УДК 620.169.1

Сравнение механических и коррозионных характеристик алюминиевого сплава Д16 после различных видов старения*

К.В. Кусков, А.А. Хызов, М.С. Белов, В.В. Воронин

Тюменский индустриальный университет

Comparison of mechanical and corrosion characteristics of alumin alloy D16 after different types of age hardening

K.V. Kuskov, A.A. Hyzov, M.S. Belov, V.V. Voronin

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Industrial University of Tyumen

Рассмотрены механические и коррозионные свойства алюминиевого сплава Д16 после естественного и искусственного старения на максимальную прочность. Значения условного предела текучести при таких термических обработках различаются незначительно. По результатам измерения твердости методом Роквелла установлено, что процесс естественного старения наиболее интенсивно протекает первые 30 мин, после чего затухает, но длится вплоть до 8220 мин. Ускоренные испытания на усталость по методу Локати проведены на нестандартных образцах с более низким теоретическим коэффициентом концентрации напряжений. Усталостные испытания на растяжение–сжатие, выполненные в воздушной среде при комнатной температуре и асимметрии цикла $R = -1$, позволили определить, что пределы выносливости различаются больше, чем другие механические характеристики. Коррозионные испытания в пересыщенной хлорид-ионами среде выявили существенные различия в глубине и количестве питтингов для образцов, подвергнутых естественному и искусственному старению.

EDN: GMXHZJ, https://elibrary/gmxhzj

Ключевые слова: сплав Д16, метод Локати, усталостные испытания, коррозионные испытания, естественное старение, искусственное старение

This paper examines the mechanical and corrosion properties of D16 aluminum alloy after natural and artificial age hardening to maximum strength. The yield strength for these heat treatments differs only slightly. Rockwell hardness measurements revealed that natural age hardening is most intense during the first 30 minutes, after which it subsides, but continues for up to 8220 minutes. Accelerated fatigue testing using the Lokati method was conducted on non-standard specimens with a lower theoretical stress concentration factor. The loading type was tension-compression. Tests were conducted in air at room temperature with a cycle asymmetry of $R = -1$. Fatigue testing allowed us to determine fatigue limits, which differ to a greater extent than other mechanical properties. Corrosion testing in an environment supersaturated with chloride ions revealed significant differences in the depth and number of pits for specimens subjected to different age hardening processes.

EDN: GMXHZJ, https://elibrary/gmxhzj

Keywords: alloy D16, Lokati method, fatigue testing, corrosion testing, hardness, natural age hardening, artificial age hardening

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FEWN-2024-0005).

Преимуществом применения алюминиевых сплавов при нефтегазодобыче вместо сталей является высокая удельная прочность, что позволяет осваивать более глубокие залежи без существенного роста мощности и грузоподъемности оборудования [1].

Во время эксплуатации оборудование подвержено воздействию коррозионно-активных сред, имеющих сложный ионный состав с преобладанием хлорид-ионов [2–4]. Исследования коррозионной стойкости в определенных условиях [5] выявили опасность возникновения контактной коррозии алюминиевых сплавов со сталями, а также склонность к питтинговой коррозии, обусловленной наличием ионов хлора [6, 7]. Причем у сплавов Д16 и 1953 отсутствовала склонность к коррозионному растрескиванию [8]. Все эти факторы снижают ресурс изделий и оборудования.

Для улучшения механических свойств и коррозионной стойкости алюминиевых сплавов можно использовать различные виды обработки. В стандартном исполнении алюминиевые сплавы поставляются в нагартованном состоянии, после отжига, после закалки и старения, после закалки и искусственного старения на максимальную прочность, после закалки и перестаривания.

Эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов можно улучшить, применяя такие методы, как нанесение покрытий [9], анодирование [6] и специальная обработка холодом [10]. Эти методы позволяют снизить риски возникновения питтинговой коррозии, повысить износо- и трещиностойкость, увеличить сопротивляемость сплошной коррозии и прочностные характеристики.

Термическая обработка (термообработка) — один из самых технологически простых и экономичных методов повышения характеристик алюминиевого сплава. В работе [11] показано влияние естественного старения на механические характеристики и коррозионную стойкость сплава 2024 — аналога Д16. В результате использования различных схем термообработки выделяются упрочняющие фазы разного состава и изменяются свойства материала [12–14].

С учетом изложенного выбор правильной термообработки относится к наиболее эффективным и простым способам получения необходимых характеристик алюминиевых сплавов.

Изделия из алюминиевых сплавов могут испытывать и динамические нагрузки, что еще больше осложняет контроль за их состоянием. Чтобы оценить надежность конструкции, выполняют испытания для определения предела выносливости, используя различные типы нагружения: изгиб с вращением и растяжение–сжатие [15–17]. Различия в схемах нагружения могут влиять на рост усталостной трещины в таких сплавах [18–20].

Зарубежные стандарты предусматривают проведение усталостных испытаний только по типу растяжение–сжатие [21]. При таком типе испытаний задействован больший объем материала по отношению к изгибу с вращением, вследствие чего растет количество потенциальных мест зарождения усталостной трещины в исследуемой зоне. Данные работы [22] подтверждают это, позволяя заключить, что при проектировании изделий лучше всего использовать результаты, полученные при испытаниях на растяжение–сжатие.

