



УДК 669.715.017:621.785.3:620.18:622.24.05:620.193.4

С.Ю. Кондратьев, О.В. Швецов, А.А. Альхименко

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16Т И 1953Т1 В КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЕ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

S.Yu. Kondrat'ev, O.V. Shvecov, A.A. Alhimenko

THE CHANGING OF MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS D16T AND 1953T1 IN THE CORROSION ENVIRONMENT OF OIL WELLS

Изучено влияние коррозионной среды на механические свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 в условиях эксплуатации бурильных труб для нефтяных скважин. Установлено, что сплав Д16Т по сравнению с 1953Т1 значительно более устойчив к коррозионному воздействию при температурах эксплуатации.

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ; МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ; БУРИЛЬНЫЕ ТРУБЫ.

Influence of the corrosion environment under operating conditions of drilling pipes for oil wells on mechanical properties of aluminum alloys D16T and 1953T1 is studied. It is established that the alloy D16T is much steadier against corrosive attack at operation temperatures in comparison with 1953T1.

WROUGHT ALUMINUM ALLOYS; MECHANICAL PROPERTIES; CORROSION RESISTANCE; DRILL PIPES.

Анализ применения высокопрочных алюминиевых деформируемых сплавов Д16 и 1953 для изготовления бурильных труб, используемых в нефтяной и газовой промышленности, показывает значительные их преимущества по сравнению со сталями [1–4]. Однако существует и ряд недостатков, связанных с повышенной коррозионной чувствительностью алюминиевой трубы в условиях разработки нефтяной скважины. При этом основным конструктивным участком, подверженным коррозии, является часть, контактирующая со стальным замком [5, 6]. Влияние нагрева трубы при горячей посадке стального замка, а также в процессе эксплуатации на механические свойства алюминиевых сплавов изучено в [7–9]. Результаты исследований действия коррозионной среды на алюминиевые сплавы Д16 и 1953 в процессе эксплуатации бурильных труб весьма ограничены. Между тем известно [10], что при эксплуатации бурильных труб из алюминиевых сплавов материал подвергается нескольким видам коррозии:

общей коррозии (под действием бурового раствора с $pH > 9$),

коррозионному растрескиванию (в условиях бурения в среде с повышенным содержанием сероводорода);

контактной коррозии (при контакте алюминиевой трубы со стальным замком).

Целью работы было исследование коррозионной стойкости алюминиевых сплавов Д16 и 1953 в условиях изготовления и эксплуатации бурильных труб для разработки нефтяных месторождений.

Материал и методика эксперимента

Образцы для исследований вырезали в продольном направлении из деформированных заготовок бурильных труб $\varnothing 147$ мм и толщиной стенки 13 мм из алюминиевых сплавов марок Д16 и 1953. В состоянии поставки трубы были термообработаны по стандартным режимам: для сплава Д16Т — закалка от 500 °С в воде + естественное старение в течение 4 суток; для 1953Т1 —

закалка от 480 °С в воде + искусственное старение при 125 °С длительностью 24 ч.

Для оценки однородности материала по химическому составу микрорентгеноспектральным анализом на установке «Самебах» определяли содержание химических компонентов в различных участках трубы. По результатам исследования признаков ликвации легирующих элементов не выявлено. Содержание примесей в сплавах составляло меньше 0,1 масс. %. Содержание основных химических компонентов в сплавах соответствовало стандартным значениям (табл. 1).

Для испытаний на растяжение изготавливали стандартные пятикратные цилиндрические образцы $d_0 = 6$ мм. Механические свойства определяли при статических испытаниях на одноосное растяжение при комнатной температуре по ГОСТ 1497–84. Испытания проводили на разрывной машине «Schenck» с максимальным усилием нагружения 200 кН при скорости нагружения 1 мм/мин.

Образцы подвергали кратковременной однократной выдержке длительностью 3–10 мин при температурах 200 или 250 °С, что моделировало технологический нагрев бурильных труб при

горячей посадке замкового соединения, а затем — длительной (эксплуатационной) выдержке 500 или 1000 ч при температуре 150 °С в коррозионной среде или на воздухе. Нагрев образцов проводили в камерных печах «СНОЛ-1.6.2.5. 1/11-И2». Контроль температуры осуществляли по термопаре, впаянной в центр контрольного образца. Точность регулировки температуры составляла $\pm 2,5$ °С. Образцы загружали в печь, предварительно нагретую до заданной температуры, выдерживали на воздухе или в коррозионной среде заданное время и охлаждали на воздухе. Механические испытания проводили на образцах после термического воздействия.

