

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL RESEARCH

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-6-605-622

EDN: FWXOUY

Научная статья / Research article

Интегральный критерий выбора алюминиевого сплава для строительства резервуаров в условиях Арктики

О.А. Корнев¹, А.Н. Шувалов¹, А.В. Корнилова^{1,2}, В.А. Ермаков¹¹ Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация² Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ ermakov@mgsu.ru

Поступила в редакцию: 17 сентября 2025 г.

Доработана: 24 ноября 2025 г.

Принята к публикации: 30 ноября 2025 г.

Аннотация. Цель исследования — разработка интегрального критерия выбора алюминиевого сплава для резервуаростроения в условиях пониженных температур. В ходе работы были проведены экспериментальные исследования четырех алюминиевых сплавов 1915Т, 6082-Т6, АД35Т1, 1565ч согласно российским нормативам. Для обработки результатов испытаний применялись стандартные алгоритмы математической статистики: расчет выборочных характеристик, проверка выборок на нормальность распределения и исключение грубых погрешностей измерений. Выделены группы характеристик, влияющие на эффективность применения сплава: стандартные механические свойства, ударная вязкость, характеристики трещиностойкости, усталостные характеристики, сопротивление коррозии, стоимостно-весовые характеристики. Проведенные в процессе исследования экспертные опросы позволили определить весовые коэффициенты как внутри групп, так и самих групп при формировании интегрального критерия. Показано, что наибольший вес имеют усталостные характеристики и характеристики трещиностойкости, что указывает на необходимость включения расчета параметров усталости и трещиностойкости в нормативные документы по проектированию резервуаров из алюминиевых сплавов. Важность повышения усталостных характеристик и трещиностойкости алюминиевых сплавов для применения в арктических условиях должна быть учтена и при проектировании новых сплавов, и термических обработках существующих. Из рассмотренных в исследовании сплавов наилучший интегральный показатель у сплава 1915Т. Этот сплав обладает существенно более высокими усталостными характеристиками и ударной вязкостью по сравнению с остальными исследован-

Корнев Олег Александрович, заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 4890-2128, ORCID: 0009-0009-5545-5284; e-mail: KornevOA@mgsu.ru

Шувалов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры испытаний сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 8488-4644, ORCID: 0009-0007-0289-7412; e-mail: AShvalov@mgsu.ru

Корнилова Анна Владимировна, доктор технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; профессор кафедры строительных технологий и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240, ORCID: 0000-0001-5569-9320; e-mail: KornilovaAV@mgsu.ru

Ермаков Валентин Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3227-6815, ORCID: 0000-0002-8862-8139; e-mail: Ermakov@mgsu.ru

© Корнев О.А., Шувалов А.Н., Корнилова А.В., Ермаков В.А., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

ными сплавами. Наихудший интегральный показатель у сплава АД35Т1, что косвенно подтверждает преимущества естественного старения алюминиевых сплавов. Лучшими стоимостно-весовыми характеристиками обладает сплав 1565ч. Дальнейшее исследование предполагает расширение показателей, входящих в предложенный интегральный критерий за счет введения показателей свариваемости.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, пониженные температуры, ударная вязкость, усталостные характеристики, трещиностойкость, коррозионная стойкость, вес, стоимость

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: *Корнев О.А.* — общее руководство и проведение экспериментальных исследований; *Шувалов А.Н.* — разработка идеологии исследования; *Корнилова А.В.* — проведение опросов, экспериментальных данных, написание текста статьи; *Ермаков В.А.* — создание графического материала, написание теста статьи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Благодарности. Авторы благодарят профессора Андрея Валентиновича Коргина, коллектив лаборатории ЛИСМиК НИИ ЭМ, начальника научно-технического управления НИУ МГСУ доцента Павла Дмитриевича Капырина, руководство компании АО «Русал», Алюминиевую ассоциацию за предоставление материала для экспериментальных испытаний.

Для цитирования: *Корнев О.А., Шувалов А.Н., Корнилова А.В., Ермаков В.А.* Интегральный критерий выбора алюминиевого сплава для строительства резервуаров в условиях Арктики // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2025. Т. 21. № 6. С. 605–622. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-605-622> EDN: FWXOUY

Integral Criterion for the Selection of Aluminum Alloy for the Construction of Reservoirs in the Arctic

Oleg A. Kornev¹, Aleksandr N. Shuvalov¹, Anna V. Kornilova^{1,2}, Valentin A. Ermakov¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ ermakov@mgsu.ru

Received: September 17, 2025

Revised: November 24, 2025

Accepted: November 30, 2025

Abstract. The purpose of the study is to develop an integral criterion for choosing an aluminum alloy for tank construction at low temperatures. In the course of the work, experimental studies of four aluminum alloys 1915T, 6082-T6, AD35T1, 1565ch were carried out in accordance with Russian standards. Standard mathematical statistics algorithms were used to process the test results: calculating sample characteristics, checking samples for the normality of the distribution, and eliminating gross measurement errors. Groups of characteristics that affect the effectiveness of the alloy are identified: standard mechanical properties, impact strength, crack resistance characteristics, fatigue characteristics, corrosion resistance, cost and weight characteristics. The expert surveys conducted during the study allowed to determine the weighting coefficients both within the groups and when forming the integral criterion. It is shown that fatigue characteristics and crack resistance characteristics have the greatest weight, which indicates the need to include the calculation of fatigue and crack resistance parameters in regulatory documents for the design of aluminum alloy tanks. The importance of increasing the fatigue characteristics and crack resistance of aluminum alloys for use in Arctic conditions should be taken into account when designing new alloys and thermal treatments of existing ones. Of the alloys considered in the study, alloy 1915T has the best integral index. This alloy has significantly higher fatigue characteristics and impact strength compared to the other alloys studied. The AD35T1 alloy has the worst integral index, which indirectly confirms the advantages of natural aging of aluminum alloys. Alloy 1565ch has the best cost and weight characteristics. Further research suggests expanding the indicators included in the proposed integral criterion by introducing weldability indicators.