Цель работы — комплексное исследование механических, усталостных и коррозионных свойств алюминиевого сплава Д16 после различных термообработок.

В качестве исследуемого материала выступали заготовки, вырезанные из прутка диаметром 12 мм и длиной 2000 мм без защитного плакирующего слоя.

Термообработку образцов проводили в следующей последовательности:

• отжиг при температуре 350 °С в течение 60 мин с охлаждением на воздухе;

• закалка при температуре 490 °С с охлаждением в воде при температуре 30 °С;

• искусственное старение при температуре 150 °С в течение 420 мин;

• естественное старение при комнатной температуре в течение 8640 мин (6 сут).

Температура 150 °С выбрана для достижения максимальной прочности при оптимальной выдержке [23].

Испытания на растяжение выполняли на стандартных образцах типа III (по ГОСТ 1497–2023) с диаметром рабочей части 8 мм. Усредненные значения механических свойств двух образцов сплава Д16, полученные после различных видов термообработки, приведены в табл. 1.

Усталостные испытания на растяжение–сжатие выполняли на сервогидравлической машине ТРМЦ 250С-1 при комнатной температуре в воздушной среде. Закон нагружения — синусоидальный. Ускоренные испытания по

Таблица 1

Механические свойства сплава Д16 при различных видах термообработки

Вид термообработки	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Относительное сужение ψ, %	Относительное удлинение δ, %
Естественное старение	395,9	593,8	17,3	35,5
Искусственное старение	389,9	580,3	17,3	35,5

методу Локати проводили, используя нестандартные образцы, форма и размеры которых приведены на рис. 1. Это связано с тем, что уменьшение теоретического коэффициента концентрации напряжений приводит к снижению уровня дисперсии значений, получаемых в результате испытаний на усталость [24].

У испытуемого образца теоретический коэффициент концентрации напряжений составлял 1,061, у стандартного образца типа II (по ГОСТ 25.502–79) — 1,110. Для расчета этого коэффициента использовали программное обеспечение ANSYS. Расчетное критическое напряжение при сжатии без потери устойчивости оказалось равным 256 МПа, что значительно ниже условного предела текучести. Измеренный параметр шероховатости цилиндрической рабочей части образцов Rz = 20 мкм.

Фрактографический анализ выполняли на электронном сканирующем микроскопе JEOL JSM-6510A с приставкой для энергодисперсионного анализа (JED-2300). Дифрактограммы регистрировали на дифрактометре общего назначения ДРОН-7, используя вакуумную трубку с медным анодом. Углы регистрации 2θ = = 30…90°. Шаг сканирования составлял 0,005°. Обработку дифрактограмм проводили с помощью базы PDF2-2011. Твердость измеряли на твердомере N3A методом Роквелла по шкале B.

Для коррозионных испытаний выбрали четыре одинаковых образца, так как в соответствии с ГОСТ Р 9.905–2007 их количество должно быть не менее трех. В качестве коррозионной среды выступал насыщенный раствор хлорида натрия комнатной температуры. Образцы полностью погружали в неподвижную среду. Перед проведением испытаний размеры образцов измеряли с помощью штангенциркуля и взвешивали с точностью 0,001 г. Время выдержки составляло 168 ч, после чего образцы извлекали, очищали мягкой щеткой, промывали в дистиллированной воде, высушивали и взвешивали. Глубину питтинга определяли методом двойной фокусировки на микроскопе Olympus GX51.

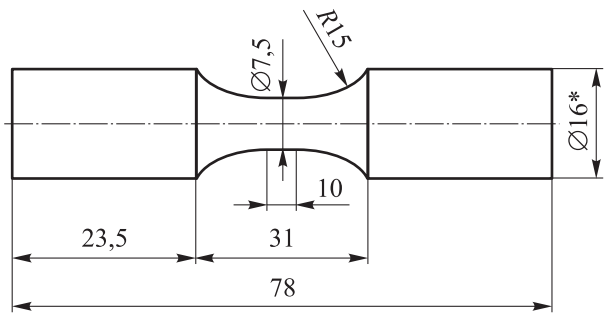


Рис. 1. Схема образца для испытаний

Обработку результатов усталостных испытаний выполняли по методу Локати, который предусматривает наличие данных об угле наклона левой ветви кривой усталости. Характеристики кривой усталости взяли из работы [25]. Для учета различий значений параметра шероховатости ввели коэффициент 0,87 (по ГОСТ 25.504–82) при восстановлении кривых усталости. Согласно РД 50-686–89, если известна левая ветвь кривой усталости, то для определения предела выносливости достаточно провести испытания одного образца, если

Таблица 2

Результаты испытаний на усталость естественно и искусственно состаренных образцов Д16

Напряжение на ступени, МПа	Количество циклов на ступени	
	для первого образца	для второго образца
141,3	132 500/132 500	132 500/132 500
159,0	132 500/132 500	132 500/132 500
176,7	132 500/132 500	132 500/75 520
194,3	87 600/14 940	64 540/–

