

DOI: 10.18721/JEST.230124

УДК 621.785.3:669.715.017:620.18:622.24.05

*О.В. Швецов*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16Т И 1953Т1**

Получены экспериментально и проанализированы результаты исследований влияния эксплуатационных и технологических факторов на структуру, механические и коррозионные свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1, применяемых для изготовления бурильных труб в нефтедобывающей промышленности. Установлено, что процессы старения сплавов Д16Т и 1953Т1 при изготовлении бурильных труб и их эксплуатации имеют различный характер. Показано, что сплав Д16Т значительно более устойчив к разупрочнению при технологическом нагреве и эксплуатации в условиях нефтедобычи по сравнению со сплавом 1953Т1. Сформулированы практические рекомендации для повышения эксплуатационной надежности бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ; МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; МИКРОСТРУКТУРА; СТАРЕНИЕ; ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ НАГРЕВ; ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ; БУРИЛЬНЫЕ ТРУБЫ.

*Ссылка при цитировании:*

О.В. Швецов. Повышение эксплуатационной надежности бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 236–246. DOI: 10.18721/JEST.230124

*O.V. Shvecov*

## **IMPROVING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF DRILL PIPES OF ALUMINIUM ALLOYS D16T AND 1953T1**

The paper presents the results of the experimental study and analysis on the influence of operational and technological factors on the structure, mechanical and corrosion properties of aluminum alloys D16T and 1953T1 used for the manufacturing drill pipes for the petrochemical industry. It was found that the aging processes of these alloys during manufacturing and further operation have a different character. It is shown that the D16T alloy is much more resistant to softening under technological heated and operating conditions of extraction in comparison with the 1953T1 alloy. Practical recommendations to improve the maintenance ability drill pipes of aluminium alloys D16T and 1953T1 were formulated.

DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS; MECHANICAL PROPERTIES; MICROSTRUCTURE; AGING; TECHNOLOGICAL HEATING; OPERATIONAL RELIABILITY; DRILL PIPES.

*Citation:*

O.V. Shvecov, Improving the operational reliability of drill pipes of aluminium alloys D16T and 1953T1, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 236–246, DOI: 10.18721/JEST.230124

### **Введение**

В связи с исчерпанием легко добываемых ресурсов нефти и газа нефтегазовому комплексу приходится осваивать месторождения на больших глубинах, применять наклонно-горизонтальное или глубоководное бурение. Ис-

пользуемые в этих случаях современные технологии бурения требуют повышения мощности оборудования или применения материалов альтернативных стали. Одна из таких альтернатив — алюминиевые сплавы для изготовления бурильных труб в нефтедобывающей промышленности [1–9]. Опытное применение алюми-

ниевых труб в нефтяной и газовой промышленности началось в 1960-м году. За прошедшие годы опыт применения высокопрочных алюминиевых деформируемых сплавов для изготовления бурильных труб показал их значительные преимущества по сравнению со сталью [10–15]. Одни из главных достоинств алюминиевых труб — низкий удельный вес и более высокая удельная прочность. Последнее имеет особое значение в современных условиях, когда возрастает необходимость разработки новых залежей, располагающихся на больших глубинах и в более сложных геологических пластах. Однако до настоящего времени применение алюминиевых сплавов ограничено. Это связано с консерватизмом нефтяной и газовой промышленности и, главное, отсутствием практических рекомендаций по выбору технологических параметров изготовления и определению допустимых условий эксплуатации бурильных труб из алюминиевых сплавов.

Бурильные трубы из алюминиевых сплавов изготавливают сборными, используя для их соединения стальные замки, которые навинчиваются горячей посадкой. При реализации такой технологической операции происходит нагрев материала замка и трубы. Подобные нагревы могут оказывать существенное влияние на свойства алюминиевых сплавов, инициируя протекание в них диффузионных процессов, приводящих к структурным и фазовым превращениям. В процессе последующей эксплуатации сборные алюминиевые бурильные трубы (со стальными замками) подвергаются длительному (~ 1000 ч) нагреву до температур ~ 150 °С и воздействию коррозионно-активной среды нефтегазовых месторождений. Жесткие условия эксплуатации также должны оказывать существенное влияние на структуру и, как следствие, свойства алюминиевых сплавов. Однако влияние таких технологических и эксплуатационных факторов на структуру и свойства алюминиевых сплавов, используемых для изготовления бурильной техники, систематически не исследовано.

**Целью излагаемой работы** было исследование того, как влияют технологические параметры изготовления и условия эксплуатации бурильных труб в нефтегазовой промышленности на структуру и свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.

### Материал и методика исследований

В качестве материала исследования использовали бурильные трубы с наружными диаметрами 147 и 90 мм из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 систем соответственно Al-Cu-Mg и Al-Zn-Mg-Cu. Материал труб исследовали как в состоянии поставки, так и после эксплуатации на месторождениях. В состоянии поставки трубы были термически обработаны по стандартным режимам: Д16Т — закалка от 500 °С в воде + естественное старение в течение 4 суток; 1953Т1 — закалка от 480 °С в воде + искусственное старение 24 ч при 125 °С.

Из труб изготавливали стандартные пятикратные цилиндрические образцы  $d_0 = 6$  мм для статических испытаний на растяжение и цилиндрические образцы  $\varnothing = 10$  мм и высотой 20 мм для структурных исследований и определения микротвердости сплавов [16].

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 было менее 0,1 масс. %. Содержание основных химических компонентов в сплавах соответствовало стандартным значениям (см. таблицу).

На основе анализа литературных данных были определены две принципиально важные температурно-временные области исследования, оказывающие наибольшее влияние на материал бурильных труб при изготовлении (технологические факторы) и в процессе эксплуатации при разработке нефтегазовых месторождений (эксплуатационные факторы).

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 заданное время и охлаждали на воздухе. После термического воздействия определяли механические свойства и исследовали структуру сплавов.

