

На правах рукописи



ШВЕЦОВ Олег Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ БУРИЛЬНЫХ
ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16 И 1953**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Кондратьев Сергей Юрьевич
профессор кафедры технологии
и исследования материалов
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Захаров Валерий Владимирович
главный научный сотрудник
ОАО «Всероссийский институт легких
сплавов», г. Москва

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Болобов Виктор Иванович
профессор кафедры машиностроения
ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-
сырьевой университет «Горный» (Горный
университет) (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация:

**ОАО «Центральный научно-
исследовательский институт материалов»**
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «19» февраля 2015г. в 14⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.229.03 в Федеральном государственном
автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " ____ " декабря 2014г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
кандидат технических наук



Климова О.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в связи с исчерпанием легко добываемых ресурсов нефти и газа нефтегазовому комплексу приходится осваивать месторождения на больших глубинах, применять наклонно-горизонтальное или глубоководное бурение. Современные технологии бурения рассчитаны на повышение мощности оборудования или применение альтернативных стали материалов. Возможность повышения мощности приводных механизмов довольно ограничена и экономически не целесообразна. Применение альтернативных стали материалов наиболее экономически выгодно за счет обширного спектра металлических материалов. Сложность в этом случае заключается в обоснованном выборе материала. Одной из таких альтернатив являются алюминиевые сплавы, опытное применение которых 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. Одним из главных достоинств алюминиевых труб является 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 является ограниченным, что связано с консерватизмом нефтяной и газовой промышленности и, главное, отсутствием практических рекомендаций по технологическим параметрам изготовления и допустимым условиям эксплуатации бурильных труб из алюминиевых сплавов. Таким образом, разработка и обоснование практических рекомендаций по технологии изготовления и условиям эксплуатации бурильных труб из алюминиевых сплавов является актуальной задачей, решение которой позволит повысить долю использования этих материалов в нефтегазодобывающей отрасли и увеличить ресурс оборудования, изготавливаемого из них.

Для изготовления бурильных труб в настоящее время ограничено используют алюминиевые сплавы марок Д16, 1953 и, менее всего, АК-4. Сплавы Д16 и 1953 относятся к деформируемым термически упрочняемым, причем 1953 после закалки подвергается искусственному старению, а Д16 – естественному.

Бурильные трубы из алюминиевых сплавов изготавливают сборными, используя для соединения труб стальные замки, которые навинчиваются горячей посадкой. В результате такой технологической операции происходит нагрев материала замка и трубы. Стальной замок нагревается до температуры ~ 300 °С, а алюминиевая труба – до 200-250 °С. Длительность выдержки материала трубы в области этих температур составляет 5-10 мин. Для алюминиевых сплавов подобные нагревы могут оказывать существенное влияние на свойства, 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 (до ~ 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 перечисленных

факторов на структуру и свойства алюминиевых сплавов, используемых для изготовления бурильной техники, систематически не исследовано.

Таким образом, обоснование возможности широкого применения алюминиевых сплавов для изготовления бурильных труб, а также разработка и научное обоснование практических рекомендаций по технологии изготовления и условиям эксплуатации такого оборудования в условиях разработки нефтегазовых месторождений являются важными и актуальными задачами современного металловедения. Решение их являлось предметом исследований данной диссертационной работы.

Целью работы является разработка и обоснование практических рекомендаций для повышения эксплуатационной надежности использования алюминиевых сплавов в нефтегазовой промышленности на основе исследования влияния технологических параметров изготовления и условий эксплуатации бурильных труб на структуру и свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.

Для достижения поставленной цели решали следующие **задачи**:

1. Анализ повреждений отработанных бурильных труб после эксплуатации на нефтяных месторождениях.
2. Исследование влияния технологических параметров изготовления бурильных труб на структуру и свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.
3. Изучение влияния температурно-временных условий эксплуатации бурильных труб на структуру и свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.
4. Исследование влияния эксплуатационной среды на коррозионную стойкость бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.
5. Разработка и обоснование практических рекомендаций по выбору алюминиевых сплавов для применения в нефтегазодобывающей отрасли промышленности, регламентированию технологических параметров изготовления бурильных труб и определению допустимых условий эксплуатации с целью увеличения ресурса работы бурового оборудования.

Научная новизна диссертационной работы:

– выявлены характер и последовательность трансформации структуры в деформируемых алюминиевых сплавах Д16Т и 1953Т1 при температурах 200-250 °С в интервале времени выдержки до 10 мин и последующей выдержке длительностью до 1000 ч при температуре 150 °С, т.е. в условиях, имитирующих изготовление и эксплуатацию сборных алюминиевых (со стальным замком) бурильных труб, применяемых для разработки нефтегазовых месторождений. Установлено последовательное изменение структуры исходно искусственно состаренного сплава 1953Т1, заключающееся в непрерывном распаде твердого раствора и коагуляции интерметаллидных фаз, и значительно более сложное изменение структуры исходно естественно состаренного сплава Д16Т, заключающееся в протекании двух противоположных по характеру процессов: возврата при старении и последующего дисперсионного твердения;

– установлена различная стабильность механических свойств алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 при изготовлении и эксплуатации бурильных труб, обусловленная разным характером структурных изменений, связанных с протеканием диффузионных процессов. Показано, что эти процессы не оказывают существенного влияния на характеристики прочности и пластичности естественно состаренного сплава Д16Т по сравнению с состоянием поставки, однако приводят к резкому разупрочнению искусственно состаренного сплава 1953Т1;

– изучен характер коррозионных повреждений при эксплуатации сборных алюминиевых бурильных труб в коррозионно-активной среде нефтегазовых месторождений. Выявлено, что алюминиевые сплавы Д16Т и 1953Т1 не проявляют склонности к коррозионному растрескиванию, но подвержены контактной коррозии, которая проявляется в месте контакта алюминиевой трубы со стальным замком. Показано, что, несмотря на отрицательное влияние коррозионной среды нефтяных скважин, алюминиевые сплавы Д16Т и 1953Т1 являются устойчивыми к эксплуатации в условиях добычи углеводородов, причем сплав Д16Т имеет значительное преимущество по коррозионной стойкости по сравнению с 1953Т1;

– экспериментально исследовано влияние оксидирования зоны контакта алюминиевых сплавов со сталью при изготовлении сборной бурильной трубы на характер и скорость контактной коррозии алюминиевого сплава в условиях эксплуатации. Показано, что оксидный слой, формирующийся на поверхности сплава, является сплошным, характеризуется высокими защитными и изолирующими свойствами и тормозит развитие локальной коррозии алюминиевого сплава в зоне контакта со сталью.

Практическая значимость результатов работы:

– обоснована возможность применения алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 для изготовления сборных бурильных труб (со стальным замковым соединением) при разработке нефтегазовых месторождений. Показаны существенные технологические и эксплуатационные преимущества сплава Д16Т по сравнению со сплавом 1953Т1 при использовании этих материалов для изготовления бурильных труб, особенно для сложных условий эксплуатации;

– сформулированы практические рекомендации для увеличения ресурса бурильного оборудования нефтегазодобывающей отрасли, изготовленного из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1, регламентирующие технологию их изготовления и условия эксплуатации;

– получена база экспериментальных данных по результатам длительных (до 1000 ч) испытаний при температуре 150 °С в коррозионно-активной среде нефтегазовых месторождений (раствор NaCl + NaOH с pH = 11) деформируемых алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1, в том числе в контакте со стальным замком составной бурильной трубы после технологического нагрева (200-250 °С, до 10 мин) при ее изготовлении;

– показана эффективность технологической операции оксидирования зоны контакта алюминиевых сплавов со сталью при изготовлении сборной бурильной трубы для нефтегазодобывающей промышленности для повышения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов в условиях эксплуатации.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечиваются корректностью постановки задач исследования и комплексным подходом к их решению; большим объемом экспериментов и критическим сравнением полученных данных с результатами других авторов; использованием современных методов испытаний, аналитического оборудования; привлечением статистических методов обработки результатов.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в постановке задач исследования, выборе методов испытаний материалов, модернизации испытательного оборудования, проведении экспериментов, обработке и обсуждении полученных результатов и формулировании выводов, разработке практических рекомендаций для обоснованного использования

алюминиевых сплавов в нефтегазодобывающей отрасли и увеличения ресурса изготавливаемого из них оборудования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное обоснование возможности применения деформируемых алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 для изготовления сборных алюминиевых (со стальными замками) бурильных труб для разработки нефтегазовых месторождений, а также научно-обоснованные практические рекомендации по технологии изготовления и условиям эксплуатации труб для увеличения ресурса бурового оборудования.