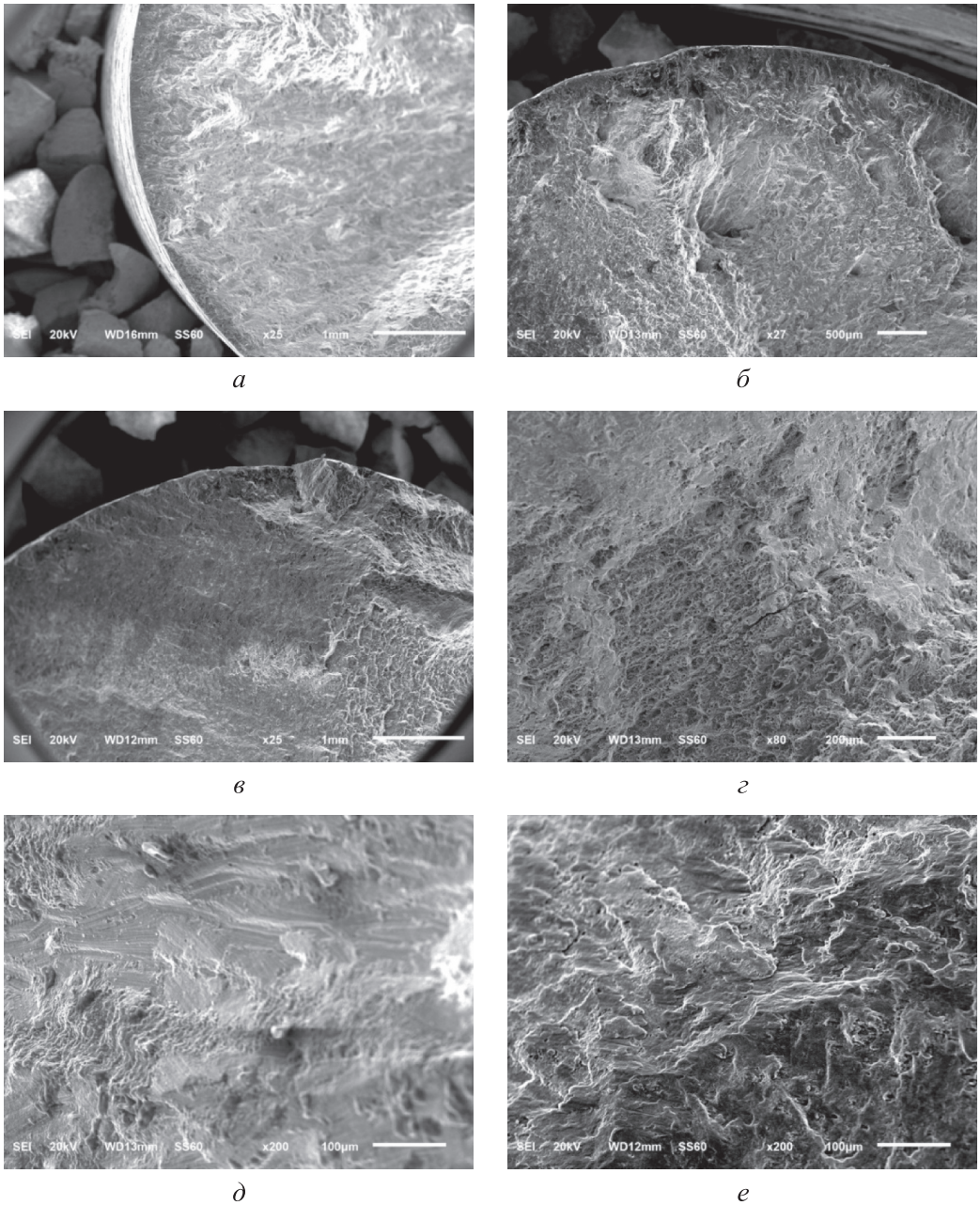
Примечание. В числителе дроби указаны значения для естественно состаренных образцов, в знаменателе — для искусственно состаренных.

образцов больше, то получаемые значения усредняют. Результаты испытаний на усталость методом Локати естественно и искусственно состаренных образцов Д16 приведены в табл. 2.

Расчетное среднее арифметическое значение предела выносливости искусственно состаренных образцов составило 139,7 МПа, а естественно состаренных — 152,8 МПа.

После усталостных испытаний изломы исследовали на электронном микроскопе. Следует отметить, что усталостный излом алюминиевого сплава Д16 существенно отличается от такового конструкционных сталей [14, 17]. Кроме того, такой тип излома преимущественно наблюдается при усталостных испытаниях на растяжение–сжатие [15, 17, 26].

После зарождения усталостная трещина проходит небольшой участок перпендикулярно действующей растягивающей (рис. 2, *а* и *б*) или сжимающей силы, а затем резко меняет угол, равный примерно 45° относительно этой силы.