Металлографический анализ продольных и поперечных шлифов проводили на оптическом

Таблица

**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	≤ 0,10	0,15–0,25	0,02–0,1	≤ 0,25	≤ 0,2

микроскопе «Reichert–Jung MeF3A» при увеличениях  $\times 100$ – $500$  с использованием программы автоматического количественного анализа изображений согласно процедуре ASTM E 1245–03. Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3–95. Фазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре общего назначения «ДРОН–3,0» в медном излучении.

Механические свойства при статических испытаниях на одноосное растяжение при комнатной температуре определяли по ГОСТ 1497–84. Испытания проводили на разрывной машине «Schenck» с максимальным усилием нагружения 200 кН при скорости нагружения 1 мм/мин. Микротвердость определяли по методу Виккерса на приборе «Reichert–Jung Micro-Duromat 4000E» в соответствии с процедурой ASTM E 92.

Для оценки коррозионной стойкости сплавов использовали два типа испытаний: на общую коррозию ASTM G31 и на контактную коррозию ASTM G71. При определении общей коррозии алюминиевых сплавов в качестве коррозионной среды, моделирующей условия разработки нефтяной скважины, использовали раствор NaCl + NaOH с  $pH = 11$ . Контактную коррозию исследовали, используя образцы, изготовленные из буровой трубы (алюминиевый сплав) и стального замка (сталь 40ХН2МА). Предварительно определяли скорость коррозии алюминиевого сплава и стали в 5 %-м растворе NaCl и в растворе NaCl + NaOH с  $pH = 11$  в отсутствие контакта. Для этого использовали образцы алюминиевого сплава в виде пластин размером 40×20×3 мм и стали 40ХН2МА в виде полого цилиндра высотой 17 мм. Для определения влияния контакта стали 40ХН2МА на скорость коррозии алюминиевого сплава испытания прово-

дили в растворе NaCl + NaOH с  $pH = 11$ , используя два типа образцов с различными формой и линейными размерами — в виде дисков и стержней.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты предварительных исследований отработавшей сборной буровой трубы размером 147×13 мм из алюминиевого сплава Д16Т показали, что после эксплуатации в течение 1003 ч в условиях работы нефтяной скважины механические свойства и коррозионная стойкость металла снижаются относительно состояния поставки [17]. При этом наибольшие изменения структуры и свойств сплава наблюдаются на участке алюминиевой трубы, ввинченной в стальной замок, а также на граничном участке контакта трубы и замка. В связи с этим целесообразно детально исследовать влияние условий изготовления (горячая посадка замка) и эксплуатации буровых труб на структуру и свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 в месте контакта алюминиевой трубы и стального замка.

Результаты экспериментов позволили установить, что технологический нагрев в области температур 200–250 °С длительностью до 10 мин. при горячей посадке замкового соединения оказывает значительное влияние на механические свойства буровых труб из сплавов обеих марок (рис. 1). Изменение свойств обусловлено протеканием диффузионных процессов, характер которых в сплавах Д16Т и 1953Т1 в условиях технологического нагрева труб различен [18–23]. В результате последовательного, но противоположного действия процессов «возврата при старении» и последующего дисперсионного твердения механические свойства сплава Д16Т после нагрева длительностью до 10 мин. изменяются незначительно относительно состояния поставки