2. Результаты комплексных экспериментальных исследований особенностей структурных изменений, фазовых превращений, деградации механических свойств и коррозионных повреждений сборных бурильных труб из деформируемых алюминиевых сплавов – исходно естественно состаренного Д16Т и исходно искусственно состаренного 1953Т1 – в зависимости от технологических параметров изготовления и условий эксплуатации труб при разработке нефтегазовых месторождений.

3. Результаты исследований процесса коррозии алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 при длительной эксплуатации в условиях коррозионно-активной среды нефтегазовых месторождений, в том числе в контакте со стальным замком составной бурильной трубы, а также обоснование возможности повышения коррозионной стойкости трубы за счет оксидирования зоны контакта алюминиевых сплавов со сталью.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Девятая Международная научно-техническая конференция "Современные металлические материалы и технологии (СММТ'11)", июнь 22-24, 2011, Санкт-Петербург; Сороковая Международная научно-практическая конференция «Неделя науки», октябрь 10-13, 2011, Санкт-Петербург; Шестнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов май, 2012, Санкт-Петербург.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 13 работах, включая 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК России.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 132 страницах, содержит: 25 таблиц, 58 рисунков. Библиографический список включает 73 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту, и указан личный вклад автора в исследования, проведенные по теме диссертации.

В первой главе рассмотрены особенности эксплуатации буровых труб в условиях нефтедобычи, предъявляющие особые требования к материалам, используемым для их изготовления. Обоснованы достоинства и недостатки сталей, применяемых в качестве конструкционных материалов бурильных труб, и выявлены преимущества применения алюминиевых сплавов. Рассмотрены

различные группы алюминиевых сплавов и выбраны наиболее перспективные для использования в нефтехимической промышленности. На основании анализа литературных данных сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе приведены используемые в работе материалы и режимы их термической обработки. Описаны инструменты и методики исследования структуры и фазового состава сплава. Приведены методы определения механических свойств и коррозионной стойкости.

Материалом исследования являлись деформируемые алюминиевые сплавы Д16Т и 1953Т1 систем Al-Cu-Mg и Al-Cu-Mg-Zn соответственно (табл. 1), являющиеся наиболее перспективными для изготовления бурильных труб.

Таблица 1. Фактический химический состав исследованных сплавов

Материал	Содержание химических элементов, % масс.									
	Mg	Zn	Mn	Cu	Zr	Cr	Ti	Fe	Si	Al
Сплав Д16Т	1,62	0,30	0,53	4,54	-	-	0,08	0,45	0,48	Ост.
Сплав 1953Т1	2,60	5,70	0,17	0,45	0,02	0,19	0,05	0,10	0,05	Ост.

Исследование влияния технологических и эксплуатационных факторов на структуру и свойства алюминиевых сплавов проводили, используя бурильные трубы в состоянии поставки. Образцы вырезали в продольном направлении из заготовок бурильных труб Ø 147 мм и толщиной стенки 13 мм из сплавов Д16Т и 1953Т1 после стандартной термической обработки: Д16Т – закалка от 500 °С в воде + естественное старение в течение 4 суток, 1953Т1 – закалка от 480 °С в воде + искусственное старение при 125 °С длительностью 24 ч.

Образцы для исследований структуры и свойств сборной бурильной трубы из алюминиевого сплава со стальным замком после эксплуатации в условиях разработки нефтяных месторождений вырезали согласно схеме на рис. 1.

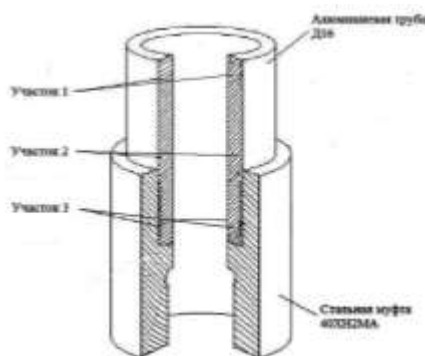


Рис. 1. Схема вырезки образцов для исследований из алюминиевой трубы

На основе анализа литературных данных о технологических параметрах изготовления и условиях эксплуатации современного бурового оборудования в нефтегазодобывающей промышленности определены две принципиально важные для исследования температурно-временные области, оказывающие влияние на материал бурильных труб при изготовлении (технологические факторы) и их применении при разработке нефтегазовых месторождений (эксплуатационные факторы):

1 – технологическое воздействие – температура 200-250 °С, выдержка при повышенной температуре 3-10 мин;

2 – эксплуатационное воздействие – температура 150 °С, выдержка при повышенной температуре 500-1000 ч.

Третья глава посвящена исследованиям структуры и свойств сборных бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 после эксплуатации в условиях разработки нефтяных месторождений.

Результаты исследований показали, что после технологической операции сборки и эксплуатации бурильной трубы размером 147x13 (мм) из алюминиевого сплава Д16Т в течение 1003 часов в условиях выработки нефтяной скважины механические свойства и коррозионная стойкость металла снижаются относительно состояния поставки. При этом максимальное изменение свойств сплава относительно состояния поставки происходит на участках трубы вблизи (рис. 1, участок 2) и, особенно, внутри замкового соединения (рис. 2, участок 3): характеристики прочности – на ~ 3 %, твердость ~ 16 %, пластичность ~ 20 %, электрохимический потенциал ~ 36 %.

Металлографическим и рентгеноструктурным анализами выявлено, что фазовый состав сплава Д16Т в процессе эксплуатации бурильной трубы качественно остается одинаковым. В структуре, как и в состоянии поставки, присутствуют α -твердый раствор на основе алюминия и интерметаллиды Al_2Cu и Al_2CuMg . Однако количество и размеры интерметаллидных включений в структуре сплава после эксплуатации трубы изменяются (рис. 2).

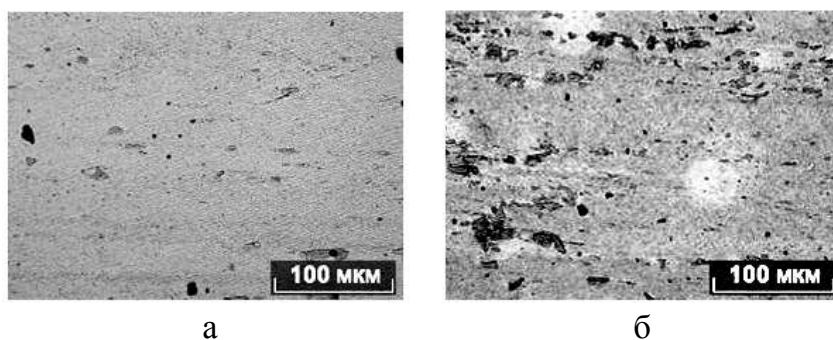


Рис. 2. Микроструктура бурильной трубы (в глубине муфты) из сплава Д16Т: а – в состоянии поставки, б – после эксплуатации в течение 1003 ч. х 200

Количественным металлографическим анализом установлено, что объемная доля интерметаллидных фаз в структуре сплава Д16Т после эксплуатации возрастает, а их средний размер значительно уменьшается. Наибольшие структурные изменения наблюдаются в металле трубы на участке, ввинченном внутрь замкового соединения. В этом случае объемная доля включений увеличивается в ~ 1,3 раза, а плотность распределения возрастает в ~ 1,8 раза. При этом уменьшаются: средний диаметр интерметаллидов – в ~ 1,7 раза, средняя площадь включения – в ~ 2,0 раза и среднее расстояние между ними – в ~ 1,8 раза. Структурные изменения в металле на участках трубы у края и на удалении от муфты имеют аналогичный характер, но менее интенсивны, особенно на удаленном участке.