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 2. Фрактограммы усталостного разрушения образцов алюминиевого сплава Д16:
а и *б* — начало разрушения естественно и искусственно состаренного образца при увеличении ×25 и ×27 соответственно;
в и *д* — естественно состаренный образец при увеличении ×25 и ×200;
г и *е* — искусственно состаренный образец при увеличении ×80 и ×200

Для естественно состаренных образцов размер прямого участка составил около 110…120 мкм, для искусственно состаренных — около 165…300 мкм. Дальнейшее развитие трещины происходит по транскристаллитному типу (рис. 2, *в* и *г*): заметны ручьистый рельеф и фасетки сколов, причем у искусственно состаренных образцов ручьистый рельеф менее выражен. Кроме того, на таких образцах присутствуют вторичные трещины и небольшие черные углубления-ямки. Длина ручьистого излома при искусственном старении меньше, чем при естественном. После прохождения вершины излома тип разрушения изменяется и представляет собой ямочный рельеф (рис. 2, *д* и *е*). При этом происходит изменение угла наклона движения трещины до 135°.

В итоге формируется излом чашка–конус с наличием участков черного цвета, являющихся продуктом окисления алюминия [17]. Дополнительно проведенный энергодисперсионный анализ показал, что на этих участках присутствует значительное количество кислорода (3,16…5,18 % масс.), что подтверждает наличие окислов.

Степень завершения процесса естественного старения образцов оценивали, измеряя твердость методом Роквелла по шкале B. Результаты измерений приведены на рис. 3. Сразу после закалки твердость составляла 47 HRB. Как видно из графика, наиболее интенсивный прирост твердости происходит в течение первых 30 мин, после чего наблюдается небольшое замедление вплоть до 50 мин, после 360 мин скорость процесса набора твердости падает до минимума, но продолжается вплоть до 8220 мин, далее рост твердости прекращается. Твердость после естественного и искусственного старения образцов равнялась 77,0 и 73,7 HRB соответственно.

Результаты рентгенофазового анализа приведены на рис. 4, где I — интенсивность в условных единицах (у. е.). Видно, что при естественном старении происходит выделение дополнительной упрочняющей фазы $CuAl_2$ и небольшое смещение пиков алюминия в среднем на 0,14°. Последнее можно объяснить наличием

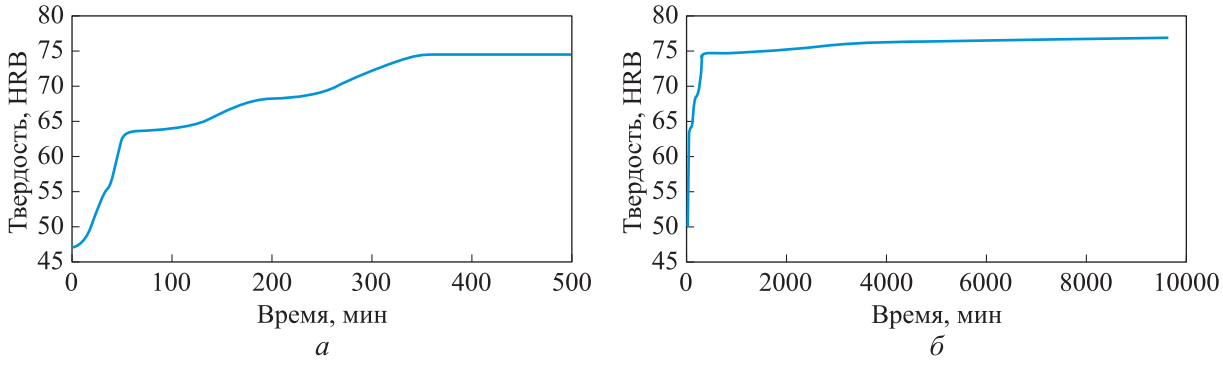


Рис. 3. Изменение твердости образцов за первые 300 мин (*а*) и полное время (*б*) естественного старения

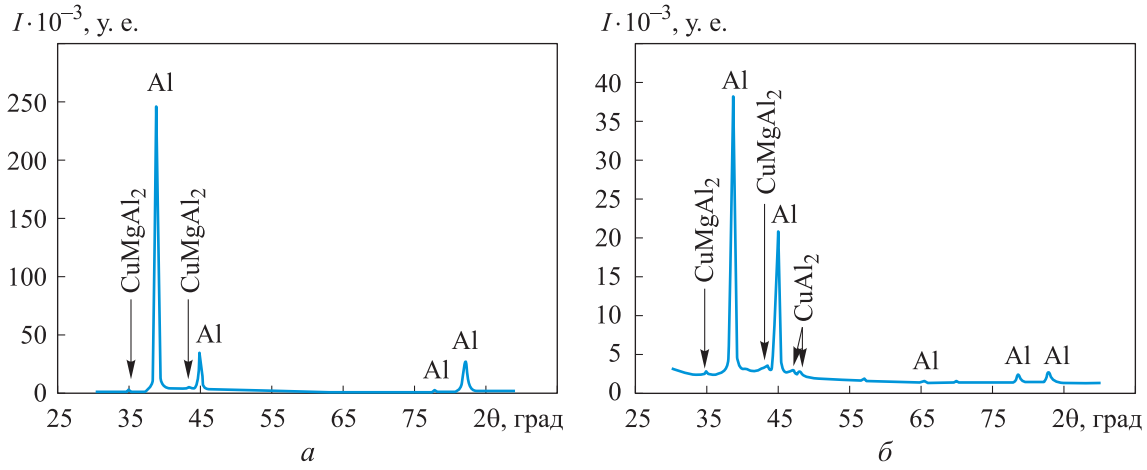


Рис. 4. Дифрактограммы сплава Д16 при искусственном (*а*) и естественном (*б*) старении