Oleg A. Kornev, Deputy Director, Scientific Research Institute of Experimental Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4890-2128, ORCID: 0009-0009-5545-5284; e-mail: KornevOA@mgsu.ru

Aleksandr N. Shuvalov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8488-4644, ORCID: 0009-0007-0289-7412; e-mail: AShuvalov@mgsu.ru

Anna V. Kornilova, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher at the Scientific Research Institute of Experimental Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); Professor of the Department of Construction Technology and Structural Materials, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240, ORCID: 0000-0001-5569-9320; e-mail: KornilovaAV@mgsu.ru

Valentin A. Ermakov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Scientific Research Institute of Experimental Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3227-6815, ORCID: 0000-0002-8862-8139; e-mail: Ermakov@mgsu.ru

Keywords: aluminum alloy, low temperatures, impact strength, fatigue characteristics, crack resistance, corrosion resistance, weight, cost

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution: *Kornev O.A.* — general guidance and conduct of experimental research; *Shuvalov A.N.* — development of research ideology; *Kornilova A.V.* — conducting surveys, experimental data, text writing; *Ermakov V.A.* — graphic material, text writing. All of the authors read and approved the final version of the article.

Acknowledgements. The authors would like to thank Professor Andrey Valentinovich Korgin, the staff of the LISMiK Laboratory of the EM Research Institute, the Head of the Scientific and Technical Department of the MGSU, Associate Professor Pavel Dmitrievich Kapryrin, the management of JSC Rusal, and the Aluminum Association for providing material for experimental testing.

For citation: Kornev O.A., Shuvalov A.N., Kornilova A.V., Ermakov V.A. Integral criterion for the selection of aluminum alloy for the construction of reservoirs in the Arctic. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(6): 605–622. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-605-622> EDN: FWXOUY

1. Введение

В мире уделяется большое внимание ускорению развития Арктического пространства. Программы по освоению ресурсов Арктической зоны активно разрабатываются в США, Канаде, Дании, Исландии, Норвегии, Финляндии и Швеции. В Российской Федерации Указом Президента РФ¹ утверждена собственная Стратегия развития Арктической зоны и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г. Основным направлением стратегии является проведение фундаментальных и прикладных научных исследований в интересах освоения Арктики, создание функциональных и конструкционных материалов, необходимых для осуществления хозяйственной деятельности в арктических условиях.

Одним из путей реализации этого направления из вышеуказанной Стратегии является использование алюминиевых сплавов, которые обладают рядом известных преимуществ перед другими конструкционными и функциональными материалами. В [1] доказывается, что эти сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью. В [2] доказана низкая степень влияния температуры окружающей среды на коррозионную стойкость алюминиевых сплавов и показаны перспективы применения сплавов алюминия в регионах с повышенной влажностью и в агрессивных средах. В [3] отражено влияние параметров термообработки на свойства широко применяемого алюминиевого сплава 6082. В [4] показано, что сплавы алюминия имеют малый удельный вес, при этом обеспечивают увеличение срока службы листовых конструкций по сравнению со стальным прокатом. В экспериментальном исследовании [5] выявлено, что при понижении температуры испытаний механические свойства алюминиевых сплавов повышаются, что, в свою очередь, является положительным фактором для применения этих сплавов северных условиях. Кроме того, стальные вертикальные цилиндрические резервуары (ВЦР) уязвимы для испарений нефти и нефтепродуктов. При контакте паров сернистой нефти и нефтепродуктов со сплавами железа образуется сернистое железо, которое разъедает стенки и днища резервуара и увеличивает риск воспламенения.

Использование алюминиевых сплавов позволяет снизить транспортные расходы, уменьшить стоимость эксплуатационных расходов во время жизненного цикла объекта и его капитальных ремонтов. Кроме того, коррозионная стойкость позволяет существенно увеличивать срок службы объектов [4; 6]. В [6] проведено сравнение технико-экономических показателей резервуаров из стали и алюминиевого сплава АМг-6М одинаковой конструкции. Преимущество конструкции из алюминиевых сплавов проявилось в уменьшении удельной металлоемкости (на 32 % от сметной стоимости армирования фундаментной плиты), стоимости транспортировки (на 8 % при расчете тонны на километр), а также в уменьшении эксплуатационных расходов и сокращении числа капитальных

¹ Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» (с изменениями и дополнениями).

ремонт (на 5 % на первые 15 лет эксплуатации). Первые в Японии алюминиевые резервуары для хранения сжиженного кислорода, построенные в 1960 г., до сих пор находятся в эксплуатации. Резервуар емкостью 80000 м³ имеет внутренний диаметр 50 м, толщина стенки в максимальной зоне достигает 69 мм. В качестве конструкционного материала использован алюминиевый сплав 5063-0. Вся цилиндрическая оболочка и 80 % кровельных конструкций выполнены автоматической сваркой (рис. 1).

В период с 2010 г. по настоящее время во всем мире растет интерес к применению алюминиевых сплавов при лабораторных, низких, сверхнизких и повышенных температурах [7–17]. В [7] изучалось влияние низкой температуры на механические свойства и микроструктуру алюминиевого сплава 6061-T6 (AA6061-T6), подвергнутого динамическому нагружению. В [8] исследовались свойства алюминиевого двутавра при низких температурах. Работа [9] посвящена влиянию температуры на коррозионные свойства сплавов. В [10] доказана эффективность криогенной обработки алюминиевых сплавов. В [11–15] представлены исследования различных аспектов усталости алюминиевых сплавов (величина предела выносливости при различных температурах и коэффициентах асимметрии цикла, угол наклона ветви многоциклового усталостного кривой Веллера). Кроме того, в [11–13] сделаны попытки прогнозирования срока службы конструкций из алюминиевых сплавов, в том числе с привлечением нейронных сетей [13]. В [14; 15] изучено влияние упрочняющих лазерных технологий на усталостную долговечность алюминиевых сплавов посредством введения твердых частиц и лазерным ударом, в [16] упрочнения предлагается проводить легированием редкоземельными элементами, в [17] сделана попытка прогнозировать свойства алюминиевого проката по дюраметрии.