В качестве коррозионной среды, моделирующей условия разработки нефтяной скважины, использовали раствор NaCl + NaOH ($pH = 11$).

Результаты экспериментальных исследований

Результаты определения механических свойств металла труб в исходном состоянии приведены в табл. 2. Видно, что свойства исследованных сплавов соответствуют стандартным значениям. При этом исходная прочность сплава 1953Т1 выше, а пластичность — ниже по сравнению со сплавом Д16Т.

Таблица 1

Фактический и стандартный химический состав исследованных сплавов

Марка сплава	Материал	Содержание основных химических элементов, масс. %									
		Al	Mg	Zn	Mn	Cu	Zr	Cr	Ti	Fe	Si
Д16Т	фактический	осн.	1,62	0,30	0,53	4,54	—	—	0,08	0,45	0,48
	ГОСТ 4784–97	осн.	1,2–1,8	0,30	0,3–0,9	3,8–4,9	—	—	0,1	0,5	0,5
1953Т1	фактический	осн.	2,6	5,7	0,17	0,45	0,02	0,19	0,05	0,1	0,05
	ТУ1–2–592–2003	осн.	2,0–3,0	5,6–6,2	0,1–0,3	0,40–0,80	$\leq 0,10$	0,15–0,25	0,02–0,1	$\leq 0,25$	$\leq 0,2$

Таблица 2

Фактические и стандартные механические свойства исследованных сплавов

Марка сплава	Механические свойства				
	Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Д16Т	фактический	520	340	15	14
	стандартный	≥ 300	≥ 470	≤ 19	—
1953Т1	фактический	570	520	12	21
	стандартный	≥ 520	≥ 470	$\leq 6,5$	—

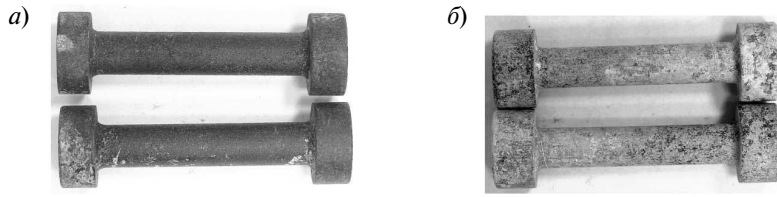


Рис. 1. Внешний вид образцов сплава Д16Т (а) и 1953Т1 (б) после технологического нагрева (200 °С, 6 мин) и последующей эксплуатационной выдержки (150 °С, 500 ч) в растворе NaCl + NaOH (pH=11)

На рис. 1 показан характерный внешний вид образцов сплавов после технологического нагрева и последующей эксплуатационной выдержки в коррозионной среде — растворе NaCl + NaOH (pH = 11). Видно, что поверхность образцов прореагировала с коррозионной средой, однако значительного воздействия на сплав (язвы, каверны, рытвины) не обнаружено. Следует отметить, что по результатам испытаний выявлено большее воздействие среды на сплав 1953Т1 по сравнению со сплавом Д16Т.

На поверхности образца из сплава 1953Т1 существенно больше продуктов коррозии, причем по всей площади.

Механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 после предварительного кратковременного нагрева и последующего длительного нагрева по разным режимам в коррозионной среде иллюстрирует рис. 2. Для сравнения на этих же графиках показаны прочностные и пластические характеристики сплавов в состоянии поставки (исходные значения).