Таблица 3

Результаты коррозионных испытаний образцов

Номер образца	Площадь поверхности $S \cdot 10^6$, м^2	Масса, г		Скорость коррозии после первого этапа, г/(м^2·ч)
		до испытания	после испытания	
1	616,6/620,6	3,015/3,069	3,012/3,068	0,0290/0,0096
2	618,0/618,8	3,025/3,034	3,023/3,033	0,0193/0,0096
3	617,5/618,0	3,055/3,033	3,053/3,031	0,0193/0,0193
4	619,3/620,2	3,032/3,043	3,030/3,041	0,0192/0,0192

Примечание. В числителе дроби указаны значения для естественно состаренных образцов, в знаменателе — для искусственно состаренных.

Таблица 4

Результаты исследования параметров питтинговой коррозии

Номер образца	Количество питтингов, шт.	Наибольшая глубина питтинга, мм
1	61/34	0,112/0,332
2	32/26	0,194/0,244
3	35/23	0,132/0,268
4	41/15	0,120/0,288

Примечание. В числителе дроби указаны значения для естественно состаренных образцов, в знаменателе — для искусственно состаренных.

внутренних напряжений, которые в большем количестве возникают при естественном старении, в том числе из-за дополнительного количества упрочняющей фазы, что объясняет разницу в механических свойствах. Также об этом свидетельствуют размеры кристаллической решетки алюминия: для естественно состаренных образцов они равны $0{,}4016(9) \cdot 10^{-10}$ м, а для искусственно состаренных — $0{,}4031(3) \cdot 10^{-10}$ м, что указывает на возникновение остаточных напряжений третьего рода.

Результаты коррозионных испытаний образцов приведены в табл. 3.

По результатам расчета среднего арифметического значения скоростей коррозии установлено, что после естественного старения образцов скорость коррозии равна 0,0217 г/(м^2·ч), а после искусственного старения — 0,0144 г/(м^2·ч). Такое различие значений можно объяснить дополнительными внутренними напряжениями, возникающими в результате естественного старения вследствие выделения дополнительной фазы, о чем свидетельствуют дифрактограммы (см. рис. 4).

Так как выбранная для исследования коррозионная среда вызывает не сплошную коррозию, а точечную, сравнивать данные методом взвешивания не совсем корректно. Поэтому было принято решение оценить количество и глубину питтингов. Полученные данные приведены в табл. 4.

Из таблицы следует, что при искусственном старении количество питтингов меньше, а глубина более чем в 2 раза больше, чем при естественном старении. Разброс значений количества питтингов можно объяснить возникновением локальных микрогальванических пар вследствие распада пересыщенного раствора в процессе старения, что вызывает обеднение или обогащение по легирующим элементам (Cu и Mg) [11].

Таким образом, можно заключить, что при естественном старении потеря массы образцов выше из-за большего количества очагов питтинговой коррозии, однако после искусственного старения эти дефекты глубже. Такое различие может привести к разрушению при воздействии переменных нагрузок (поскольку более глубокие питтинги вызывают изменение размеров сечения изделий в большей мере) и, вероятнее всего, к более быстрому отказу изделия.

Выводы

1. Установлено, что механические характеристики образцов из сплава Д16 после естественного старения выше, чем после искусственного: предел выносливости — на 13,1 МПа, условный предел текучести — на 6 МПа, твердость — на 3,3 HRB.

2. Коррозионные испытания в пересыщенной хлорид-ионами среде показали, что у искусственно состаренных образцов количество питтингов меньше, а глубина более чем в 2 раза больше, чем у естественно состаренных образцов.

3. Наличие более глубоких концентраторов напряжений повышает вероятность выхода из строя оборудования, изготовленного из сплава Д16, при воздействии переменных нагрузок.

4. Дальнейшим направлением развития темы станут оценка влияния глубины и размеров питтинга на напряженно-деформированное состояние и усталостные испытания образцов, подвергнутых коррозионным испытаниям.

Литература

[1] Кондратьев С.Ю., Швецов О.В. Эксплуатационные возможности бурильных труб из алюминиевых сплавов 1160 и 1953. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2017, т. 15, № 5, с. 231–239.

[2] Кулемина А.А., Ковенский И.М. Применение электролитических никель-молибденовых покрытий для защиты деталей нефтепромыслового оборудования. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2021, т. 19, № 1, с. 35–41.

[3] Назаров В.Д., Назаров М.В., Асташина М.В. и др. Подготовка подтоварных вод для поддержания пластового давления низкопроницаемых коллекторов нефти. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, 2019, № 2, с. 22–28, doi: https://doi.org/10.33285/2411-7013-2019-2(287)-22-28

[4] Илюшин П.Ю., Рудакова Л.В., Калинина Е.В. и др. Снижение негативного воздействия нефтяных месторождений на объекты гидросферы при использовании подтоварной воды для поддержания пластового давления. *Экология и промышленность России*, 2022, т. 26, № 4, с. 56–61, doi: https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-4-56-61

[5] Швецов О.В. Повышение эксплуатационной надежности бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2017, т. 23, № 1, с. 236–246.