Рис. 1. Вертикальные цилиндрические резервуары из алюминиевого сплава, построенные в Японии в 1960 г. (фото сделано в 2025 г.)

И с т о ч н и к : https://en.wikipedia.org/wiki/Liquefied_natural_gas_terminal

Figure 1. Vertical cylindrical aluminum alloy tanks, built in Japan in 1960 (photo taken in 2025)

S o u r c e : https://en.wikipedia.org/wiki/Liquefied_natural_gas_terminal

Наиболее эффективно применение алюминиевых сплавов для строительства резервуаров в условиях Крайнего Севера и приближенных к нему регионов. Однако для строительства таких резервуаров используют в основном стали², что увеличивает материальные затраты при монтаже и эксплуатации и повышает вероятность разрушения из-за охрупчивания в условиях пониженных температур. Так в феврале 1970 г. в Якутске Российской Федерации при температуре окружающего воздуха минус 57 °С полностью разрушился стальной ВЦР объемом 700 м³ [18]. Хрупкая трещина возникла в нижнем уторном узле. Аналогичные аварии со стальными конструкциями ВЦР произошли в зимнее время в г. Воскресенске Челябинской обл. Российской Федерации (резервуар объемом 5000 м³), в г. Пучеж Ивановской обл. Российской Федерации (резервуар объемом 2000 м³) [19]. При составле-

² ГОСТ 31385-2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Москва : ФГБУ «РСТ», 2023. 122 с.

нии настоящего обзора аварий ВЦР не выявлено ни одного случая хрупкого разрушения конструкций из алюминиевых сплавов.

Однако случаи усталостного разрушения алюминиевых листовых конструкций отмечены в [20; 21], в связи с этим возникает необходимость исследовать закономерности образования усталостных трещин при отрицательных температурах эксплуатации. Но действующие нормативные документы проектирования металлических конструкций³ предусматривают расчет листовых конструкций, в частности стальных резервуаров, только на воздействие статических нагрузок.

В 2016 г. был актуализирован свод правил⁴, касающихся алюминиевых строительных конструкций, в том числе резервуаров для хранения нефти, нефтепродуктов и сжиженного газа, в котором также указывается, что Правила не распространяются на проектирование алюминиевых конструкций и сооружений, подвергающихся многократному воздействию нагрузок (т.е. не учитывается усталостная прочность). В связи с таким подходом мало исследованы усталостные характеристики ряда алюминиевых сплавов для строительства ВЦР в условиях Крайнего Севера, что затрудняет выбор сплавов для резервуаров, обеспечивающий оптимальные условия монтажа и эксплуатации конструкции.

При составлении обзора в наукометрических базах данных (РИНЦ, Scopus, Web Of Science) не обнаружено ни одного источника, в котором бы были сформулированы и статистически доказаны комплексные требования к характеристикам алюминиевых сплавов для конструкций, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера. В связи с этим была сформулирована *цель настоящего исследования* — разработка интегрального критерия, учитывающего комплекс характеристик алюминиевых сплавов, и на его основе алгоритма оптимизации выбора сплавов для ВЦР при отрицательных температурах эксплуатации. Объектом исследования являются алюминиевые сплавы для строительства резервуаров.

2. Методы, оборудование и материалы

В работе исследовались четыре наиболее применяемых для резервуаростроения алюминиевых сплава 1915Т, 6082-Т6, АД35Т1, 1565ч. Химический состав определялся оптико-эмиссионным спектрометром ARL easySpark. Экспериментальные исследования свойств проводились на образцах с рекомендованной нормативной документацией⁵ для данных сплавов обработкой:

АД35. Сплав системы Al-Mg-Si — охлаждение с температуры горячего процесса изготовления и искусственное старение на максимальную прочность (Т1);

1915. Сплав системы Al-Zn-Mg — закалка и естественное старение (Т);

6082. Сплав системы Al-Mg-Si — закалка и искусственное старение (Т6);

1565ч. Сплав системы Al-Mg — упрочнение только в процессе наклепа при прокатке листа (сплав термонеупрочняемый).

В качестве критериев оценки сплавов выбраны:

- стандартные механические характеристики: предел прочности, предел текучести, относительное сужение, относительное удлинение, модуль упругости;

³ См.: ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2016. 96 с.; РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000–50000 м³. Москва : ОАО «АК «Транснефть», 2004. 60 с.; СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Москва : Ростехэкспертиза, 2009. 216 с.; РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000–50000 м³. Москва : ОАО «АК «Транснефть», 2004. 60 с.; СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Москва : Ростехэкспертиза, 2009. 216 с.

⁴ СП 128.13330.2016. Алюминиевые конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.06-85. Москва : АО «НИЦ «Строительство» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, институт ЦНИИПСК им. Мельникова, ЗАО «МЕТАКОН ЦЕНТР», 2016. 80 с.

⁵ ГОСТ 21631–2019. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2020. 35 с.

- характеристики трещиностойкости: значение коэффициента интенсивности напряжений для максимального значения нагрузки, временное значение вязкости разрушения при плоской деформации, критический J -интеграл, раскрытие в вершине трещины при максимальной нагрузке;

- ударная вязкость.