Исследование коррозионной стойкости материала бурильных труб проводили с использованием трубы с наружным диаметром 90 мм и толщиной стенки 9 мм из алюминиевого сплава 1953Т1 после эксплуатации в течение 1000 ч при 45 °С. После эксплуатации трубы выявлены наружные и внутренние поражения, наиболее существенные вблизи контакта с замком (рис. 3).



Рис. 3. Наружные поверхности буровой трубы из сплава 1953Т1 вблизи замкового соединения после эксплуатации 1000 ч при 45 °С:
а – у ниппеля; б – у муфты

Максимальная глубина поражения 867 мкм, что составляет $\approx 6\%$ при толщине стенки 15 мм, наблюдается на внешней поверхности в месте контакта трубы с ниппелем. Выявлена расслаивающая коррозия, межкристаллитная коррозия отсутствует (рис. 4).

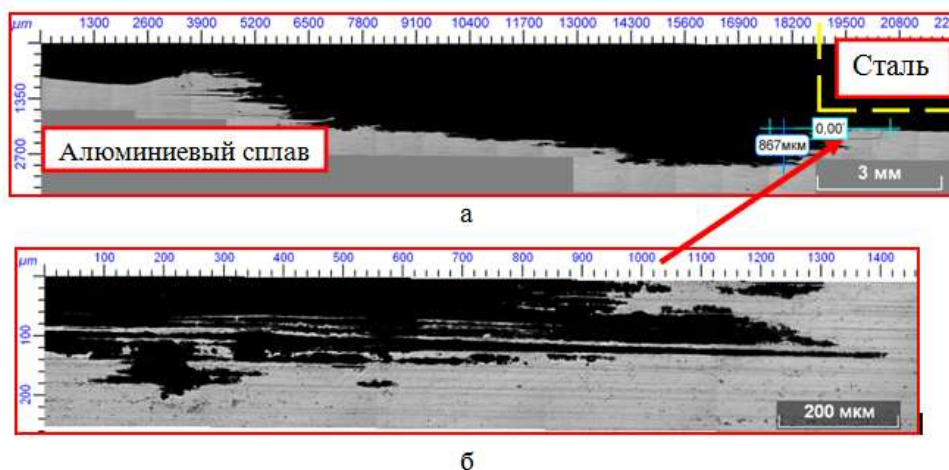


Рис. 4. Фотография зоны поражения на наружной поверхности буровой трубы из сплава 1953Т1 у ниппеля после эксплуатации 1000 ч при 45 °С:
а – общая панорама, б – следы расслаивающей коррозии

Таким образом, в процессе эксплуатации сборной буровой трубы при разработке нефтегазовых месторождений наиболее подверженным воздействию окружающей среды, температуры и внешней нагрузки является участок алюминиевой трубы, ввинченный в стальной замок, а также граничный участок контакта трубы и замка. В связи с этим необходимым является проведение систематических сравнительных исследований для определения влияния условий изготовления (горячей посадки замка) и эксплуатации буровых труб на структуру и свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1, особенно в месте контакта алюминиевой трубы и стального замка.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния технологического нагрева при изготовлении сборных буровых труб на структуру и свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что технологический нагрев в область температур 200-250 °С длительностью до

10 мин при горячей посадке замкового соединения оказывает значительное влияние на механические свойства бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 (рис. 5). Изменение свойств обусловлено протеканием диффузионных процессов, характер которых в исследованных сплавах различен.

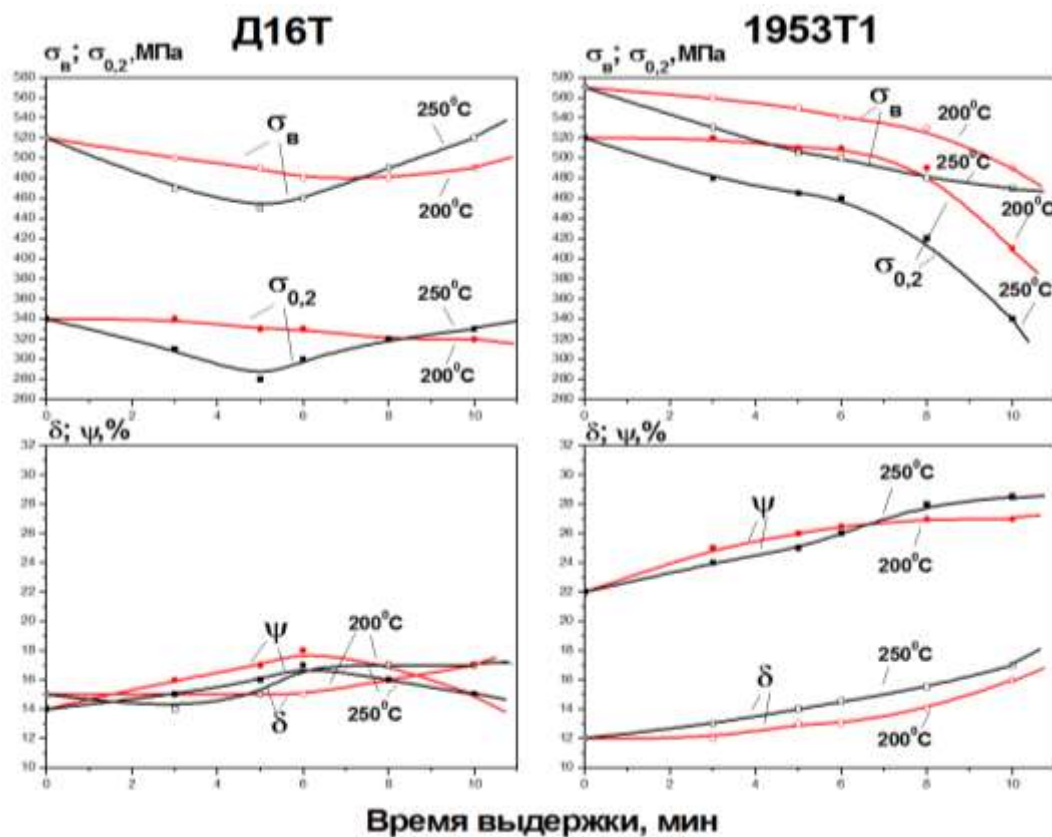


Рис. 5. Влияние температуры и длительности технологического нагрева на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1

Металлографический (рис. 6) и рентгеноструктурный анализы позволили установить, что в структуре бурильной трубы из сплава Д16Т как в состоянии поставки, так и после кратковременного нагрева различной длительности присутствуют α -твердый раствор на основе алюминия и интерметаллиды Al_2CuMg (S-фаза) и Al_2Cu (θ -фаза).