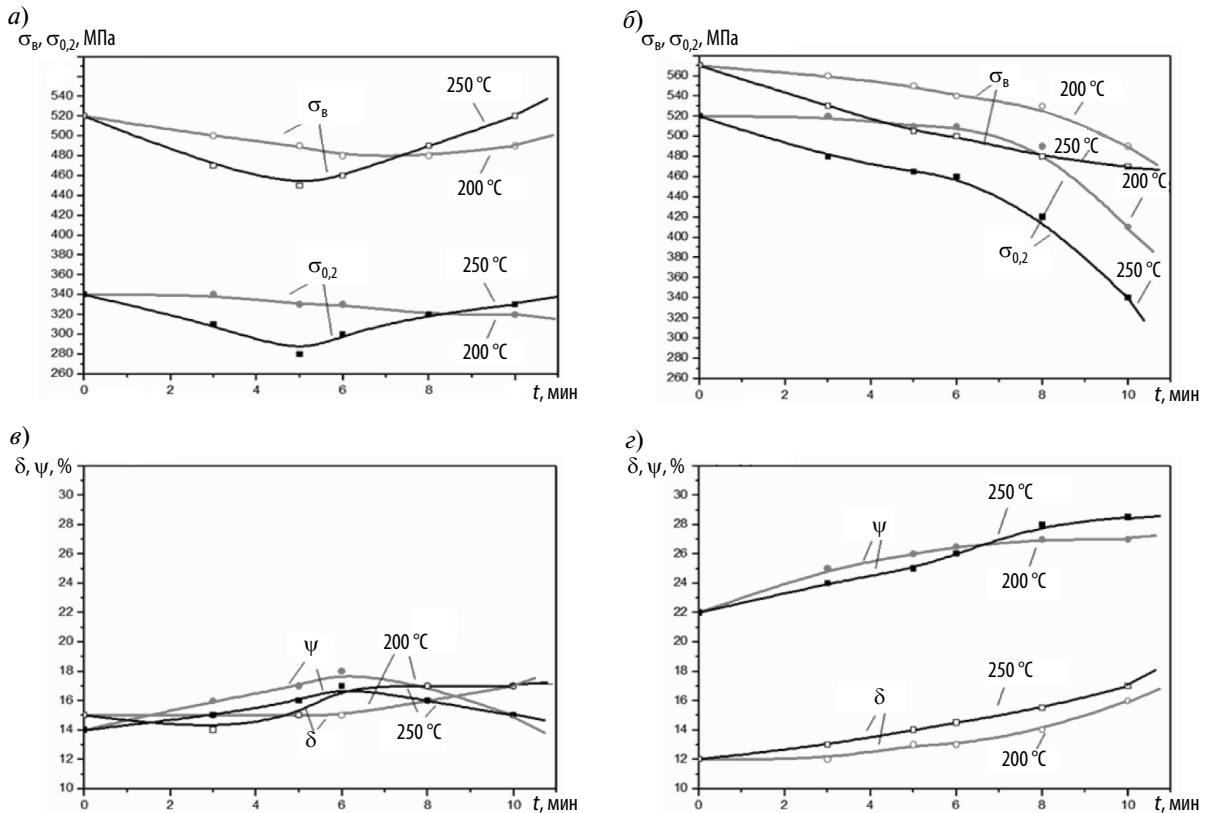


Рис. 1. Влияние температуры и длительности технологического нагрева при сборке бурильных труб на механические свойства сплавов Д16Т (а, б) и 1953Т1 (в, з)

(см. рис. 1). В начальный период нагрева (до  $\sim 6$  мин.) превалирует «возврат при старении», что приводит к некоторому разупрочнению сплава и повышению пластичности. Однако при более длительном нагреве этот эффект компенсируется началом дисперсионного твердения. Важно, что повышение температуры нагрева от 200 до 250 °С также несущественно влияет на величину изменения прочности и пластичности сплава. Благодаря этому сплав Д16Т устойчив к технологическому нагреву в условиях монтажа бурового оборудования и не требует жесткого регламентирования температурно-временных параметров горячей посадки замкового соединения. Более того, рекомендуемым является более длительный нагрев (8–10 мин).

В сплаве 1953Т1 процесс старения начинается практически с начала нагрева в области температур 200–250 °С и имеет одинаковый характер при всех исследованных выдержках. При старении в структуре сплава происходит выделение вторичных интерметаллидов и коагуляция

имеющихся и выделяющихся включений. При длительности технологического нагрева менее 5–6 мин. эти процессы протекают медленно, что несколько снижает прочностные и повышает пластические свойства материала. Увеличение длительности нагрева более 6 мин. значительно интенсифицирует процесс старения, особенно при 250 °С, причем коагуляция интерметаллидов превалирует над их выделением в структуре. Вследствие этого нагрев длительностью 6–10 мин. приводит к существенному разупрочнению сплава 1953Т1.

На рис. 2 показано изменение механических свойств сплава Д16Т после технологического нагрева и последующего эксплуатационного нагрева, имитирующего условия работы бурильных труб при разработке нефтегазовых месторождений: температура 150 °С, выдержка 500 и 1000 ч. Полученные экспериментальные результаты показывают, что увеличение количества дисперсных включений в структуре сплава Д16Т в результате протекания начальных стадий

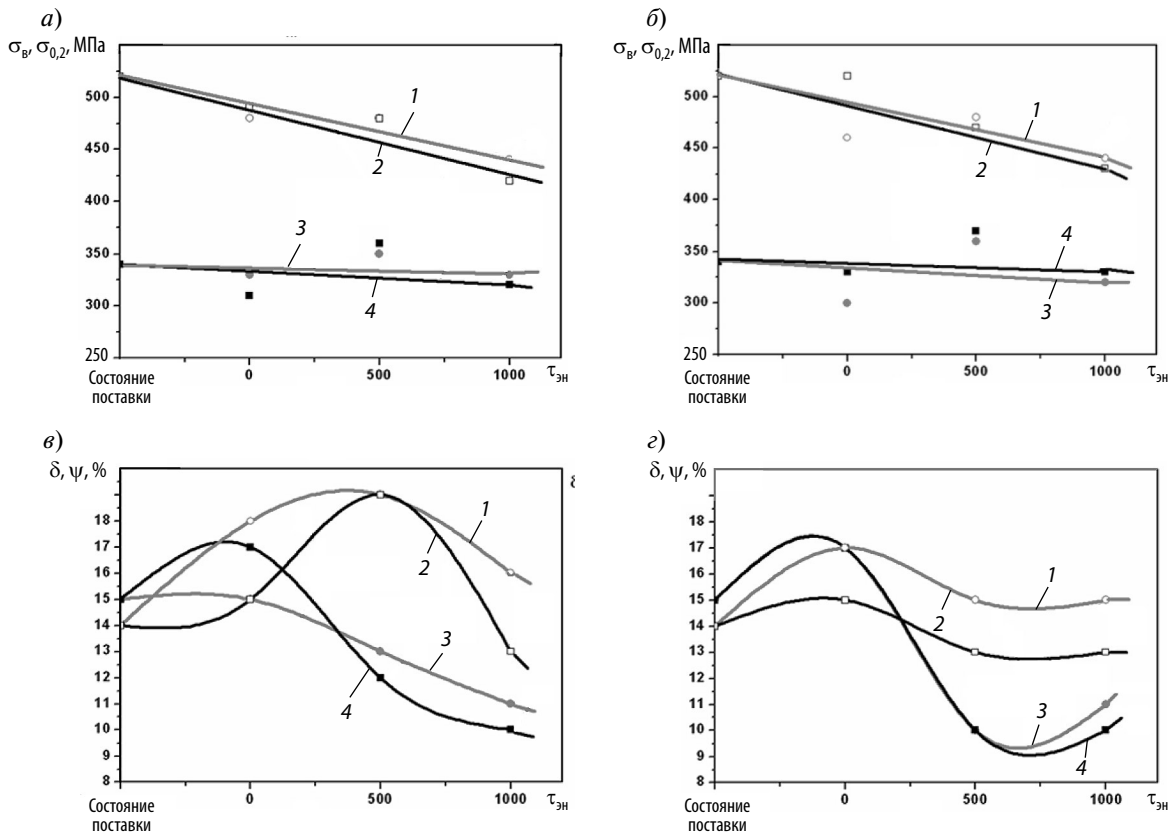


Рис. 2. Влияние длительности эксплуатационной выдержки  $\tau_{эн}$  при 150 °С на механические свойства сплава Д16Т после предварительного технологического нагрева (точка «0») до 200 (а, в) или 250 (б, з) °С с выдержкой  $\tau_n$  6 (кривые 1, 3) или 10 (кривые 2, 4) минут:  
а и б —  $\sigma_{в}$  (1, 2) и  $\sigma_{0,2}$  (3, 4); в и з —  $\delta$  (1, 2) и  $\psi$  (3, 4)