Все испытания проводились при температурах +20 °С, –20 °С, –40 °С, –70 °С и –104 °С.

Нагружение образцов производилось с использованием универсального силового испытательного оборудования: Instron 8802, Instron 3382, LabTest 6.500H.5.0, SATEC тип 1000HDX, Instron MPX-450 для определения ударной вязкости. Перемещения определялись с помощью преобразователя перемещений серии 2600, тип 2630-106. Охлаждение образцов до требуемой температуры проводилось в термокамерах Instron 3119-407 и LaborTech ТК3-80. Измерение деформаций выполнялось тензорезисторами с базой 1,0–3,0 мм. На всех уровнях нагрузки при проведении экспериментов каждой группы испытывалось 8 образцов всех марок сплавов.

Для статистической обработки результатов испытаний применялись стандартные алгоритмы математической статистики: расчет выборочных характеристик⁶, проверка выборок на нормальность распределения⁷ и исключение грубых погрешностей измерений.

В ходе исследования было проведено три экспертных опроса, в которых участвовало 10 экспертов со стажем не менее 15 лет (4 инженера-эксплуатационщика ВЦР, 4 ученых-металловеда, 2 аттестованных РОСТЕХНАДЗОРОм эксперта по промышленной безопасности).

При обработке опросов экспертов рассчитывался коэффициент конкордации W Кендела [22]:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (1)$$

где m — количество экспертов, принявших участие в опросе; n — количество параметров, оцениваемых экспертами; S — сумма квадратов отклонений сумм рангов каждого фактора от средней суммы рангов.

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^m r_{ik} - 0,5m(n+1) \right]^2.$$

Значимость коэффициента конкордации оценивалась по критерию χ^2 Пирсона [23]. Нормированное кодирование натуральных факторов осуществлялось по известному алгоритму, например [24].

В процессе обработки экспериментальных данных формировались критерии оптимизации. Нормированное кодирование применялось в связи с тем, что натуральные характеристики имеют разную размерность.

Проведенные исследования имеют ограничения: изучался только листовая материал конструкций ВЦР, не рассматривались сварные соединения и работа концентраторов напряжений в условиях циклически изменяющихся напряжений, температурный интервал ограничивался значениями от +20 до –104 °С.

3. Результаты и обсуждение

Все характеристики, влияющие на эффективность применения алюминиевых сплавов в арктических условиях, разделены на шесть групп: стоимостно-весовые (определяют экономическую эффективность на стадии изготовления ВЦР), стандартные механические характеристики, ударная вязкость, характеристики трещиностойкости, усталостные характеристики, коррозионная стойкость.

⁶ ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Москва : Стандартинформ, 2019. 26 с.

⁷ ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. Москва : Госстандарт России, 2002. 27 с.

В работе приняты следующие обозначения:

- $Y_{kgt^{\circ}C}$ — $k_{2ijt^{\circ}C}$ — локальные обобщенные критерии по каждой из 6 групп характеристик ($g = 1$ — стоимостно-весовые характеристики, $g = 2$ — стандартные механические характеристики, $g = 3$ — ударная вязкость, $g = 4$ — характеристики трещиностойкости, $g = 5$ — характеристики сопротивления усталости; $g = 6$ — коррозионная стойкость) при каждой температуре испытаний $t^{\circ}C$;
 - $k_{1ijt^{\circ}C} \dots k_{6ijt^{\circ}C}$ — нормированное кодированное значение характеристики i внутри группы для сплава j ($j = 1$ — АД35Т1, $j = 2$ — 1915Т, $j = 3$ — 6082-Т6, $j = 4$ — 1565 ч) при каждой температуре испытаний $t^{\circ}C$;
 - α_i , β_i и γ_i — внутригрупповые весовые коэффициенты для стандартных механических характеристик, трещиностойкости и коррозионной стойкости соответственно;
 - δ_g — весовые коэффициенты групп характеристик, входящих в интегральный критерий $Y_{t^{\circ}C}$.
- Все весовые характеристик определены с помощью статистической обработки экспертных опросов.

3.1. Стоимостно-весовые характеристики

Удельный вес сплавов рассчитывался исходя из массовых процентов, входящих в сплав элементов и их удельного веса, который определялся по справочным данным⁸. Химический состав исследованных сплавов, определенный спектрометром ARL easySpark, приведен в табл. 1.

С учетом удельного веса для каждого сплава определялся вес стандартного листа $10 \times 1200 \times 3000$, данные по стоимости листового материала получены из прайс-листов металлообрабатывающих компаний и сети интернет (табл. 2).

Таблица 1. Химический состав сплавов, % / Table 1. Chemical composition of alloys, %

Марка сплава / Alloy grade	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Zr
АД35Т1 / AD35T1	0,50	1,00	0,70	0,25	0,10	96,25	0,10	0,90	0,20	
1915Т	0,40	0,35	0,45	0,13	0,04	92,49	0,10	1,40	4,50	0,14
6082-Т6	0,30	1,00	0,70	0,25	0,10	96,45	0,10	0,90	0,20	
1565ч / 1565ch	0,30	0,20	0,80	0,35	0,03	91,55	0,10	5,65	0,83	0,20

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

Таблица 2. Стоимостно-весовые характеристики сплавов / Table 2. Cost and weight characteristics of alloys

Марка сплава j / Alloy grade j	Удельный вес сплава, $г/см^3$ / Specific gravity of the alloy, g/cm^3	Вес листа, кг / Sheet weight, kg	Стоимость листа, тыс. р. / The cost of the sheet, thousand rubles	Отношение стоимости листа к весу $10 \times 1200 \times 3000$, руб/кг / The ratio of the cost of the sheet to the weight $10 \times 1200 \times 3000$, RUB / kg	Нормированные кодированные значения выборки отношения стоимости листа к его весу k_{1j} / Normalized coded sample values of the ratio of the cost of a sheet to its weight k_{1j}
АД35Т1 / AD35T1	277,48	100	69,25	69250	0,20
1915Т	301,10	108	74,79	74790	1
6082-Т6	280,74	101	63,67	63660	-0,61
1565ч / 1565ch	265,38	96	60,95	60951	-1

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

⁸ Таблица удельного веса металлов. URL: https://pkf-uralmet.ru/uploadedFiles/files/Tablitsa_udelnogo_vesa_metallov.pdf (дата обращения: 20.08.2025).