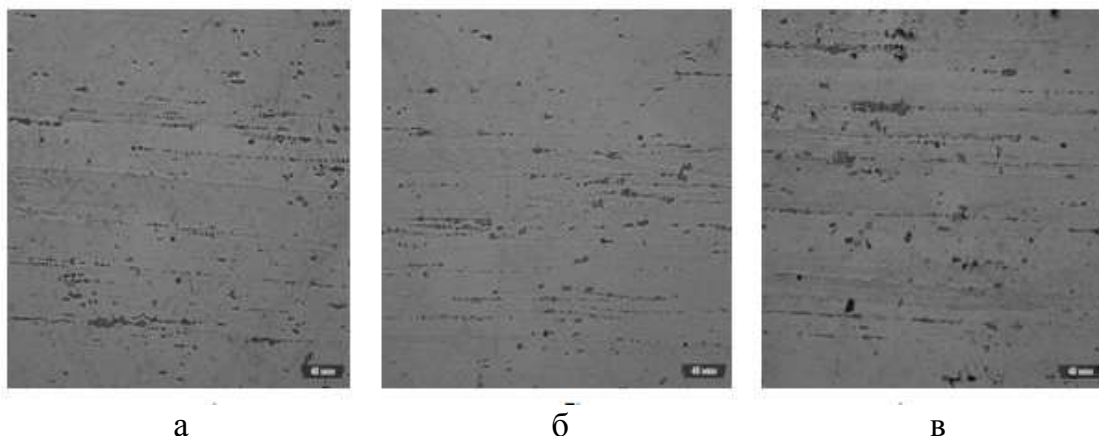


Рис. 6. Микроструктура сплава Д16Т в состоянии поставки (а) и после технологического нагрева при 250 °С длительностью 6 (б) и 10 мин (в). x 200

Результаты количественного металлографического анализа сплава Д16Т в состоянии поставки и после нагрева по различным режимам показали что при увеличении длительности нагрева до 5-6 мин уменьшаются объемная доля вторичных фаз и плотность их распределения в структуре сплава с 3,40 объемн.% и 12409 1/мм² в исходном состоянии до соответственно 2,53 объемн.% и 7820 1/мм² после нагрева до 200 °С и 2,89 объемн.% и 8203 1/мм² – до 250 °С. При этом средние значения длины и площади включений существенно возрастают: с 1,80 мкм и 2,70 мкм² в состоянии поставки до 2,28 мкм и 5,61 мкм² после нагрева до 200 °С и 2,77 мкм и 7,35 мкм² – до 250 °С соответственно. Максимальный диаметр включений при этом практически не изменяется. Увеличение продолжительности нагрева до 10 мин, наоборот, приводит к росту объемной доли и плотности распределения вторичных фаз в структуре сплава и уменьшению средних значений длины и площади соответственно до 4,16 объемн.%; 14238 1/мм²; 1,84 мкм; 2,50 мкм² при 200 °С и до 4,30 объемн.%; 16350 1/мм²; 1,50 мкм; 2,80 мкм² при 250 °С. Максимальный диаметр интерметаллидов при этом незначительно возрастает до 2,6-2,8 мкм.

Установленные закономерности позволяют предположить, что при кратковременном (< 5-6 мин) технологическом нагреве в естественно состаренном сплаве Д16Т происходит процесс растворения предвыделений, а также мелкодисперсных включений θ -фазы, известный как «возврат при старении». Более длительный (6-10 мин) нагрев инициирует протекание в сплаве процесса искусственного старения с выделением мелкодисперсных интерметаллидных θ -фаз.

Таким образом, в результате противоположного действия «возврата при старении» и последующего дисперсионного твердения механические свойства сплава Д16Т после нагрева длительностью до ~ 6 мин изменяются незначительно, а длительностью 6-10 мин практически не изменяются относительно состояния поставки (рис. 5). Важно, что повышение температуры нагрева от 200 до 250 °С несущественно влияет на величину изменения прочности и пластичности сплава. Благодаря этому сплав Д16Т является устойчивым 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.

Технологический нагрев сплава 1953Т1, как и Д16Т, также качественно не изменяет его фазовый состав, но оказывает существенное влияние на количество и размер вторичных включений (рис. 7). Как в состоянии поставки, так и после нагрева различной длительности в структуре сплава присутствуют α -твердый раствор на основе алюминия и интерметаллиды MgZn₂ и Al₂CuMg.

Количественный металлографический анализ показал, что в исходном состоянии объемная доля интерметаллидных фаз и плотность их распределения в структуре сплава 1953Т1 составляют соответственно 0,50 объемн.% и 1491 1/мм², средняя длина и площадь – 1,90 мкм и 3,10 мкм², а максимальный диаметр – 2,10 мкм. Выдержка до ~ 6 мин при температуре 200 °С не оказывает заметного влияния на структуру сплава 1953Т1, а при 250 °С приводит к некоторому увеличению объемной доли и средних значений длины и площади вторичных включений – до 1,69 объемн.%; 2,24 мкм и 3,39 мкм² соответственно. При этом плотность распределения интерметаллидов в структуре и их максимальный диаметр изменяются незначительно. Увеличение длительности

нагрева до 10 мин в 2-3 раза увеличивает количество и размер вторичных фаз и уменьшает плотность их распределения в структуре сплава, причем тем значительнее, чем выше температура. После нагрева до 250 °С, 10 мин объемная доля интерметаллидов в структуре, плотность их распределения и средние значения длины и площади составляют 2,15 объемн.%; 800 1/мм²; 3,05 мкм и 4,79 мкм² соответственно, а максимальный диаметр – 3,46 мкм.

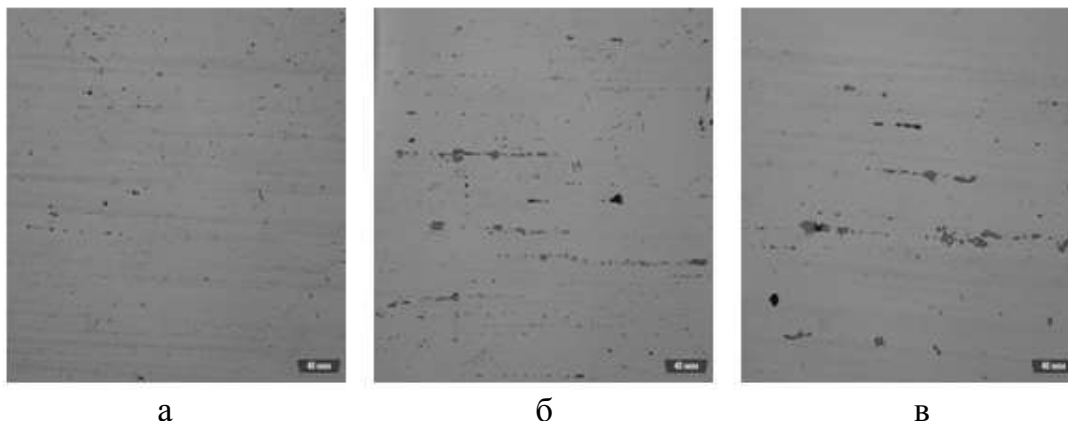


Рис. 7. Микроструктура сплава 1953Т1 в состоянии поставки (а) и после технологического нагрева при 250 °С длительностью 6 (б) и 10 мин (в). х 200

Из анализа экспериментальных данных следует, что в сплаве 1953Т1 процесс старения при температурах нагрева 200-250 °С имеет одинаковый характер во всем исследованном интервале выдержек. 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 и практически не оказывают влияния на 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.

Таким образом, будучи более прочным по сравнению со сплавом Д16Т в состоянии поставки, сплав 1953Т1 значительно уступает ему по этому показателю после технологического нагрева. Так, в исходном состоянии $\sigma_{\text{в}}$ сплава 1953Т1 на 50 МПа выше, чем Д16Т. После нагрева длительностью 10 мин при 200 °С значения предела прочности обоих сплавов одинаковые, а при 250 °С – $\sigma_{\text{в}}$ сплава 1953Т1 на 50 МПа ниже, чем Д16Т. Экспериментальные данные также показывают, что сплав Д16Т не только более устойчив к разупрочнению при технологическом нагреве, но и имеет значительный запас пластичности по сравнению со сплавом 1953Т1, причем его величина отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ после технологического нагрева по всем исследованным режимам практически не меняется по сравнению с состоянием поставки.