искусственного старения в процессе эксплуатации при 150 °С способствует упрочнению матричного твердого раствора [24]. В результате выдержка длительностью до 500 ч мало влияет на величину  $\sigma_{в}$  и практически не изменяет  $\sigma_{0,2}$  сплава. Увеличение продолжительности выдержки до 1000 ч, сопровождающееся началом коагуляции вторичных интерметаллидов, приводит к постепенному разупрочнению сплава. Однако этот процесс в сплаве Д16Т происходит медленно и не приводит к значительному изменению механических свойств. Видно также (см. рис. 2), что повышение температуры предварительного технологического нагрева от 200 до 250 °С и увеличение выдержки от 6 до 10 мин. практически не оказывают влияния на характер и интенсивность изменения механических свойств сплава Д16Т в процессе последующей длительной эксплуатационной выдержки при 150 °С.

Выдержка сплава 1953Т1 длительностью 500 ч при 150 °С приводит к резкому и значи-

тельному снижению прочностных характеристик:  $\sigma_{в}$  уменьшается на 70–110 МПа,  $\sigma_{0,2}$  — на 20–170 МПа относительно состояния материала после технологического нагрева (в зависимости от его режима), или соответственно на 140–160 МПа и 180–200 МПа относительно состояния поставки (рис. 3). При увеличении выдержки до 1000 ч разупрочнение сплава продолжается, но интенсивность его значительно уменьшается. Пластические характеристики сплава 1953Т1 в течение выдержки при 150 °С монотонно возрастают. После 1000 ч выдержки  $\delta$  возрастает на 1–3 %, а  $\psi$  — на 20–23 % относительно состояния материала после технологического нагрева, или соответственно на 4–7 % и 24–29 % относительно состояния поставки. Характерно, что увеличение значений относительного сужения на порядок превышает возрастание относительного удлинения. Это свидетельствует об уменьшении коэффициента деформационного упрочнения сплава.

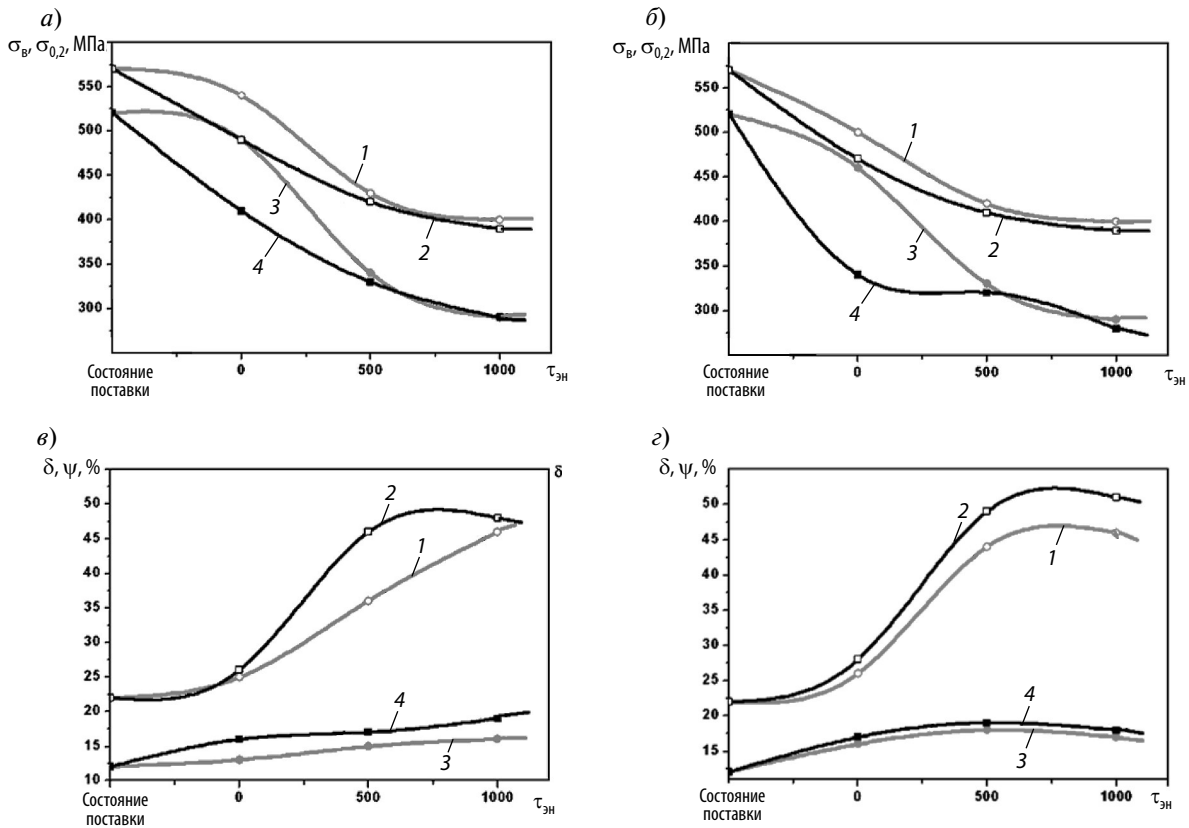


Рис. 3. Влияние длительности эксплуатационной выдержки  $\tau_{Эн}$  при 150 °С на механические свойства сплава 1953Т1 после предварительного технологического нагрева (точка «0») до 200 (а, в) или 250 (б, г) °С с выдержкой  $\tau_{н}$  6 (кривые 1, 3) или 10 (кривые 2, 4) минут:  
 а и б —  $\sigma_{в}$  (1, 2) и  $\sigma_{0,2}$  (3, 4); в и г —  $\delta$  (1, 2) и  $\psi$  (3, 4)

Анализ экспериментальных данных свидетельствует об интенсивном протекании процесса искусственного старения в сплаве 1953Т1 с начала выдержки и во всем ее исследованном интервале при температуре эксплуатации 150 °С.