Локальный обобщенный критерий Y_1 по стоимостно-весовым характеристикам не зависит от температуры испытаний и равен k_{1j} для каждого сплава. Минимальными стоимостно-весовыми характеристиками (оптимальными по данной группе характеристик) обладает сплав 1565ч.

3.2. Стандартные механические характеристики

Стандартные механические характеристики определялись экспериментально при лабораторной температуре +20 °С и отрицательных температурах (от –20 до –104 °С) согласно ГОСТ 1497⁹. Данные сведены в табл. 3. В качестве примера приведены диаграммы деформирования сплавов АД35Т1 и 1915Т при температуре +20 °С (рис. 2).

Таблица 3. Механические характеристики сплавов при различных температурах испытаний
Table 3. Mechanical characteristics of alloys at various test temperatures

t, °C	Механическая характеристика <i>i</i> / Mechanical characteristics <i>i</i>	Натуральные значения / Natural values				Нормированные кодированные значения $k_{2ij}^{t^{\circ}C}$ / Normalized coded values $k_{2ij}^{t^{\circ}C}$			
		Марка сплава / Alloy grade <i>j</i>							
		АД35Т1 / AD35T1	1915Т	6082Т6	1565ч / 1565ch	АД35Т1 / AD35T1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
+20	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	302	360	330	390	–1	0,32	–0,36	1
	Предел текучести, МПа / Yield strength, MPa	293	255	315	285	0,27	–1	1	0
	Относительное сужение, % / Relative narrowing, %	36	28	23	15	1	0,24	–0,24	–1
	Относительное удлинение, % / Relative elongation, %	12,2	10,9	13	12	0,24	–1	1	0,05
	Модуль упругости, МПа / Modulus of elasticity, MPa	72000	71000	72000	71000	1	–1	1	–1
–20	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	345	365	330	390	–0,5	0,17	–1	1
	Предел текучести, МПа / Yield strength, MPa	320	265	332	285	0,64	–1	1	–0,4
	Относительное сужение, % / Relative narrowing, %	38	27,6	23	16	1	0,05	–0,36	–1
	Относительное удлинение, % / Relative elongation, %	13	11,2	14	12,5	0,29	–1	1	–0,07
	Модуль упругости, МПа / Modulus of elasticity, MPa	74000	73000	74000	71000	1	0,33	1	–1
–40	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	350	370	345	400	–0,82	–0,09	–1	1
	Предел текучести, МПа / Yield strength, MPa	325	270	335	290	0,69	–1	1	–0,38
	Относительное сужение, % / Relative narrowing, %	37,5	27,5	22	17,5	1	0	–0,55	–1
	Относительное удлинение, % / Relative elongation, %	13,1	13	14,8	13	–0,89	–1	1	–1
	Модуль упругости, МПа / Modulus of elasticity, MPa	74200	73500	74500	71500	0,8	0,33	1	–1

⁹ ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Москва : ФГБУ «РСТ», 2024. 62 с.

t, °C	Механическая характеристика i / Mechanical characteristics i	Натуральные значения / Natural values				Нормированные кодированные значения $k_{2ijt}^{\circ C}$ / Normalized coded values $k_{2ijt}^{\circ C}$			
		Марка сплава / Alloy grade j							
		АД35Т1 / AD35T1	1915Т	6082Т6	1565ч / 1565ch	АД35Т1 / AD35T1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
-70	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	360	395	350	405	-0,64	0,64	-1	1
	Предел текучести, МПа / Yield strength, MPa	337	275	350	290	0,65	-1	1	-0,6
	Относительное сужение, % / Relative narrowing, %	36	26,5	21,5	19	1	-0,12	-0,71	-1
	Относительное удлинение, % / Relative elongation, %	14	13,5	15,5	14,5	-0,5	-1	1	0
	Модуль упругости, МПа / Modulus of elasticity, MPa	76500	75000	77000	74000	0,67	-0,33	1	-1
-104	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	390	415	375	420	-0,33	0,78	-1	1
	Предел текучести, МПа / Yield strength, MPa	356	280	360	295	0,9	-1	1	-0,63
	Относительное сужение, % / Relative narrowing, %	37,2	26	21	20	1	-0,3	-0,88	-1
	Относительное удлинение, % / Relative elongation, %	14,6	13,5	16	16,5	-0,27	-1	0,67	1
	Модуль упругости, МПа / Modulus of elasticity, MPa	81000	77000	78500	77000	1	-1	-0,25	-1