Низкая стойкость сплава 1953Т1 к разупрочнению при технологическом нагреве требует жесткого регламентирования и контроля параметров горячей посадки замка. Не рекомендуется превышать температуру нагрева бурильной трубы из сплава 1953Т1 выше 200 °С и длительность нагрева – более 6 мин.

В пятой главе выполнены исследования структурной стабильности и изучено изменение механических свойств алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1

после технологического с последующим эксплуатационным нагревом, имитирующих условия изготовления и эксплуатации буровых труб при разработке нефтегазовых месторождений.

Металлографический и рентгенофазовый анализы позволили установить, что в структуре сплава Д16Т как в состоянии поставки, так и после технологического с последующим эксплуатационным нагревом различной длительности качественно фазовый состав сохраняется, однако происходят его существенные количественные и морфологические изменения. В табл. 2 приведены результаты количественного металлографического анализа структуры сплава Д16Т в состоянии поставки и после технологического и эксплуатационного нагревов. Видно, что после 500 ч выдержки при 150 °С в структуре сплава увеличиваются объемная доля и плотность распределения интерметаллидных фаз, средние значения длины и площади включений значительно уменьшаются, а их максимальный диаметр практически не изменяется. Увеличение продолжительности нагрева от 500 до 1000 ч оказывает противоположное влияние на количественные характеристики микроструктуры сплава, причем несколько увеличивает максимальный диаметр включений. Следует отметить, что повышение температуры предварительного технологического нагрева от 200 до 250 °С незначительно усиливает влияние эксплуатационного нагрева на установленные изменения в структуре сплава.

Таблица 2. Количество и размеры интерметаллидных фаз (ИФ) в структуре сплава Д16Т в состоянии поставки и после технологического и эксплуатационного нагревов по различным режимам

Структурная характеристика ИФ	Состояние материала												
	Исходное (поставка)	после технологического и эксплуатационного нагревов по режимам:											
		200 °С						250 °С					
		6 мин			10 мин			6 мин			10 мин		
		150 °С						150 °С					
	0 ч	500 ч	1000 ч	0 ч	500 ч	1000 ч	0 ч	500 ч	1000 ч	0 ч	500 ч	1000 ч	
Объемная доля, %	3,40	2,53	4,15	5,45	4,16	5,47	6,28	2,89	4,76	5,75	4,30	5,98	6,40
Плотность распределения, 1/мм ²	12409	7820	16366	15252	14238	28125	13709	8203	16239	12110	16350	24351	12648
Средняя длина, мкм	1,80	2,28	1,32	1,56	1,84	1,12	2,32	2,77	1,30	1,51	1,50	1,21	2,77
Средняя площадь, мкм ²	2,70	5,61	1,54	1,60	2,50	1,24	4,73	7,35	1,47	1,90	2,80	1,35	5,60
Максимальный диаметр, мкм	2,00	2,19	2,02	2,11	2,60	2,64	2,76	2,35	2,29	2,37	2,77	2,85	3,09

На рис. 8 показано изменение механических свойств сплава Д16Т после технологического нагрева по выбранным режимам (табл. 2) и последующего эксплуатационного нагрева: температура 150 °С, выдержка 500 и 1000 ч. Видно, 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 при последующей длительной эксплуатационной выдержке при 150 °С.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что увеличение количества дисперсных включений в структуре сплава Д16Т в результате

протекания начальных стадий искусственного старения в процессе выдержки при 150 °С (табл. 2) способствует упрочнению матричного твердого раствора. В результате, выдержка длительностью до 500 ч мало влияет на величину σ_B и практически не изменяет $\sigma_{0,2}$ сплава (рис. 8). 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.

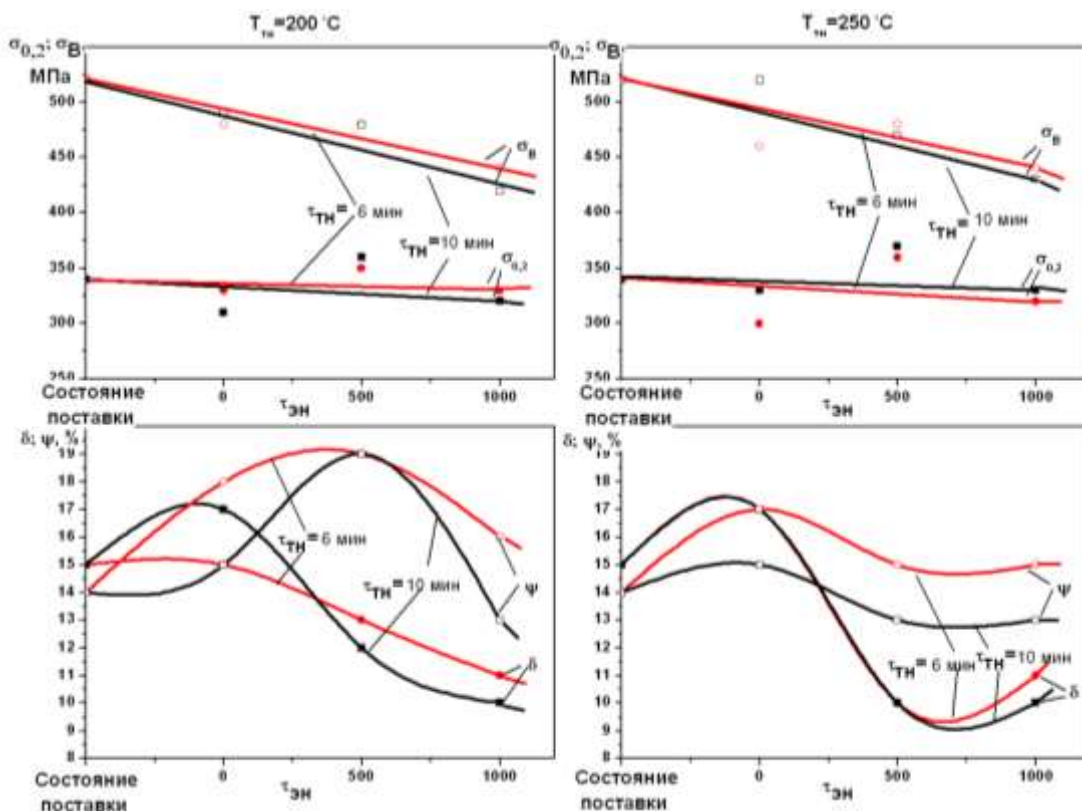


Рис. 8. Влияние длительности эксплуатационной выдержки ($\tau_{ЭН}$) при 150 °С на механические свойства сплава Д16Т после предварительного технологического нагрева (точка «0») до 200 или 250 °С с выдержкой 6 или 10 мин ($\tau_{ТН}$)

Эксплуатационный нагрев сплава 1953Т1, как и сплава Д16Т, также качественно не изменяет его фазовый состав, но оказывает существенное влияние на количество и размер вторичных включений. Количественный металлографический анализ показал (табл. 3.), что в процессе выдержки при температуре эксплуатации 150 °С объемная доля интерметаллидных фаз в структуре сплава 1953Т1 возрастает незначительно, но резко увеличиваются их размеры и уменьшается плотность распределения. Структурные изменения в сплаве имеют монотонный характер, интенсивно развиваясь с начала выдержки и несколько затухая после 500 ч. Следует отметить, что установленные количественные изменения структурных параметров в процессе эксплуатационной выдержки при 150 °С получают значительно большее развитие в сплаве 1953Т1 при повышении температуры и увеличении длительности предшествующего технологического нагрева.