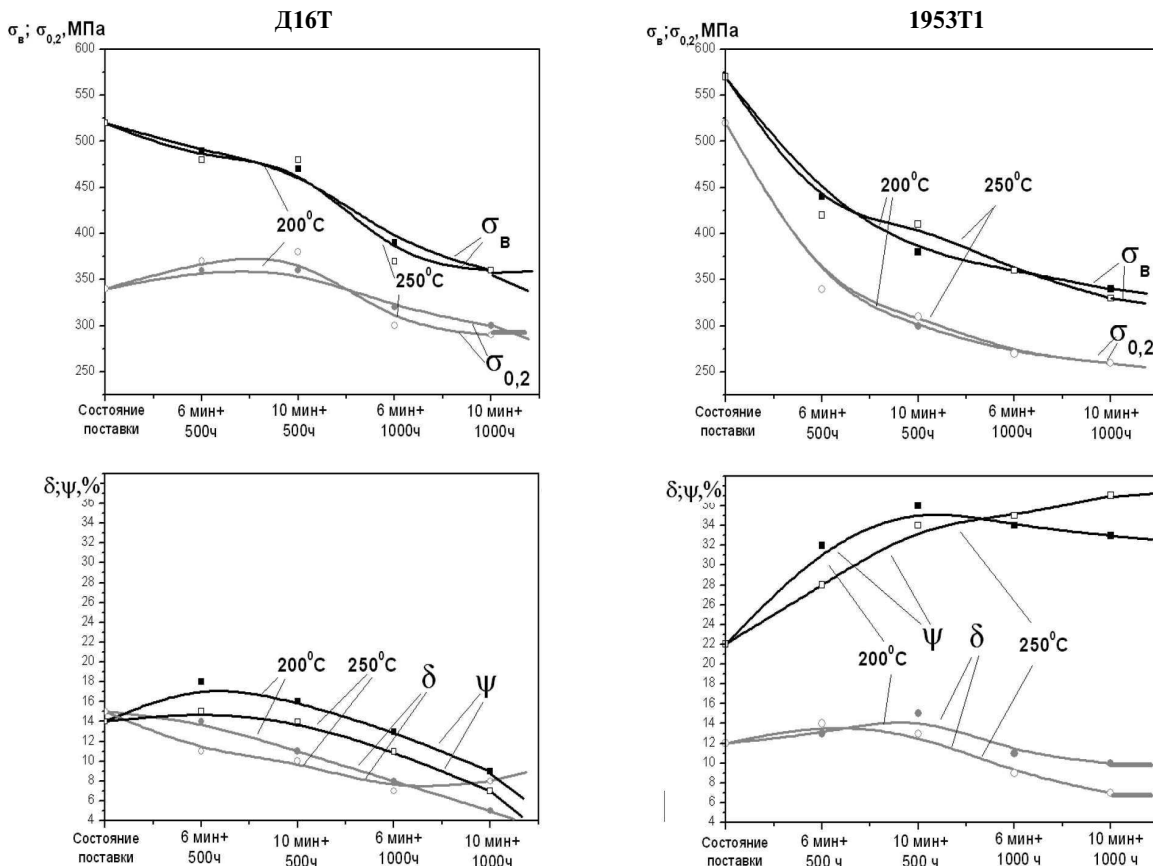


Рис. 2. Влияние выдержки длительностью 500 или 1000 ч при 150 °С в растворе NaCl + NaOH (pH = 11) на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 после предварительного нагрева (200 или 250 °С; 6 или 10 мин)

Из полученных зависимостей (рис. 2) следует, что практически все механические характеристики исследованных сплавов снижаются по сравнению с исходным состоянием после технологического и эксплуатационного (в коррозионной среде) нагревов. Наибольшее снижение механических свойств сплавов наблюдается после более длительных выдержек: 10 мин — при предварительном технологическом; 1000 ч — при последующем эксплуатационном нагревах. Так, в сплаве Д16Т в этом случае предел текучести снижается на 15 %, а предел прочности — на 30 % относительно состояния поставки. В сплаве 1953Т1 при тех же условиях происходит значительно большее снижение механических свойств по сравнению с состоянием поставки: $\sigma_{0,2}$ — на 50 %; σ_B — на 40 %. При этом относительные удлинение и сужение в сплаве Д16Т также несколько уменьшаются, а в сплаве 1953Т1 δ — снижается, а ψ — возрастает.

Важно отметить, что выдержка длительно-стью 500 ч при 150 °С в коррозионной среде практически не изменяет механические характеристики сплава Д16Т, но значительно снижает

пределы текучести и прочности сплава 1953Т1 — соответственно на 40 и 30 % по сравнению с состоянием поставки.

Полученные результаты экспериментов показывают, что кратковременный технологический нагрев в сочетании с последующим длительным эксплуатационным нагревом в коррозионно-активной среде снижает механические свойства исследованных сплавов, причем сплава 1953Т1 — в значительно большей степени. После испытаний прочностные характеристики сплава Д16Т выше, чем у сплава 1953Т1, который в исходном состоянии имел преимущество по механическим свойствам.