[6] Синявский В.С., Калинин В.Д. Коррозия и способы защиты алюминиевых сплавов в морской воде соответственно их составу и структуре. *Защита металлов*, 2005, т. 41, № 4, с. 347–359.

[7] Чернова Г.П., Корниенко Л.П. Влияние хлорид-ионов на электрохимические свойства анодированных алюминиевых сплавов АВ и Д16 в водном и водноглицериновом растворах сульфата натрия. *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2010, т. 46, № 6, с. 651–656.

[8] 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, с. 180–191.

[9] Швецов О.В., Кондратьев С.Ю., Шемякинский Б.А. Влияние защитных покрытий на работоспособность алюминиевых сплавов в условиях нефтедобычи. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2020, т. 18, № 7, с. 319–327.

[10] Маркушев М.В., Автократова Е.В., Крымский С.В. и др. Прочность и трещиностойкость криопрокатанного и состаренного алюминиевого сплава Д16. *Перспективные материалы*, 2013, № S15, с. 74–77.

[11] Garchani F.E., Lgaz H., Kaya S. et al. Effects of heat treatment on the corrosion behavior and mechanical properties of aluminum alloy 2024. *J. Mater. Res. Technol.*, 2023, vol. 25, pp. 1355–1363, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.278

[12] Ratchev P., Verlinden B., Smet P.De. Precipitation hardening of anAl–4.2 wt% Mg–0.6 wt% Cu alloy. *Acta Mater.*, 1998, vol. 46, no. 10, pp. 3523–3533, doi: https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00033-0

[13] Sadeghi-Nezhad D., Mousavi Anijdan S.H., Lee H. et al. The effect of cold rolling, double aging and overaging processes on the tensile property and precipitation of AA2024 alloy. *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 15475–15485, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.005

[14] El Garchani F.E., Rachid K.M. The study on characteristics of heat treatment of the AA2024 aluminum alloys. *J. Multidiscip. Appl. Nat. Sci.*, 2023, vol. 3, no. 2, pp. 122–130, doi: https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.166

[15] Лебедев Е.Л., Савчук С.П. Сопротивление усталости алюминиевого сплава Д16 при наличии концентратора напряжения. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*, 2023, № 689, с. 215–225.

[16] Кольцун Ю.И., Молявко Д.П., Игнатовский А.Д. и др. Объемно-кинетические характеристики медленного роста усталостной трещины в алюминиевом сплаве Д16Т. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева*, 2014, № 5–3, с. 148–157.

[17] Шанявский А.А., Никитин А.Д., Palin-Luck T. Сверхмногоцикловая усталость алюминиевого сплава Д16Т. *Физическая мезомеханика*, 2020, т. 23, № 3, с. 43–53, doi: https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13005

[18] Steuwer A., Rahman M., Shterenlikht A. et al. The evolution of crack-tip stresses during a fatigue overload event. *Acta Mater.*, 2010, vol. 58, no. 11, pp. 4039–4052, doi: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.03.013

[19] Antunes V., Serrano S., Branco R. et al. Fatigue crack growth in the 2050–T8 aluminium alloy. *Int. J. Fatigue*, 2018, vol. 115, pp. 79–88, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.020

[20] Wang C., Chen X., Cheng L. et al. Very high cycle fatigue properties of 2024 aluminum alloy samples in three sizes. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2012, art. 012032, doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2012/1/012032

[21] Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов. *Труды ВИАМ*, 2014, № 9, doi: https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11

[22] Гриневич А.В., Ерасов В.С., Якушева Н.А. и др. Усталостная долговечность стали ВКС-9 в условиях симметричного нагружения «растяжение-сжатие» и «изгиб с вращением». *Труды ВИАМ*, 2017, № 9, doi: https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-9-11-11

[23] Савельева О.Г. Влияние режимов термической обработки и пластической деформации на формирование структуры алюминиевых сплавов. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева,* 2012, № 1, с. 183–195.

[24] Кусков К.В., Сызранцева К.В. Сравнение усталостных характеристик образцов различной геометрии из стали 09Г2С. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2024, т. 26, № 2, с. 24–30.

[25] Нгок Т. Нгуен, Капралов В.М., Коленько Г.С. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости материалов. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2019, т. 25, № 2, с. 68–77, doi: https://doi.org/10.18721/JEST.25205

[26] Borges M.F., Lopez-Crespo P., Antunes F.V. et al. Fatigue crack propagation analysis in 2024-T351 aluminium alloy using nonlinear parameters. *Int. J. Fatigue*, 2021, vol. 153, art. 106478, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106478

References

[1] Kondratyev S.Yu., Shvetsov O.V. Operational capabilities of drill pipes made of aluminium alloys 1160 and 1953. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Productions in Mechanical Engineering], 2017, vol. 15, no. 5, pp. 231–239. (In Russ.).