Будучи более прочным по сравнению со сплавом Д16Т в состоянии поставки, сплав 1953Т1 значительно уступает ему по этому показателю уже после кратковременного технологического нагрева при изготовлении буровой трубы и, тем более, после длительного нагрева при эксплуатации. Так, в исходном состоянии  $\sigma_{в}$  и  $\sigma_{0,2}$  сплава 1953Т1 соответственно на 50 и 180 МПа выше, чем у сплава Д16Т. Однако после технологического нагрева и последующей выдержки при температуре эксплуатации 150 °С длительностью 500 ч значения временного сопротивления разрыву и условного предела текучести сплава 1953Т1 ниже, чем сплава Д16Т, соответственно на 30–40 и 30–60 МПа. При этом сплав 1953Т1 значительно

уступает сплаву Д16Т по такой важной эксплуатационной характеристике, как резерв пластичности —  $1 - \sigma_{0,2}/\sigma_{в}$  (рис. 4).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что сплав Д16Т более стабилен по сравнению со сплавом 1953Т1 при использовании этих материалов для изготовления буровых труб в нефтегазодобывающей промышленности. Сплав 1953Т1 требует жесткого регламентирования температурно-временных параметров изготовления оборудования и обладает более низкой эксплуатационной стойкостью, чем сплав Д16Т. Сплав Д16Т не требует жесткого регламентирования температурно-временных параметров изготовления оборудования и обладает более высокой эксплуатационной стойкостью. Это позволяет, во-первых, считать его более технологичным и, во-вторых, рекомендовать для изготовления буровых труб, предназначенных для более сложных условий эксплуатации.

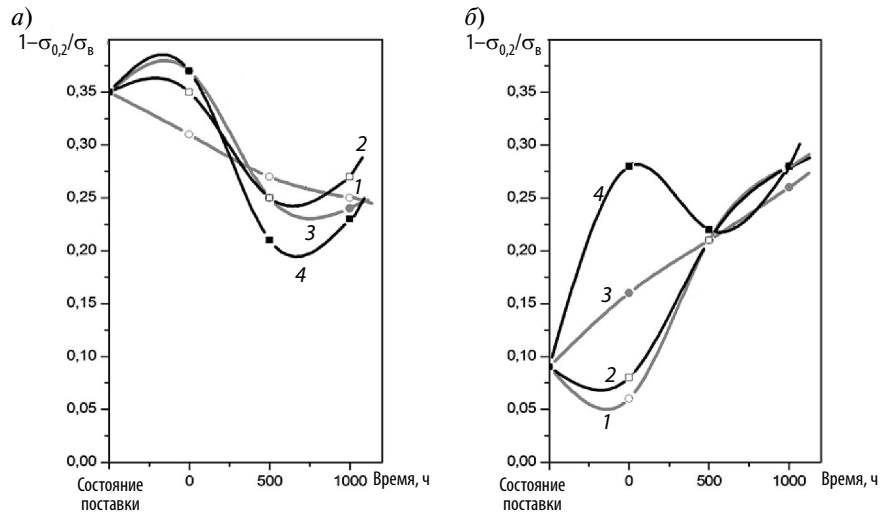


Рис. 4. Влияние длительности эксплуатационной выдержки при 150 °С на резерв пластичности ( $1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B$ ) сплавов Д16Т (а) и 1953Т1 (б) после предварительного технологического нагрева (точка «0») до 200 (1, 3) или 250 (2, 4) °С с выдержкой 6 (1, 2) или 10 (3, 4) минут