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

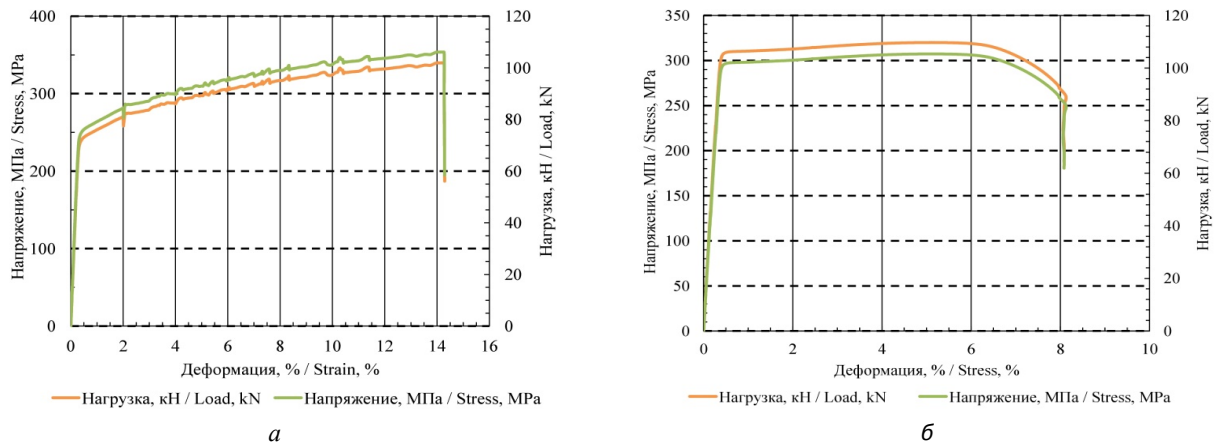


Рис. 2. Диаграмма «Напряжение/Нагрузка-деформация» при температуре +20 °C:
а — для сплава 1915Т; б — АД35Т1

Источники: выполнено О.А. Корневым.

Figure 2. “Stress/Load-strain” diagram at a temperature of +20 °C:

а — for alloy 1915Т; б — АД35Т1

Source: made by O.A. Kornev.

С целью определения весовых коэффициентов значимости каждой из стандартных механических характеристик алюминиевых сплавов для ВЦР в арктических условиях был проведен экспертный опрос. Коэффициент конкордации опроса W составил 0,67 по (1), уровень значимости (вероятность ошибки первого рода), определенный по Пирсону, составил 0,01. Весовые коэффициенты (α_i), полученные в результате статистической обработки опросной таблицы, составили для характери-

стик этой группы: предел прочности $\alpha_1 = 0,27$; предел текучести $\alpha_2 = 0,33$; относительное сужение $\alpha_3 = 0,20$; относительное удлинение $\alpha_4 = 0,13$; модуль упругости $\alpha_5 = 0,07$, т.е. наиболее значимой характеристикой этой группы факторов, по мнению опрашиваемой группы экспертов, принят предел текучести материала, наименее значимой — модуль упругости. С учетом весовых коэффициентов были рассчитаны значения локального обобщенного критерия $Y_{2t^\circ C}$ для характеристик этой группы:

$$Y_{2t^\circ C} = \sum_{i=1}^5 k_{2ijt^\circ C} \alpha_i, \quad (2)$$

где $k_{2ijt^\circ C}$ — нормированное кодированное значение характеристики (i) для сплава (j) при температуре испытаний (t °C) из табл. 3 (табл. 4).

Таблица 4. Локальный обобщенный критерий $Y_{2t^\circ C}$ для стандартных механических характеристик по (2)

Table 4. Local generalized criterion $Y_{2t^\circ C}$ for standard mechanical characteristics according to (2)

$t, ^\circ\text{C}$	АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
+20	0,12	-0,4	0,38	0,01
-20	0,38	-0,38	0,19	-0,14
-40	0,15	-0,46	0,15	-0,26
-70	0,22	-0,33	0,12	-0,2
-104	0,44	-0,38	-0,05	-0,08

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

Максимальными характеристиками (оптимальными по данной группе характеристик) при температуре +20 °C обладает сплав 6082-Т6, при температурах -20 °C, -70 °C, -104 °C — сплав АД35Т1, при температуре -20 °C — сплавы 6082-Т6 и АД35Т1 показывают равное между собой, но существенно большее, чем остальные изучаемые сплавы, значение обобщенного локального критерия $Y_{2t^\circ C}$.

3.3. Ударная вязкость

Испытания по определению ударной вязкости сплавов проводились по ГОСТ 9454¹⁰. Экспериментальные данные приведены в табл. 5 и на рис. 3.

Таблица 5. Ударная вязкость KCV при различных температурах испытаний

Table 5. Impact toughness KCV at various test temperatures

$t, ^\circ\text{C}$	Натуральные значения, Дж/см ² / Natural values, J/cm ²				Нормированные кодированные значения $k_{3ijt^\circ C}$ / Normalized coded values $k_{3ijt^\circ C}$			
	Марка сплава / Alloy grade j							
	АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082Т6	1565ч / 1565ch	АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
+20	8,1	38,1	11,8	25,1	-1	1	-0,75	0,13
-20	9,2	42,3	12,2	21,9	-1	1	-0,82	-0,23
-40	9,4	42,1	11,9	21,1	-1	1	-0,85	-0,28
-70	9,6	41,1	11,1	20,8	-1	1	-0,9	-0,29
-104	9,8	41,8	12,3	20,1	-1	1	-0,84	-0,36

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

¹⁰ ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

Все изломы хрупко-вязкие с преобладанием вязкой составляющей. Изломы состоят из плоской центральной части, губ среза и области сжатия в месте удара маятника копра. С понижением температуры испытаний у сплава 1565ч шероховатость центральной части увеличивается, уменьшаются губы среза, эта фрактургическая особенность может свидетельствовать об увеличении доли хрупкой составляющей в изломе, что и подтверждено уменьшением ударной вязкости при понижении температуры испытаний. Изменений в характере изломов остальных сплавов не произошло. На рис. 4 показан характер изломов образцов сплава 1915Т при температуре испытаний +20 и –104 °С.

По ударной вязкости локальный обобщенный критерий Y_3 равен $k_{3jt} \cdot C$. Максимальная величина $k_{3jt} \cdot C$ (оптимум для данной группы характеристик) соответствует сплаву 1915Т при всех температурах испытаний.