Зависимости изменения механических свойств исследованных сплавов, представленные на рис. 2, учитывают влияние трех факторов: кратковременного технологического нагрева при сборке бурильной трубы, длительного нагрева при ее эксплуатации и коррозионного воздействия среды. Для выявления роли именно коррозионной среды необходимо сопоставить механические свойства сплавов после испытаний образцов, подвергнутых технологическому

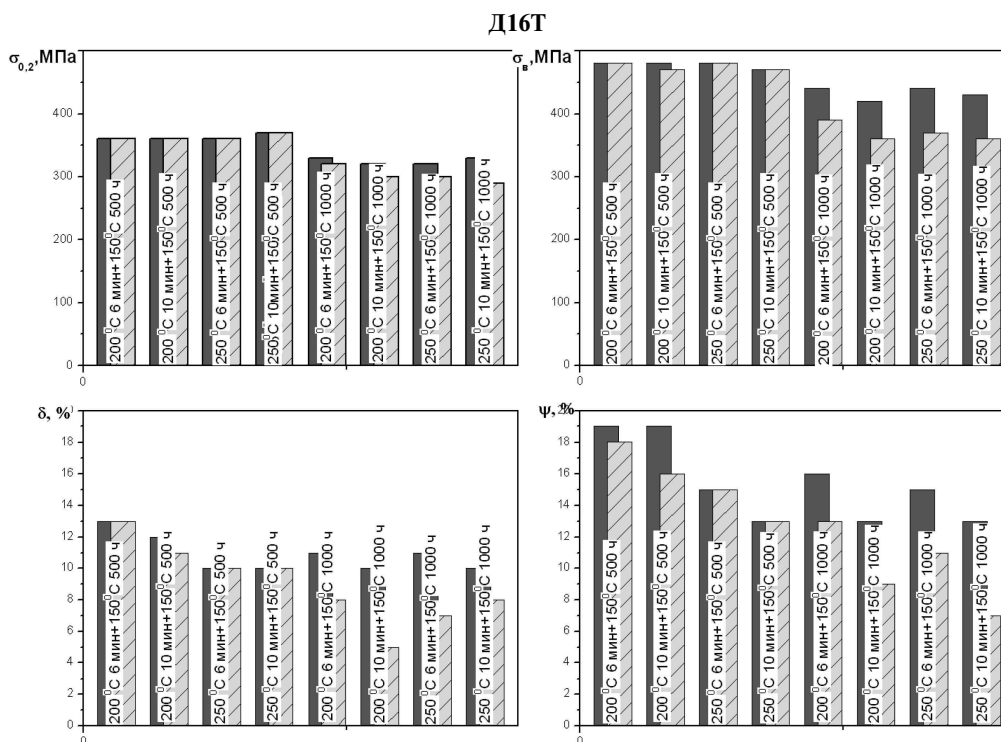


Рис. 3. Механические свойства алюминиевого сплава Д16Т после технологического нагрева (200 или 250 °С; 6 или 10 мин) с последующим эксплуатационным (150 °С; 500 или 1000 ч) на воздухе или в коррозионной среде (раствор NaCl + NaOH, pH = 11): ■ — без коррозионной среды; ▨ — в коррозионной среде

нагреву в сочетании с последующим эксплуатационным в коррозионной среде, и образцов, подвергнутых нагревам по тем же режимам, но на воздухе. Результаты такого исследования приведены на рис. 3, 4.

Полученные результаты показывают, что по сравнению с воздушной средой наличие коррозионной среды практически не влияет на характер изменения механических свойств сплава Д16Т после технологического и эксплуатационного нагревов. Отрицательное влияние ее проявляется лишь при максимальной длительности выдержек: 10 мин — при технологическом; 1000 ч — при эксплуатационном нагревах. Однако это влияние незначительно. Сплав 1953Т1 значительно более чувствителен к воздействию коррозионной среды. Так, уже после 500 ч выдержки при 150 °С в 5 %-м растворе NaCl наблюдается снижение механических свойств сплава 1953Т1, особенно пластических характеристик, по сравнению с нагревом на воздухе.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что коррозионная среда оказывает

отрицательное влияние на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 при эксплуатации в условиях бурения нефтяных месторождений. Однако чувствительность этих материалов к коррозионному воздействию среды различная: сплав Д16Т существенно более устойчив по сравнению с 1953Т1.

Кратковременный технологический нагрев (200–250 °С, 6–10 мин) при изготовлении буровой колонны с ее последующим длительным эксплуатационным нагревом (150 °С, 500–1000 ч) в коррозионно-активной среде (раствор NaCl + NaOH, $pH = 11$) снижает механические свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 по сравнению с состоянием поставки трубных заготовок. При этом наблюдаемая деградация свойств сплава 1953Т1, который в исходном состоянии имел преимущество по прочности и пластичности, значительно больше по сравнению с Д16Т.