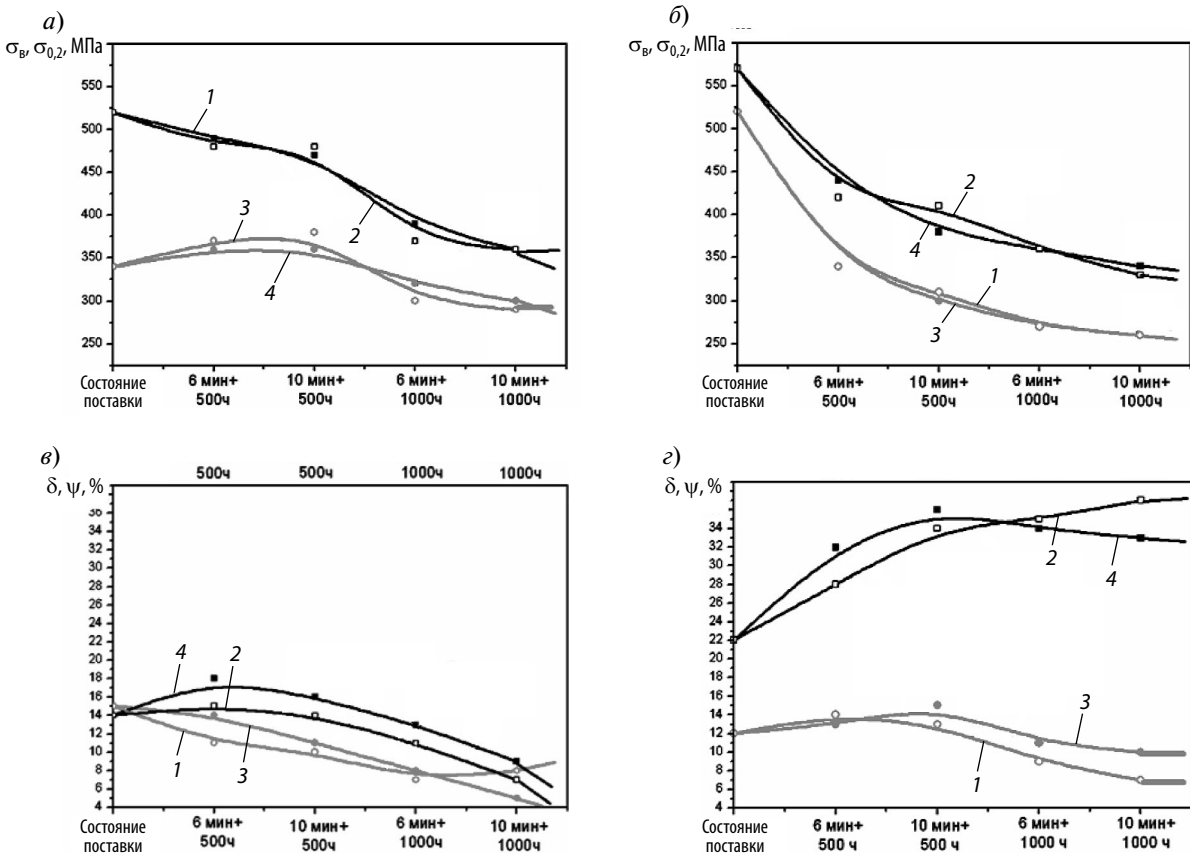


Рис. 5. Влияние выдержки длительностью 500 или 1000 ч при 150 °С в растворе NaCl + NaOH ( $pH = 11$ ) на механические свойства сплавов Д16Т (а, в) и 1953Т1 (б, г) после предварительного технологического нагрева до 200 (3, 4) или 250 (1, 2) °С в течение 6 или 10 минут: а и б —  $\sigma_B$  (2, 4) и  $\sigma_{0,2}$  (1, 3); в и г —  $\delta$  (1, 3) и  $\psi$  (2, 4)

Для объективной оценки работоспособности бурильных труб из сплавов Д16Т и 1953Т1 необходимо исследовать влияние коррозионно-активной среды нефтегазовых месторождений на характер общей коррозии и механические свойства сплавов [25–27].

Механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 после предварительного кратковременного технологического нагрева и последующего длительного эксплуатационного нагрева по разным режимам в коррозионной среде представлены на рис. 5. Для сравнения на этих же графиках показаны прочностные и пластические характеристики сплавов в состоянии поставки (исходные значения).

Видно, что кратковременный технологический нагрев с последующим длительным эксплуатационным нагревом в коррозионно-активной среде снижает механические свойства исследованных сплавов, причем у 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.

Учитывая провоцирующее влияние контакта алюминиевой трубы со стальным замком в процессе эксплуатации бурильной колонны необходимо оценить склонность сплавов к контактной коррозии. Результаты исследования показали, что сплав 1953Т1 в значительно большей степени, чем Д16Т, подвержен общей коррозии в среде нефтегазовых месторождений; поэтому испытывали образцы, изготовленные из сплава 1953Т1 в состоянии поставки (бурильная труба) в контакте с образцами из стали 40ХН2МА (замок).

Полученные результаты позволяют заключить, что среда нефтяных скважин оказывает отрицательное коррозионное воздействие на бурильные трубы из алюминиевых сплавов 1953Т1 и Д16Т. Однако оба сплава после технологического нагрева при изготовлении из них сборных бурильных труб со стальным замком достаточно устойчивы при эксплуатации в условиях разработки углеводородных месторожде-

ний. При этом сплав Д16Т имеет существенное преимущество по этой характеристике по сравнению со сплавом 1953Т1.

### Выводы

Экспериментально изучено изменение структуры и механических свойств сплавов Д16Т и 1953Т1 после кратковременного нагрева до температур 200–250 °С и длительной выдержки при 150 °С, имитирующих соответственно горячую посадку замкового соединения и последующую эксплуатацию сборных бурильных труб в условиях разработки нефтегазовых месторождений. Показано, что в исходном естественно состаренном сплаве Д16Т в этих условиях не наблюдается существенного изменения прочности и пластичности. В сплаве 1953Т1 интенсивное протекание диффузионных процессов распада твердого раствора и коагуляции интерметаллидов в структуре приводят к быстрому значительному разупрочнению.

Экспериментально исследовано влияние коррозионно-активной среды нефтегазовых месторождений на общую и контактную коррозию алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1. Показано, что алюминиевые сплавы Д16Т и — в меньшей степени — 1953Т1 имеют удовлетворительную эксплуатационную стойкость в этих условиях.

На базе комплексных экспериментальных исследований влияния условий изготовления и эксплуатации сборных бурильных труб (со стальным замковым соединением) на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 и выявленных закономерностей обоснована возможность применения этих сплавов для изготовления бурильных труб и обеспечения ресурса такого оборудования, требуемого при разработке нефтегазовых месторождений. Установлены значительные технологические и эксплуатационные преимущества сплава Д16Т по сравнению с 1953Т1 при использовании этих материалов для изготовления бурильных труб, особенно для сложных условий эксплуатации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Файн Г.М., Макаров Г.С. Особенности производства и применения бурильных труб из сплавов алюминия в России // Технология легких сплавов. 2002. № 1. С. 16–20.

2. Босович В.С., Буяновский И.Н., Сапунжи В.В. Комбинированные бурильные колонны для проходки горизонтальных участков и боковых стволов малого диаметра с применением алюминиевых труб //



Бурение и нефть. 2013. № 6. С. 61–64.