Выдержка сплава 1953Т1 длительностью 500 ч при 150 °С приводит к резкому и значительному снижению прочностных характеристик: σ_B – на 70-

110 МПа и $\sigma_{0,2}$ – на 20-170 МПа относительно состояния материала после технологического нагрева (в зависимости от его режима) и соответственно на 140-160 МПа и 180-200 МПа относительно состояния поставки (рис. 9). 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 δ возрастает на 1-3 %, а ψ – на 20-23 % относительно состояния материала после технологического нагрева и соответственно на 4-7 % и на 24-29 % относительно состояния поставки. Характерно, что увеличение значений относительного сужения на порядок превышает возрастание значений относительного удлинения. Это свидетельствует об уменьшении коэффициента деформационного упрочнения сплава.

Таблица 3. Количество и размеры интерметаллидных фаз (ИФ) в структуре сплава 1953Т1 в состоянии поставки и после технологического и эксплуатационного нагревов по различным режимам

Структурная характеристика ИФ	Состояние материала												
	исходное (поставка)	после технологического и эксплуатационного нагревов по режимам:											
		200 °С						250 °С					
		6 мин			10 мин			6 мин			10 мин		
		150 °С						150 °С					
	0 ч	500 ч	1000 ч	0 ч	500 ч	1000 ч	0 ч	500 ч	1000 ч	0 ч	500 ч	1000 ч	
Объемная доля, %	0,50	0,60	1,30	1,46	1,60	1,83	1,85	1,69	2,51	2,68	2,15	2,63	2,78
Плотность распределения, 1/мм ²	1491	1408	742	679	928	684	655	1485	692	634	800	573	536
Средняя длина, мкм	1,90	2,03	3,88	3,90	2,70	4,47	4,71	2,24	4,45	4,73	3,05	4,83	4,92
Средняя площадь, мкм ²	3,10	3,26	5,46	5,89	4,40	6,34	6,80	3,39	5,75	6,33	4,79	6,62	7,10
Максимальный диаметр, мкм	2,10	2,17	4,14	4,31	2,49	4,69	4,83	2,53	4,56	4,87	3,46	4,67	4,73

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. При этом старение происходит на стадии распада пересыщенного α -твердого раствора с выделением некогерентных вторичных фаз, что оказывает определяющее влияние на свойства сплава, особенно в начальный период выдержки. Увеличение длительности выдержки более 500 ч приводит к перестариванию сплава и процесс постепенно затухает. Коагуляция интерметаллидов и разупрочнение матричного твердого раствора вызывают снижение прочностных и повышение пластических характеристик сплава. Как следствие, эксплуатационный нагрев длительностью до 500 ч приводит к резкому разупрочнению, а увеличение длительности – к менее значительному снижению прочности и повышению пластичности сплава 1953Т1.

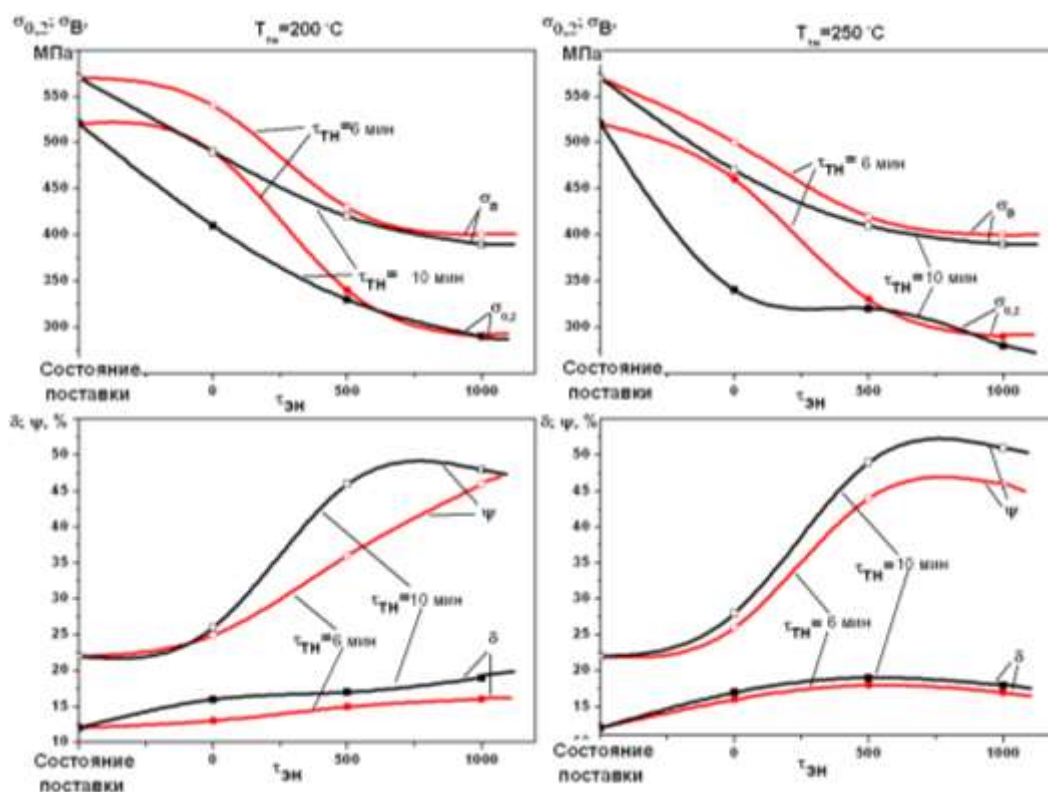


Рис. 9. Влияние длительности эксплуатационной выдержки ($\tau_{ЭН}$) при 150 °C на механические свойства сплава 1953Т1 после предварительного технологического нагрева (точка «0») до 200 или 250 °C с выдержкой 6 или 10 мин ($\tau_{ТН}$)

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 бурильной трубы и, тем более, после длительного нагрева при эксплуатации. Так, в исходном состоянии $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{0,2}$ сплава 1953Т1 соответственно на 50 и 180 МПа выше, чем сплава Д16Т. Однако после технологического нагрева и последующей выдержки при температуре эксплуатации 150 °C длительностью 500 ч значения временного сопротивления разрыву и условного предела текучести сплава 1953Т1 ниже, чем сплава Д16Т, на 30-40 и 30-60 МПа соответственно. При этом сплав 1953Т1 значительно уступает сплаву Д16Т по такой важной эксплуатационной характеристике, как резерв пластичности $1 - \sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$ (рис. 10).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что сплав Д16Т более стабилен по сравнению со сплавом 1953Т1 при использовании этих материалов для изготовления бурильных 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 считать его, во-первых, более технологичным и, во-вторых, рекомендовать для изготовления бурильных труб, предназначенных для более сложных условий эксплуатации.

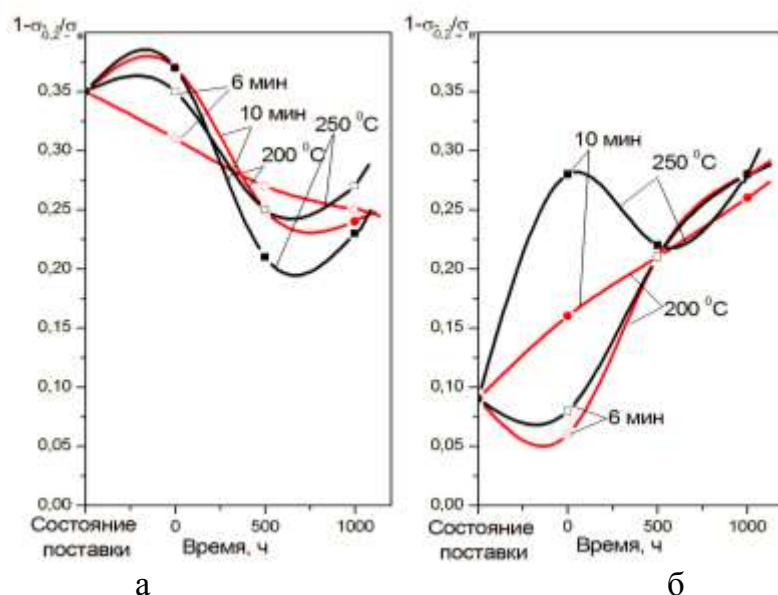


Рис. 10. Влияние длительности эксплуатационной выдержки при 150 °С на резерв пластичности ($1 - \sigma_{0,2} / \sigma_{\text{в}}$) сплавов Д16Т (а) и 1953Т1 (б) после предварительного технологического нагрева (точка «0») до 200 или 250 °С с выдержкой 6 или 10 мин

Шестая глава посвящена исследованию влияния коррозионно-активной среды нефтегазовых месторождений на эксплуатационную стойкость алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.