Увеличение длительности температурного воздействия при технологическом и эксплуата-

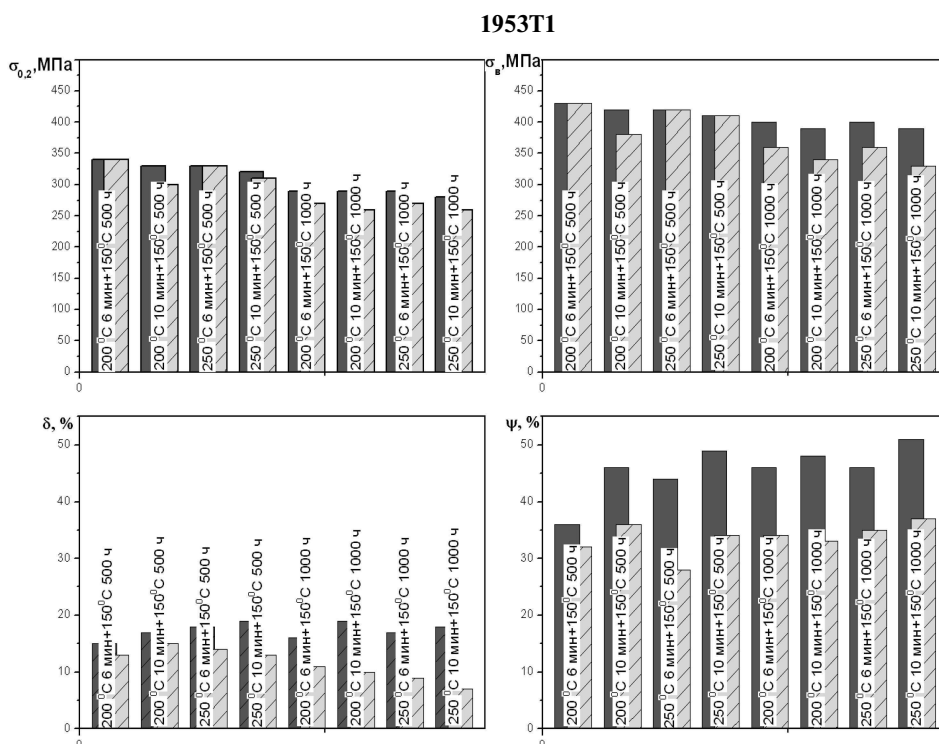


Рис. 4. Механические характеристики алюминиевого сплава 1953Т1 после технологического нагрева (200 или 250 °С; 6 или 10 мин) в сочетании с последующим эксплуатационным (150 °С; 500 или 1000 ч) на воздухе или в коррозионной среде (раствор NaCl + NaOH, $pH = 11$):):

■ — без коррозионной среды; ▨ — в коррозионной среде

ционном нагревах усиливает отрицательное влияние коррозионной среды на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1, причем сплав 1953Т1 существенно более чувствителен к этим факторам.

Несмотря на установленное отрицательное влияние коррозионной среды нефтяных скважин, алюминиевые сплавы 1953Т1 и, особенно, Д16Т достаточно устойчивы при эксплуатации в условиях добычи углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Boice E.G., Dalrymple R.S.** The Design and Performance Characteristics of Aluminum Drill Pipe // *Journal of Petroleum Technology*. 1963. Vol. XV, № 12. P. 1285–1291.
2. **Штамбург В.Ф., Фаин Г.М., Данелянц С.М., Шеина А.А.** Бурильные трубы из алюминиевых сплавов. М.: Недра, 1980. 240 с.
3. **Fain G.M.** [et al.]. Aluminum alloys for offshore drilling systems // *Proceedings of the 14-th International Conference on OMAE 1995 // Offshore Technology*. 1995. Vol. I-B. P. 299–306.
4. **Фаин Г.М., Головин А.А., Воронков Г.А., Данелянц М.С., Рябихина С.М.** Длительная прочность бурильных труб из алюминиевых сплавов при повышенных температурах эксплуатации // *Нефтяная промышленность. Сер. «Машины и нефтяное оборудование»*. 1980. № 8. С. 10–12.
5. **Колесов С.С., Кондратьев С.Ю., Чижиков В.В., Швецов О.В.** Исследование структуры и свойств бурильных труб из сплава Д16Т после эксплуатации в условиях нефтедобычи // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 11. С. 39–43.
6. **Швецов О.В., Кондратьев С.Ю.** Влияние горячей посадки замкового соединения на структуру

и свойства металла бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // *Технология машиностроения*. 2012. № 5. С. 31–36.