[2] Kulemina A.A., Kovenskiy I.M. Electrolytic nickel-molybdenum coatings applied to protect parts of oilfield equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 1, pp. 35–41. (In Russ.).

[3] Nazarov V.D., Nazarov M.V., Astashina M.V. et al. Preparation of bottom waters to maintain reservoir pressure of low permeable oil reservoirs. *Zashchita okruzhayushchey sredy v nefte-*

gazovom komplekse [Environmental Protection in Oil and Gas Complex], 2019, no. 2, pp. 22–28, doi: https://doi.org/10.33285/2411-7013-2019-2(287)-22-28 (in Russ.).

[4] Ilyushin P.Yu., Rudakova L.V., Kalinina E.V. et al. Reducing the negative impact of oil fields on hydrosphere objects when using reservoir water to maintain reservoir pressure. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2022, vol. 26, no. 4, pp. 56–61, doi: https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-4-56-61 (in Russ.).

[5] Shvetsov O.V. Improving the operational reliability of drill pipes of aluminium alloys D16T and 1953T1. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2017, vol. 23, no. 1, pp. 236–246. (In Russ.).

[6] Sinyavskiy B.S., Kalinin V.D. Marine corrosion and protection of aluminum alloys according to their composition and structure. *Zashchita metallov*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 347–359. (In Russ.). (Eng. version: *Prot. Met.*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 317–328, doi: https://doi.org/10.1007/s11124-005-0046-8)

[7] Chernova G.P., Kornienko L.P. Effect of chloride ions on electrochemical properties of anodized AV and D16 aluminum alloys in aqueous and glycerin-containing aqueous sodium sulfate solutions. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 651–656. (In Russ.). (Eng. version: *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 721–726, doi: https://doi.org/10.1134/S207020511006016X)

[8] Shvetsov O.V., Alkhimenko A.A., Kondratyev S.Yu. Corrosion damages of boring pipes from aluminium alloys d16 and 1953 when operating in the conditions of oil wells. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2014, no. 3, pp. 180–191. (In Russ.).

[9] Shvetsov O.V., Kondratyev S.Yu., Shemyakinskiy B.A. Effect of protective coatings on serviceability of aluminium alloys in environment of oil production. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Productions in Mechanical Engineering], 2020, vol. 18, no. 7, pp. 319–327. (In Russ.).

[10] Markushev M.V., Avtokratova E.V., Krymskiy S.V. et al. Strength and crack resistance of cryorolled and aged d16 aluminium alloy. *Perspektivnye materialy*, 2013, no. S15, pp. 74–77. (In Russ.).

[11] Garchani F.E., Lgaz H., Kaya S. et al. Effects of heat treatment on the corrosion behavior and mechanical properties of aluminum alloy 2024. *J. Mater. Res. Technol.*, 2023, vol. 25, pp. 1355–1363, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.278

[12] Ratchev P., Verlinden B., Smet P.De. Precipitation hardening of anAl–4.2 wt% Mg–0.6 wt% Cu alloy. *Acta Mater.*, 1998, vol. 46, no. 10, pp. 3523–3533, doi: https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00033-0

[13] Sadeghi-Nezhad D., Mousavi Anijdan S.H., Lee H. et al. The effect of cold rolling, double aging and overaging processes on the tensile property and precipitation of AA2024 alloy. *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 15475–15485, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.005

[14] El Garchani F.E., Rachid K.M. The study on characteristics of heat treatment of the AA2024 aluminum alloys. *J. Multidiscip. Appl. Nat. Sci.*, 2023, vol. 3, no. 2, pp. 122–130, doi: https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.166

[15] Lebedev E.L., Savchuk S.P. Fatigue resistance of aluminum alloy D16 in the presence of a stress concentrator. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy], 2023, no. 689, pp. 215–225. (In Russ.).

[16] Koltsun Yu.I., Molyavko D.P., Ignatovskiy A.D. et al. 3D-kinetic characteristics of slow fatigue crack growth in the aluminum alloy D16T. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2014, no. 5–3, pp. 148–157. (In Russ.).

[17] Shanyavskiy A.A., Nikitin A.D., Palin-Luck T. Very high cycle fatigue of D16T aluminum alloy. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 43–53, doi: https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13005 (in Russ.). (Eng. version: *Phys. Mesomech.*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 77–84, doi: https://doi.org/10.1134/S1029959921010112)

[18] Steuwer A., Rahman M., Shterenlikht A. et al. The evolution of crack-tip stresses during a fatigue overload event. *Acta Mater.*, 2010, vol. 58, no. 11, pp. 4039–4052, doi: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.03.013

[19] Antunes V., Serrano S., Branco R. et al. Fatigue crack growth in the 2050–T8 aluminium alloy. *Int. J. Fatigue*, 2018, vol. 115, pp. 79–88, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.020

[20] Wang C., Chen X., Cheng L. et al. Very high cycle fatigue properties of 2024 aluminum alloy samples in three sizes. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2012, art. 012032, doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2012/1/012032

[21] Belyaev M.S., Khvatskiy K.K., Gorbovets M.A. Comparative analysis of national standards of RF and the USA on methods of metals fatigue testing. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2014, no. 9, doi: https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11 (in Russ.).