Одним из этапов исследования являлась оценка влияния коррозионно-активной среды нефтегазовых месторождений на характер общей коррозии и механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1. На рис. 11 показан характерный внешний вид образцов сплавов после технологического нагрева и последующей эксплуатационной выдержки в коррозионной среде – раствор NaCl + NaOH (рН = 11). Видно, что поверхность образцов прореагировала с коррозионной средой, однако значительного воздействия на сплав не обнаруживается. Следует отметить, что по результатам испытаний выявляется большее воздействие среды на сплав 1953Т1 по сравнению со сплавом Д16Т.



Рис. 11. 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 (рН = 11)

Механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 после предварительного кратковременного нагрева и последующего длительного нагрева по разным режимам в коррозионной среде представлены на рис. 12. Для сравнения на этих же графиках показаны прочностные и пластические характеристики сплавов в состоянии поставки (исходные значения).

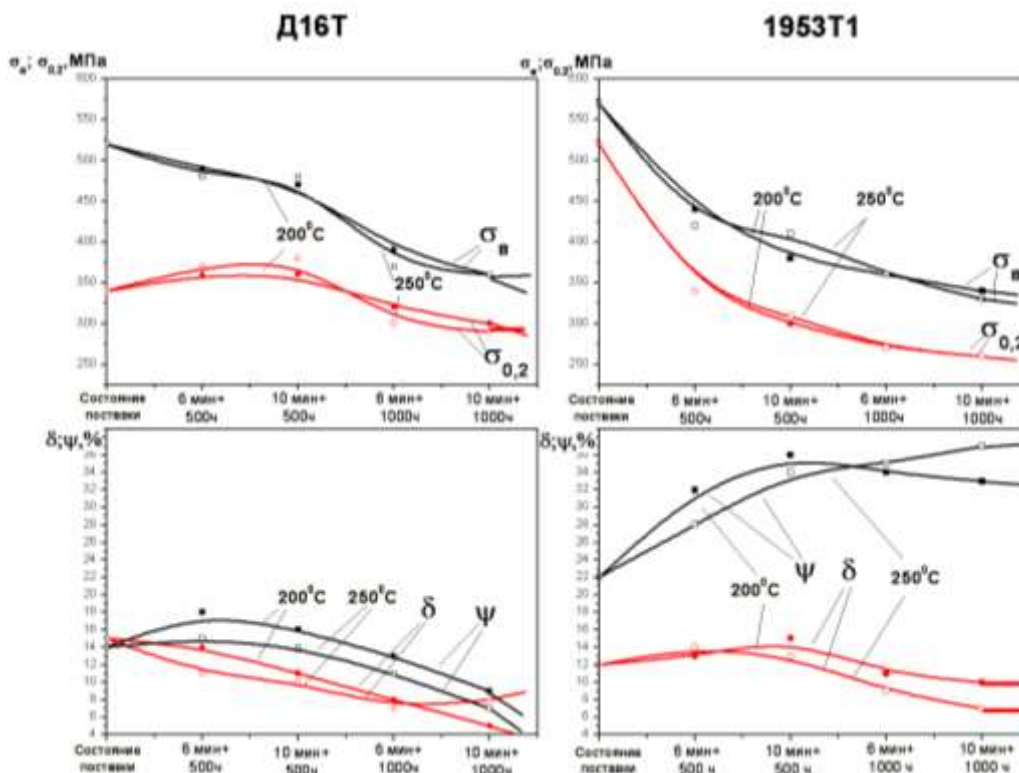


Рис. 12. Влияние выдержки длительностью 500 или 1000 ч при 150°С в растворе NaCl + NaOH (рН = 11) на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 после предварительного нагрева (200 или 250°С, 6 или 10 мин)

Кратковременный технологический нагрев 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 сплава 1953Т1, который в исходном состоянии имел преимущество по механическим свойствам.

Для выявления роли именно коррозионной среды были экспериментально определены механические свойства сплавов, подвергнутых технологическому нагреву с последующим эксплуатационным в коррозионной среде и на воздухе. Сопоставление полученных результатов показало, 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 является существенно более устойчивым по сравнению с 1953Т1. Установлено также, что увеличение длительности температурного воздействия при технологическом и эксплуатационном нагревах усиливает отрицательное влияние коррозионной среды на механические свойства исследованных сплавов, причем сплав 1953Т1 является существенно более чувствительным к этим факторам.

Испытания на коррозионное растрескивание при нагрузке от 60 до 90 % от фактического предела текучести сплавов Д16Т и 1953Т1 после стандартной термической обработки и после предварительного технологического нагрева не привели к разрушению образцов. Нагруженные образцы обоих сплавов выдержали испытания длительностью 720 часов в среде модельной пластовой воды (табл. 4).

Таблица 4. Химический состав модельной пластовой воды

№ п/п	Компонент	Содержание, г/л
1	NaCl	37,88
2	KCl	48,24
3	CaCl ₂	2,96
4	MgSO ₄	1,63
5	K ₂ SO ₄	11,10

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

Металлографический анализ выявил, что в процессе коррозионных испытаний в зоне контакта материалов наблюдается интенсивная коррозия сплава 1953Т1, приводящая к появлению зазора (щели) между сталью 40ХН2МА и алюминиевым сплавом (рис. 13). Снижение содержания кислорода в растворе, находящемся в щели, способствует ускорению коррозии сплава 1953Т1 и переводу сплава в активное состояние. Это приводит к образованию на поверхности сплава язв, каверн и развитию расслаивающей коррозии.

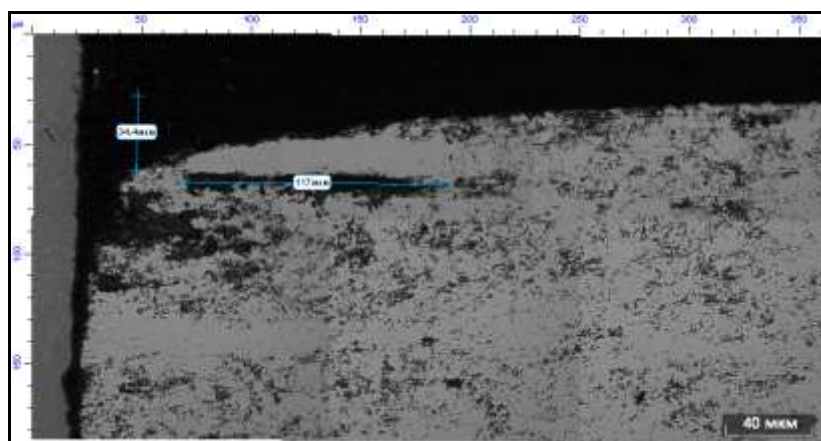


Рис. 13. Микроструктура образца сплава 1953Т1 в месте контакта со сталью 40ХН2МА после испытаний для определения скорости коррозии в 5%-ном растворе NaCl при температуре 80 °С

Для борьбы с контактной коррозией существуют различные методы, одним из наиболее распространенных из которых является нанесение защитных покрытий на поверхности контактирующих деталей. Экспериментальное исследование показало, что анодное оксидирование сплава 1953Т1 приводит к снижению скорости его коррозии в контакте со сталью 40ХН2МА в 5%-ном растворе NaCl при 80 °С с 0,1270 до величины 0,0607 мм/год, которая соответствует скорости коррозии сплава 1953Т1 в отсутствии контакта. Оксидный слой, формирующийся на поверхности сплава 1953Т1, является сплошным, характеризуется высокими защитными и изолирующими свойствами и тормозит развитие локальной коррозии сплава в зоне контакта со сталью.