3. **Прохоров С.** Алюминий возвращается // Нефть России. 2011. № 6. С. 76–77.

4. **Vakhrushev A.V. [et al.]** Aluminium Drill pipe in an Arctic Application—A Well-known Tool Changing the Development Strategy // SPE Arctic and Extreme Environment Conference. 18–20 October. 2011. Paper SPE 149707.

5. **Gelfgat M.Ya. [et al.]** Aluminum Alloy Tubules—Assessment for Ultra long Well Construction // SPE Annual Technical Conference and Exhibition in Anaheim. 11–14 November. 2007. Paper SPE 109722.

6. **Hong L.J. [et al.]** HZ25–4 ERD Challenging Drilling Project—New Strategy and New technology Implementation Are the Keys to Improved Drilling Performance // SPE ATCE. 19–22 September. 2010. Paper SPE 134949.

7. **Сапунжи В.В.** Эффективность применения алюминиевых буровых труб при бурении скважин на нефть и газ // Бурение и нефть. 2012. № 6–7. С. 48–52.

8. **Tikhonov V.S. [et al.]** Comprehensive Studies of Aluminum Drill pipe // IADC/SPE Drilling Conference. 2–4 February. 2010. Paper IADC/SPE 128328.

9. **Nick B., Mohammed H., Jerry F.** Can Aluminum Drill Pipe be handled in the Same Manner as Conventional Steel Pipe in Fishing and Milling Operations? // Rio Oil & Gas Expo and Conference. 17–20 September. 2012. Paper IBP 0999\_12.

10. **Gelfgat M.Ya. [et al.]** Aluminum Alloys for Casing and Tubing // International Petroleum Technology Conference. 15–17 November. 2011. Paper IPTC 14888.

11. **Gelfgat M.Ya. [et al.]** High-Strength Aluminum Alloys for Deepwater Riser Applications // Proceedings of the Offshore Technology Conference. 2004. Paper OTC 16185.

12. **Gelfgat M.Ya., Tikhonov V.S., Chizhikov V.V.** Aluminum Alloy Risers — Innovation Project Experience for Offshore Oil & Gas Wells // Vestnik Assotsiatsii Burovikh Podryadchikov (Herald of the Association of Drilling Contractors). 2013. № 1. P. 40–47.

13. **Tikhonov V.S. [et al.]** Aluminum Catenary Production Riser: Design, Testing Results, Ways to Improvement // Proceedings of the ASME 31st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2012. Paper OMAE 2012–83001.

14. **Телешов В.В., Головлева А.П.** Влияние малых добавок серебра и параметров технологии изготовления на структуру и свойства полуфабрикатов из сплавов системы Al-Cu-Mg-Xi // Технология легких сплавов. 2006. № 1–2. С. 99–119.

15. **Захаров В.В., Елагин В.И., Ростова Т. Д., Самарина М.В.** Пути развития и совершенствования высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu // Технология легких сплавов. 2008. № 4. С. 7–13.

16. **Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов: Учебное пособие / М-во образования и науки

Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб, 2011. 128 с.

17. **Колесов С.С., Кондратьев С.Ю., Чижиков В.В., Швецов О.В.** Исследование структуры и свойств буровых труб из сплава Д16Т после эксплуатации в условиях нефтедобычи // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 4. С. 39–43.

18. **Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МИСиС, 1999. 413 с.

19. **Белов Н.А.** Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: Издательский дом МИСиС, 2010. 511 с.

20. **Фридляндер И.Н.** Закономерности изменения свойств алюминиевых сплавов при старении // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 9. С. 8–11.

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

22. **Швецов О.В., Кондратьев С.Ю.** Влияние горячей посадки замкового соединения на структуру и свойства металла буровых труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // Технология машиностроения. 2012. № 5. С. 31–36.

23. **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.

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

25. **Синявский В.С., Устьянцев В.У.** Защита от коррозии буровых труб из алюминиевых сплавов. М.: Недра, 1976. 110 с.

26. **Кондратьев С.Ю., Швецов О.В., Альхименко А.А.** Изменение механических свойств алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 в коррозионно-активной среде нефтяных скважин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 2 (195). С. 93–99.

27. **Швецов О.В., Альхименко А.А., Кондратьев С.Ю.** Коррозионные повреждения буровых труб из алюминиевых сплавов Д16 и 1953 при эксплуатации в условиях нефтедобычи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 3 (202). С. 180–191.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШВЕЦОВ Олег Викторович** — кандидат технических наук инженер I категории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: shvec\_off@mail.ru