7. **Швецов О.В., Кондратьев С.Ю.** Влияние технологических нагревов на эксплуатационные свойства сплавов Д16Т и 1953Т1, применяемых для изготовления труб // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 5. С. 36–42.

8. **Кондратьев С.Ю., Швецов О.В.** Влияние высокотемпературных нагревов на структуру и свойства алюминиевых сплавов при изготовлении бурильных труб // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 4 (694). С. 24–30.

9. **Кондратьев С.Ю., Зотов О.Г., Швецов О.В.** Структурная стабильность и изменение свойств алюминиевых сплавов Д16 и 1953 в процессе изготовления и эксплуатации бурильных труб // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 10 (700). С. 15–21.

10. **Карлашов А.В., Яров А.Н., Гильман К.Н., Жидовцев Н.А.** Коррозионно-усталостная прочность бурильных труб из алюминиевых сплавов. М.: Недра, 1977. 183 с.

REFERENCES

1. **Boice E.G., Dalrymple R.S.** The Design and Performance Characteristics of Aluminum Drill Pipe. *Journal of Petroleum Technology*. 1963. Vol. XV, № 12. P. 1285–1291.
2. **Shtamburg V.F., Fain G.M., Danelyants S.M., Sheina A.A.** Buriilnyye trubyy iz alyuminiyevykh splavov. M.: Nedra, 1980. 240 s. (rus.)
3. **Fain G.M.** [et al.]. Aluminum alloys for offshore drilling systems. *Proceedings of the 14-th International Conference on OMAE 1995 // Offshore Technology*. 1995. Vol. I-B. P. 299–306. (rus.)
4. **Fayn G.M., Golovin A.A., Voronkov G.A., Danelyants M.S., Ryabikhina S.M.** Dlitelnaya prochnost burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov pri povyshennykh temperaturakh ekspluatatsii. *Neftyanaya promyshlennost. Ser. «Mashiny i neftyanoye oborudovaniye»*. 1980. № 8. S. 10–12. (rus.)
5. **Kolesov S.S., Kondratyev S.Yu., Chizhikov V.V., Shvetsov O.V.** Issledovaniye struktury i svoystv burilnykh trub iz splava D16T posle ekspluatatsii v usloviyakh nefte-dobychi. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2011. № 11. S. 39–43. (rus.)
6. **Shvetsov O.V., Kondratyev S.Yu.** Vliyaniye gory-

acheyp osadki zamkovogo soyedineniya na strukturu i svoystva metalla burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov D16T i 1953T1. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2012. № 5. S. 31–36. (rus.)

7. **Shvetsov O.V., Kondratyev S.Yu.** Vliyaniye tekhnologicheskikh nagrevov na ekspluatatsionnyye svoystva splavov D16T i 1953T1, primenyayemykh dlya izgotovleniya trub. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2012. № 5. S. 36–42. (rus.)

8. **Kondratyev S.Yu., Shvetsov O.V.** Vliyaniye vysokotemperaturnykh nagrevov na strukturu i svoystva alyuminiyevykh splavov pri izgotovlenii burilnykh trub. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 4 (694). S. 24–30. (rus.)

9. **Kondratyev S.Yu., Zotov O.G., Shvetsov O.V.** Strukturnaya stabilnost i izmeneniye svoystv alyuminiyevykh splavov D16 i 1953 v protsesse izgotovleniya i ekspluatatsii burilnykh trub. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 10 (700). S. 15–21. (rus.)

10. **Karlashov A.V., Yarov A.N., Gilman K.N., Zhidovtsev N.A.** Korrozionno-ustalostnaya prochnost burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov. M.: Nedra, 1977. 183 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: petroprom2013@yandex.ru.

ШВЕЦОВ Олег Викторович — инженер ООО «Везерфорд»; 125047, 4-й Лесной пер., 4, Москва, Россия; e-mail: shvec_off@mail.ru.

АЛЬХИМЕНКО Алексей Александрович — директор НИОЦ «Везерфорд-Политехник» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия ; e-mail: wft-polytechnic@cef.spbstu.ru.

AUTHORS

KONDRAT'EV Sergey Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: petroprom2013@yandex.ru.

SHVECOV Oleg V. — Weatherford; 125047, 4 Lesnoy Per. 4, Moscow, Russia; e-mail: shvec_off@mail.ru.

ALHIMENKO Aleksey A. — Research and Educational Center «Weatherford-Polytechnic» of St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: wft-polytechnic@cef.spbstu.ru.