3.4. Характеристики трещиностойкости

Характеристики трещиностойкости определялись в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506¹¹: условный коэффициент интенсивности напряжений K_C^* — это значение коэффициента интенсивности напряжений для максимального значения нагрузки и исходной длины трещины l , K_Q — временное значение вязкости разрушения при плоской деформации, J_c — критический J -интеграл, δ_c — раскрытие в вершине трещины при максимальной нагрузке.

С целью определения весовых коэффициентов значимости каждой из характеристик трещиностойкости алюминиевых сплавов для ВЦР в арктических условиях был проведен экспертный опрос. Коэффициент конкордации опроса W составил 0,58, уровень значимости (вероятность ошибки первого рода), определенный по Пирсону, составил 0,02. Весовые коэффициенты β_i , полученные в результате статистической обработки: коэффициент интенсивности напряжений для максимального значения нагрузки и исходной длины трещины $\beta_1 = 0,4$; временное значение вязкости разрушения при плоской деформации $\beta_2 = 0,3$; критический J -интеграл $\beta_3 = 0,1$; раскрытие в вершине трещины при максимальной нагрузке $\beta_4 = 0,2$.

С учетом весовых коэффициентов были рассчитаны значения локального обобщенного критерия $Y_{4t} \cdot C$ для характеристик рассматриваемой группы:

$$Y_{4t} \cdot C = \sum_{i=1}^3 k_{4ijt} \cdot C \beta_i - \beta_4 k_{44jt} \cdot C, \quad (3)$$

где $k_{4ijt} \cdot C$ — нормированное кодированное значение характеристики (i) для сплава (j) при температуре испытаний (t , °С) из табл. 5. Данные сведены в табл. 6, 7.

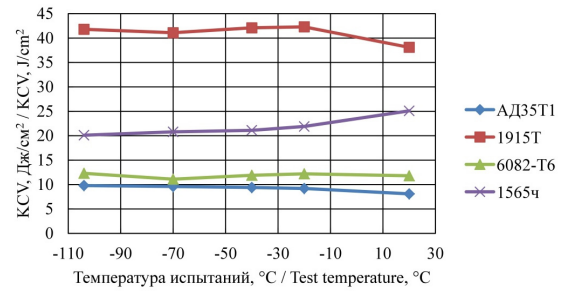


Рис. 3. Экспериментальные значения KCV сплавов при различных температурах испытаний
Источник: выполнено В.А. Ермаковым.

Figure 3. Experimental KCV values of alloys at different test temperatures
Source: made by V.A. Ermakov.

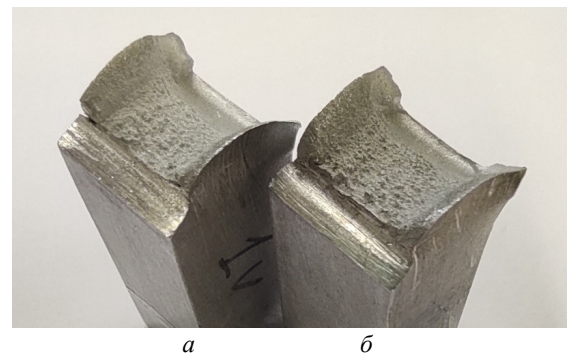


Рис. 4. Излом образца сплава 1915Т:
а — при температуре испытаний +20 °С;
б — при температуре испытаний –104 °С

Источники: выполнено О.А. Корневым

Figure 4. Fracture of the 1915T alloy sample:
a — at a test temperature of +20 °С;
b — at a test temperature of –104 °С
Source: made by O.A. Kornev.

¹¹ ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

Таблица 6. Характеристики трещиностойкости
Table 6. Crack resistance characteristics

$t, ^\circ\text{C}$	Характеристика трещиностойкости i / Crack resistance characteristics i	Натуральные значения / Natural values				Нормированные кодированные значения $k_{Aijt^{\circ\text{C}}}$ / Normalized coded values $k_{Aijt^{\circ\text{C}}}$			
		Марка сплава / Alloy grade j							
		АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082Т6	1565ч / 1565ch	АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
+20	K_{C^*} , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	42,0	43,0	44,1	52,0	-1	-0,8	-0,58	1
	K_Q , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	29,5	34,0	32,0	37,0	-1	0,2	-0,33	1
	J_c , МДж/м ² / MJ/m ²	0,044	0,075	0,041	0,096	-0,89	0,24	-1	1
	δ_c , мм / mm	0,138	0,279	0,136	0,289	-0,97	0,87	-1	1
-20	K_{C^*} , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	40,5	41,0	43,9	48,0	-1	-0,87	-0,09	1
	K_Q , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	31,0	35,0	31,3	38,5	-1	0,07	-0,92	1
	J_c , МДж/м ² / MJ/m ²	0,048	0,079	0,044	0,083	-0,79	0,79	-1	1
	δ_c , мм / mm	0,137	0,285	0,13	0,25	-0,91	1	-1	0,55
-40	K_{C^*} , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	45,0	43,0	46,9	48,0	-0,2	-1	0,56	1
	K_Q , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	30	35	29,6	37,5	-0,9	0,37	-1	1
	J_c , МДж/м ² / MJ/m ²	0,046	0,083	0,043	0,08	-0,2	0,24	-0,24	0,2
	δ_c , мм / mm	0,146	0,291	0,14	0,24	-0,92	1	-1	0,32
-70	K_{C^*} , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	43	43	44,4	51	-1	-1	-0,65	1
	K_Q , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	30,5	33,5	30,9	29,0	-0,33	1	-0,16	-1
	J_c , МДж/м ² / MJ/m ²	0,051	0,074	0,045	0,067	-0,59	1	-1	0,52
	δ_c , мм / mm	0,136	0,261	0,13	0,204	-0,23	0,25	-0,25	0,03
-104	K_{C^*} , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	42,0	44,0	43,5	51,0	-1	-0,56	-0,67	1
	K_Q , МПа·м ^{1/2} / МПа·м ^{1/2}	29,0	33,5	30,7	34,0	-1	0,8	-0,32	1
	J_c , МДж/м ² / MJ/m ²	0,053	0,061	0,047	0,049	-0,14	1	-1	-0,71
	δ_c , мм / mm	0,135	0,215	0,14	0,161	-1	1	-0,88	-0,35