## REFERENCES

1. **Fayn G.M., Makarov G.S.** Osobennosti proizvodstva i primeneniya burilnykh trub iz splavov alyuminiya v Rossii. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2002. № 1. S. 16–20. (rus.)
2. **Bosovich V.S., Buyanovskiy I.N., Sapunzhi V.V.** Kombinirovannyye burilnyye kolonny dlya prokhodki gorizontalnykh uchastkov i bokovykh stvolov malogo diametra s primeneniyyem alyuminiyevykh trub. *Burennye i nefi*. 2013. № 6. S. 61–64. (rus.)
3. **Prokhorov S.** Alyuminiy vozvrashchayetsya. *Nefi Rossii*. 2011. № 6. S. 76–77. (rus.)
4. **Vakhrushev A.V. [et al.]** Aluminium Drill pipe in an Arctic Application—A Well-known Tool Changing the Development Strategy. *SPE Arctic and Extreme Environment Conference*. 18–20 October. 2011. Paper SPE 149707.
5. **Gelfgat M.Ya. [et al.]** Aluminum Alloy Tubules—Assessment for Ultra long Well Construction. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition in Anaheim*. 11–14 November. 2007. Paper SPE 109722.
6. **Hong L.J. [et al.]** HZ25–4 ERD Challenging Drilling Project—New Strategy and New technology Implementation Are the Keys to Improved Drilling Performance. *SPE ATCE*. 19–22 September. 2010. Paper SPE 134949.
7. **Sapunzhi V.V.** Effektivnost primeneniya alyuminiyevykh burilnykh trub pri burenii skvazhin na nefi i gaz. *Burennye i nefi*. 2012. № 6–7. С. 48–52. (rus.)
8. **Tikhonov V.S. [et al.]** Comprehensive Studies of Aluminum Drill pipe. *IADC/SPE Drilling Conference*. 2–4 February. 2010. Paper IADC/SPE 128328.
9. **Nick B., Mohammed H., Jerry F.** Can Aluminum Drill Pipe be handled in the Same Manner as Conventional Steel Pipe in Fishing and Milling Operations? *Rio Oil & Gas Expo and Conference*. 17–20 September. 2012. Paper IBP 0999\_12.
10. **Gelfgat M.Ya. [et al.]** Aluminum Alloys for Casing and Tubing. *International Petroleum Technology Conference*. 15–17 November. 2011. Paper IPTC 14888.
11. **Gelfgat M.Ya. [et al.]** High-Strength Aluminum Alloys for Deepwater Riser Applications. *Proceedings of the Offshore Technology Conference*. 2004. Paper OTC 16185.
12. **Gelfgat M.Ya., Tikhonov V.S., Chizhikov V.V.** Aluminum Alloy Risers — Innovation Project Experience for Offshore Oil & Gas Wells. *Vestnik Assotsiatsii Burovikh Podryadchikov* (Herald of the Association of Drilling Contractors). 2013. №1. P. 40–47.
13. **Tikhonov V.S. [et al.]** Aluminum Catenary Production Riser: Design, Testing Results, Ways to Improvement. *Proceedings of the ASME 31st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2012. Paper OMAE 2012–83001.
14. **Teleshov V.V., Golovliova A.P.** Vliianie malykh dobavok serebra i parametrov tekhnologii izgotovleniia na strukturu i svoiystva polufabrikatov iz splavov sistemy Al-Cu-Mg-Xi. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2006. № 1–2. S. 99–119. (rus.)
15. **Zakharov V.V., Yelagin V.I., Rostova T.D., Samarina M.V.** Puti razvitiya i sovershenstvovaniya vysokoprochnykh splavov sistemy Al-Zn-Mg-Cu. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2008. № 4. S. 7–13. (rus.)
16. **Kondratyev S.Yu.** Mekhanicheskiye svoystva metallov: Uchebnoye posobiye / M-vo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii, Sankt-Peterburgskiy gos. politekhnicheskii un-t. SPb, 2011. 128 s. (rus.)
17. **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 nefedobychi [Investigation of the structure and mechanical properties of drill pipe made of alloy D16T after exploitation in the oil production]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyeni*. 2011. № 4. S. 39–43. (rus.)
18. **Kolachev B.A., Yelagin V.I., Livanov V.A.** Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov: Uchebnik dlya vuzov. 3-ye izd., pererab. i dop. — M.: Izd-vo MISiS, 1999. 413 s. (rus.)
19. **Belov N.A.** Fazovyy sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminiyevykh splavov. M.: Izdatelskiy dom MISiS, 2010. 511 s. (rus.)
20. **Fridlyander I.N.** Zakonomernosti izmeneniya svoystv alyuminiyevykh splavov pri starenii [Features of the properties changings of aluminium alloys during aging]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2003. № 9. S. 8–11. (rus.)
21. **Kondratyev S.Yu., Shvetsov O.V.** Vliyaniye vysokotemperaturnykh nagrevov na strukturu i svoystva alyuminiyevykh splavov pri izgotovlenii burilnykh trub [Effect of High-Temperature Heating on the Structure and Properties of Aluminum Alloys in the Production of Drill Pipes]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 4 (694). S. 24–30. (rus.)
22. **Shvetsov O.V., Kondratyev S.Yu.** Vliyaniye goryachey posadki zamkovogo soyedineniya na strukturu i svoystva metalla burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov D16T i 1953T1. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2012. № 5. S. 31–36. (rus.)
23. **Shvetsov O.V., Kondratyev S.Yu.** Vliyaniye tekhnologicheskikh nagrevov na ekspluatatsionnyye svoystva

сплавов D16T и 1953T1, применяемых для изготовления труб [The influence of technological heating on the operational properties of alloys D16T and 1953T1 used for the manufacturing of drill pipes]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2012. № 5. S. 36–42. (rus.)

24. **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 [Structural Stability and Variation of Properties of Aluminum Alloys D16 and 1953 in Production and Operation of Drill Pipes]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 10 (700). S. 15–21. (rus.)

25. **Sinyavskiy V.S., Ustyantsev V.U.** Zashchita ot korrozii burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov. M.: Nedra, 1976. 110 s. (rus.)

26. **Kondratyev S.Yu., Shvetsov O.V., Alkhimenko A.A.**

Izmeneniye mekhanicheskikh svoystv alyuminiyevykh splavov D16T i 1953T1 v korrozionno-aktivnoy srede neftnykh skvazhin [The changing of mechanical properties of aluminium alloys D16T and 1953T1 in the corrosion environment of oil wells]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2014. № 2 (195). S. 93–99. (rus.)

27. **Shvetsov O.V., Alkhimenko A.A., Kondratyev S. Yu.** Korrozionnyye povrezhdeniya burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov D16 i 1953 pri ekspluatatsii v usloviyakh nefte dobychi [Research of nature of corrosion damages of boring pipes from aluminium alloys D16 and 1953 at operation in the conditions of oil wells]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2014. № 3 (202). S. 180–191.

#### AUTHORS

**SHVECOV Oleg V.** — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: shvec\_off@mail.ru

**Дата поступления статьи в редакцию: 17.02.2017.**