević Ž., Zaidi R. Material effects on risk assessment of residual life of oil drilling rig pipe. *Procedia Structural Integrity*, 2020, vol. 28, pp. 1315–1320.
12. Emrea H.E., Kaçarab R. Effect of post weld heat treatment process on microstructure and mechanical properties of friction welded dissimilar drill pipe. *Materials Research*, 2015, vol. 18 (3), pp. 503–508. DOI: 10.1590/1516-1439.308114
13. Priymak E., Atamashkin A., Stepanchukova A. Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties and mechanism of fracture of joint welds made by thompson friction welding. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 11, pp. 295–299.
14. Fonshtein M.N. Fundamental'nye osobenno-sti fazovykh prevrashchenii nizkolegированных сталей при термической обработке из межкритического интервала температур [Fundamental features of phase transformations of low-alloy steels during heat treatment from the intercritical temperature range]. *Fazovye i strukturnye prevrashcheniia v staliakh: sbornik nauchnykh trudov*. Ed. V.N. Urtseva. Magnitogorsk, 2008, iss. 5, pp. 62–75.
15. Kristian D., Roitburd A.L. Teoriia prevrashchenii v metallakh i splavakh [Theory of transformations in metals and alloys]. *Termodinamika i obshchaia kineticheskaia teoriia*. Moscow: Mir, 1978, 807 p.
16. Saroian A.E. Truby nefianogo sortamenta [Oil pipes]. Moscow: Nedra, 1987, 504 p.
17. Saroian A.E. Buri'nye kolonny v glubokom burenii [Drill strings in deep drilling]. Moscow: Nedra, 1979, 231 p.
18. Gorynin V.I., Kondrat'ev S.Iu., Olenin M.I., Rogozhkin V.V. Kontsepsiia karbidnogo konstruirovaniia stalei povyshennoi khladostoikosti [Concept of carbide design for coldresistant steels]. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov*, 2014, no. 10, pp. 32–37.
19. Rekin S.A. Sovershenstvovanie tekhnologii ekspluatatsii buril'noi kolonny (na primere AO «Purneftegazgeologii») [Improvement of drill string operation technology (by the example of Purneftegazgeologiya JSC)]. PhD Theses. Samara, 1997, 137 p.
20. Erlikh G.M. Ekspluatatsiia buril'nykh trub. Moscow: Nedra, 1969, 312 p.
21. Dong L., Zhu X., Yang D. Study on mechanical behaviors of double shoulder drill pipe joint thread. *Petroleum*, 2019, vol. 5, pp. 102–112. DOI.org/10.1016/j.petlm.2018.01.004
22. Rekin S.A., Ianturin A.Sh. Ustoichivost', uprugaiia deformatsiia, iznos i ekspluatatsiia buril'nykh i obsadnykh kolonn [Stability, elastic deformation, wear and performance of drill strings and casing]. *Mekhanika sistemy «kolonna – skvazhina – plast»*. Saint-Petersburg: Nedra, 2005, 439 p.
23. Fain G.M., Neimark A.S. Proektirovanie i ekspluatatsiia buril'nykh kolonn dlia glubokikh skvazhin [Design and operation of drill strings for deep wells]. Moscow: Nedra, 1985, 237 p.
24. Lachinian L.A. Rabota buril'noi kolonny [Drill string operation]. Moscow: Nedra, 1992, 212 p.
25. Odintsov L.G. Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p.

Получено 24.12.2020

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Лаптев Сергей Константинович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: sklaptsev@bk.ru.

Шапов Александр Аронович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: shatsov@pstu.ru.

Гребеньков Сергей Константинович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: drive@rtural.ru.

About the authors

Sergey K. Laptev (Perm, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: sklaptsev@bk.ru.

Alexander A. Shatsov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: shatsov@pstu.ru.

Sergey K. Grebenkov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Leading Engineer, Department of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: drive@rtural.ru.