Выполненные исследования позволяют заключить, что, несмотря на установленное отрицательное влияние коррозионной среды нефтяных скважин, деформируемые алюминиевые сплавы 1953Т1 и, особенно, Д16Т после технологического нагрева при изготовлении из них сборных бурильных труб со стальным замком являются достаточно устойчивыми при эксплуатации в условиях разработки углеводородных месторождений.

Общие выводы

1. В результате проведенных комплексных экспериментальных исследований влияния условий изготовления и эксплуатации бурильных труб на структуру, фазовые превращения, механические свойства и коррозионную стойкость деформируемых алюминиевых сплавов – естественно состаренного Д16Т и искусственно состаренного 1953Т1 – разработаны и научно обоснованы практические рекомендации для повышения их ресурса эксплуатации при разработке нефтегазодобывающих месторождений.

2. Выявлены особенности структурных изменений, деградации механических свойств и коррозионных повреждений сборных бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 со стальными замками в условиях эксплуатации на нефтяных месторождениях. Показано, что наибольшее снижение механических свойств и наиболее значительные коррозионные повреждения при эксплуатации наблюдаются на участке трубы, ввинченной в соединительную муфту.

3. Установлено, что естественно состаренный сплав Д16Т и искусственно состаренный – 1953Т1 претерпевают различные структурные и фазовые превращения при технологическом нагреве в интервал температур 200-250 °С в процессе изготовления сборных бурильных труб (горячая посадка стального замка). В результате противоположного действия возврата при старении и последующего дисперсионного твердения механические свойства исходно естественно состаренного сплава Д16Т после изготовления трубы практически не изменяются относительно состояния поставки. В противоположность этому, распад твердого раствора и коагуляция интерметаллидных фаз в структуре исходно искусственно состаренного сплава 1953Т1 приводят к его значительному разупрочнению после горячей посадки замкового соединения.

4. Экспериментально изучено изменение структуры и механических свойств сплавов Д16Т и 1953Т1 в течение выдержки при 150 °С длительностью до 1000 ч после кратковременного нагрева до 200-250°С длительностью до 10 мин, имитирующих горячую посадку замкового соединения и последующую эксплуатацию сборных бурильных труб в условиях разработки нефтегазовых месторождений. Установлена различная стабильность свойств сплавов при эксплуатации, обусловленная разным характером структурных изменений, связанных с протеканием в них диффузионных процессов. Показано, что в исходно естественно состаренном сплаве Д16Т медленно развивающийся процесс дисперсионного твердения при длительной эксплуатации бурильных труб не сопровождается существенным изменением прочности и пластичности. В сплаве 1953Т1 быстрое протекание процессов распада матричного α -твердого раствора и укрупнения выделяющихся в структуре интерметаллидных частиц приводят к резкому разупрочнению.

5. Экспериментально исследовано влияние коррозионно-активной среды нефтегазовых месторождений (раствор NaCl + NaOH с pH = 11) при длительном эксплуатационном нагреве (150°C, до 1000 ч) бурильных труб после их изготовления (200-250 °С, до 10 мин) на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1. Установлены характер коррозионных повреждений и величина деградации механических свойств сплавов в условиях эксплуатации бурильных труб. Показано, что, несмотря на отрицательное влияние коррозионной среды нефтяных скважин, алюминиевые сплавы Д16Т и 1953Т1 являются устойчивыми при эксплуатации в условиях добычи углеводородов, причем сплав Д16Т имеет значительное преимущество по коррозионной стойкости по сравнению с 1953Т1.

6. Выявлено, что алюминиевые сплавы Д16Т и 1953Т1 после изготовления из них бурильных труб не проявляют склонности к коррозионному растрескиванию в максимально жестких условиях разработки нефтегазодобывающих месторождений.

7. Установлено, что сплавы Д16Т и 1953Т1 подвержены контактной коррозии при эксплуатации сборных бурильных труб в условиях разработки нефтегазовых месторождений, которая проявляется в месте контакта алюминиевой трубы со стальным замком. Так, при контакте цилиндрических деталей из алюминиевого сплава 1953Т1 (труба) с рабочей поверхностью, значительно превышающей зону действия стальной (40ХН2МА) детали (замок), растворение алюминиевого сплава приобретает локальный характер, существенно развивающийся преимущественно вблизи контакта.

8. Показано, что оксидирование зоны контакта алюминиевых сплавов со сталью при изготовлении сборной бурильной трубы для нефтегазодобывающей промышленности приводит к снижению скорости контактной коррозии алюминиевого сплава в условиях эксплуатации. Так, анодное оксидирование сплава 1953Т1 приводит к снижению скорости его коррозии в контакте со сталью 40ХН2МА в 5%-ном растворе NaCl при 80 °С с 0,1270 до 0,0607 мм/год, что соответствует скорости коррозии сплава 1953Т1 в отсутствии контакта. Оксидный слой, формирующийся на поверхности сплава, является сплошным, характеризуется высокими защитными и изолирующими свойствами и тормозит развитие локальной коррозии алюминиевого сплава в зоне контакта со сталью.

9. На основании экспериментальных исследований и выявленных закономерностей обоснована возможность применения алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 для изготовления сборных бурильных труб (со стальным замковым соединением) при разработке нефтегазовых месторождений. Показаны существенные технологические и эксплуатационные преимущества сплава Д16Т по сравнению с 1953Т1 при использовании этих материалов для изготовления бурильных труб, особенно для сложных условий эксплуатации. Предложены практические рекомендации для увеличения ресурса сборных бурильных труб, изготовленных из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1, регламентирующие технологию их изготовления и условия эксплуатации.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Kondrat'ev S.Yu., Zotov O.G., Shvetsov O.V. Structural Stability and Variation of Properties of Aluminum Alloys D16 and 1953 in Production and

Operation of Drill Pipes // Metal Science and Heat Treatment. – January 2014. – V. 55. – № 9-10. – P. 526-532. (DOI 10.1007/s11041-014-9665-5).

2. 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 СПбГПУ. – 2014. – № 2 (195). – С. 93-99.

3. Швецов О.В., Альхименко А.А., Кондратьев С.Ю. Коррозионные повреждения бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16 и 1953 при эксплуатации в условиях нефтедобычи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 3 (202). – С. 180-191.

4. 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.

5. Kondrat'ev S.Yu., Shvetsov O.V. Effect of High-Temperature Heating on the Structure and Properties of Aluminum Alloys in the Production of Drill Pipes // Metal Science and Heat Treatment. – July 2013. – V. 55. – № 3-4. – P. 191-196. (DOI 10.1007/s11041-013-9604-x).

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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. – № 4. – С. 39-43.

10. Кондратьев С.Ю., Швецов О.В. Эволюция структуры и свойств алюминиевых сплавов Д16 и 1953 при высокотемпературных (200-250°C) нагревах // Труды 9-ой международной научно-технической конференции "Современные металлические материалы и технологии (СММТ '2011)", 22-24 июня 2011 г., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – СПб.: Изд-во Политех. Ун-та. – 2011. – С. 350-351.

11. Швецов О.В., Кондратьев С.Ю. Влияние технологии горячей посадки замкового соединения на структуру и свойства металла бурильных труб из алюминиевых сплавов // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. VI. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 84-85.

12. Швецов О.В. Исследование технологической и эксплуатационной стойкости алюминиевых сплавов, применяемых в буровой технике // Шестнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. – СПб.: 2011. – С. 109.