[22] Grinevich A.V., Erasov V.S., Yakusheva N.A. et al. Fatigue life of steel VKS-9 in conditions of symmetric loading "tension-compression" and "bending with rotation". *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 9, doi: https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-9-11-11 (in Russ.).

[23] Cavelyeva O.G. The influence of the heat processing and plastic deformation modes on the formation of the aluminum alloys structure. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2012, no. 1, pp. 183–195. (In Russ.).

[24] Kuskov K.V., Syzrantseva K.V. Comparison of fatigue characteristics of samples of different geometry from steel 09MN2S. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2024, vol. 26, no. 2, pp. 24–30. (In Russ.).

[25] Ngok T. Nguen, Kapralov V.M., Kolenko G.S. Effect of loading frequencies on fatigue resistance of materials. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2019, vol. 25, no. 2, pp. 68–77, doi: https://doi.org/10.18721/JEST.25205 (in Russ.).

[26] Borges M.F., Lopez-Crespo P., Antunes F.V. et al. Fatigue crack propagation analysis in 2024-T351 aluminium alloy using nonlinear parameters. *Int. J. Fatigue*, 2021, vol. 153, art. 106478, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106478

Статья поступила в редакцию 16.10.2025

Информация об авторах

КУСКОВ Константин Викторович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вибрационного и гидродинамического моделирования. ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (625000, Тюмень, Российская Федерация, ул. Володарского, д. 38, e-mail: kuskovkv@tyuiu.ru).

ХЫЗОВ Антон Александрович — старший преподаватель кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов. ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (625000, Тюмень, Российская Федерация, ул. Володарского, д. 38, e-mail: hyzovaa@tyuiu.ru).

БЕЛОВ Михаил Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов. ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (625000, Тюмень, Российская Федерация, ул. Володарского, д. 38, e-mail: belovms@tyuiu.ru).

Information about the authors

KUSKOV Konstantin Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of Vibration and Hydrodynamic Modeling. Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Industrial University of Tyumen (625000, Tyumen, Russian Federation, Volodarsky St., Bldg. 38, e-mail: kuskovkv@tyuiu.ru).

HYZOV Anton Aleksandrovich — Senior Lecturer, Department of Materials Science and Technology of Structural Materials. Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Industrial University of Tyumen (625000, Tyumen, Russian Federation, Volodarsky St., Bldg. 38, e-mail: hyzovaa@tyuiu.ru).

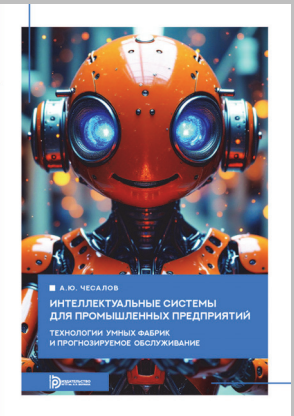
BELOV Mikhail Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor. Department of Materials Science and Technology of Structural Materials. Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Industrial University of Tyumen (625000, Tyumen, Russian Federation, Volodarsky St., Bldg. 38, e-mail: belovms@tyuiu.ru).

ВОРОНИН Владислав Вадимович — кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории вибрационного и гидродинамического моделирования. ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (625000, Тюмень, Российская Федерация, ул. Володарского, д. 38, e-mail: voroninvv@tyuiu.ru).

VORONIN Vladislav Vadimovich — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher, Laboratory of Vibration and Hydrodynamic Modeling. Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Industrial University of Tyumen (625000, Tyumen, Russian Federation, Volodarsky St., Bldg. 38, e-mail: voroninvv@tyuiu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Кусков К.В., Хызов А.А., Белов М.С., Воронин В.В. Сравнение механических и коррозионных характеристик алюминиевого сплава Д16 после различных видов старения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 37–47.

Please cite this article in English as:
Kuskov K.V., Hyzov A.A., Belov M.S., Voronin V.V. Comparison of mechanical and corrosion characteristics of alumin alloy D16 after different types of age hardening. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 37–47.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию А.Ю. Чесалова

«Интеллектуальные системы для промышленных предприятий. Технологии умных фабрик и прогнозируемое обслуживание»

Приведен комплексный анализ ключевых мировых трендов, определяющих траекторию цифровой трансформации промышленности на ближайшее десятилетие; сформирован перечень приоритетных производственных задач автоматизации во взаимосвязи с современными технологиями и технологиями искусственного интеллекта в условиях перехода от концепции цифровой экономики к экономике данных. Выполнен анализ возможности интеграции искусственного интеллекта с системами управления производством, управления активами предприятия, планирования ресурсов, управления качеством продукции, управления техническим обслуживанием.

Представлены базовая математическая модель снижения неопределенности данных, поступающих с периферийных устройств (датчиков, шлюзов и др.) промышленного Интернета вещей и обрабатываемых в системах прогнозируемого обслуживания и пример программы машинного обучения «EUS Model 1 PdM/Exp», реализующей базовый алгоритм поддержки принятия решений для промышленных автоматизированных систем прогнозируемого обслуживания.

Для широкого круга читателей; будет также полезна руководителям предприятий.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; https://press.bmstu.ru