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

Таблица 7. Локальный обобщенный критерий $Y_{4t^{\circ\text{C}}}$ для характеристик трещиностойкости по (3)

Table 7. Local generalized criterion $Y_{4t^{\circ\text{C}}}$ for crack resistance characteristics according to (3)

$t, ^\circ\text{C}$	АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
+20	-0,595	-0,41	-0,231	0,60
-20	-0,597	-0,448	-0,212	0,69
-40	-0,186	-0,465	0,1	0,656
-70	-0,512	-0,05	-0,358	0,146
-104	-0,514	-0,084	-0,288	0,699

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

Очевидно, что оптимальные характеристики по локальному критерию $Y_{4t^{\circ\text{C}}}$ показал сплав 1915Т.

3.5. Усталостные характеристики

Предел выносливости определялся согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 25.502¹². Частота нагружения 10 Гц, циклы пульсирующие (коэффициент асимметрии цикла 0) (табл. 8). Разрушенные в результате испытаний на усталость образцы показаны на рис. 5. У излома сплава 1915Т больше зона, включающая в себя очаг разрушения и стабильного роста трещины до начала долома, по сравнению с остальными исследуемыми сплавами.

Таблица 8. Предел выносливости сплавов при пульсирующем нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ циклов
Table 8. Fatigue limit of alloys under fluctuating loading based on $2 \cdot 10^6$ cycles

t, °C	Натуральные значения, МПа / Natural values, MPa i				Нормированные кодированные значения k_{5ijt}^C / Normalized coded values k_{5ijt}^C			
	Марка сплава / Alloy grade j							
	АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082Т6	1565ч / 1565ch	АД35Т1 / AD35Т1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
+20	70	110	105	80	-1	1	0,75	-0,50
-20	72	112	110	82	-1	1	0,90	-0,50
-40	76	116	116	86	-1	1	1	-0,50
-70	82	120	122	89	-1	0,90	1	-0,65
-104	89	124	129	92	-1	0,75	1	-0,85

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

По пределу выносливости локальный обобщенный критерий Y_5 равен k_{5ijt}^C . Очевидно, что максимальная величина k_{5ijt}^C (оптимум для данной группы характеристик) соответствует сплаву 1915Т при всех температурах испытаний.

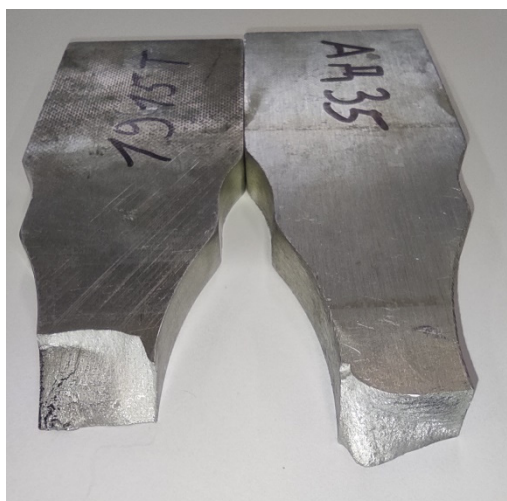


Рис. 5. Разрушенные в результате испытаний на усталость образцы
Источники: выполнено О.А. Корневым.

Figure 5. Samples destroyed as a result of fatigue tests
Source: made by O.A. Kornev.

¹² ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Москва, 1985. 50 с.

3.6. Характеристики коррозионной стойкости

Собственные испытания сплавов на коррозионную стойкость не проводились. Данные, полученные от производителей алюминиевых сплавов для температуры эксплуатации +20 °С, сведены в табл. 9.

Таблица 9. Характеристики коррозионной стойкости сплавов
Table 9. Corrosion resistance characteristics of alloys

Вид коррозии / Type of corrosion	Натуральные значения i / Natural values i				Нормированные кодированные значения k_{6icj} / Normalized coded values k_{6icj}			
	Марка сплава j / Alloy grade j							
	АД35Т1 / AD35T1	1915Т	6082Т6	1565ч / 1565ch	АД35Т1 / AD35T1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
МКК, мм / IGC, mm	0	0	0,1	0,08	-1	-1	1	0,6
РСК, балл / LC, points	1	3	1	2	-1	1	-1	0

Примечание: МКК — межкристаллитная коррозия (мм/год), РСК — расслаивающаяся коррозия (балл).
Чем меньше балл, тем более коррозионностойкий сплав, 1 — отсутствие коррозионных повреждений.

Note: IGC — intergranular corrosion (mm/year), LC — layer corrosion (points).
Lower point score indicates greater corrosion resistance of the alloy, 1 — no corrosion damage.

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

Было принято, что оба вида коррозии равноопасны при эксплуатации ВЦР и их весовые коэффициенты равны $\gamma_{c1} = \gamma_{c2} = 0,5$. Следовательно, обобщенный локальный критерий Y_6 определяется следующим образом:

$$Y_6 = \sum_{c=1}^2 k_{6icj} \gamma_c. \quad (4)$$

Соответственно по (4) значения обобщенного локального критерия этой группы составляют: для сплава АД35Т1 — $Y_6 = -1$; для сплава 1915Т — $Y_6 = 0$; для сплава 6082-Т6 — $Y_6 = 0$; для сплава 1565ч — $Y_6 = 0,3$.

3.7. Интегральный критерий

Для формирования интегрального критерия был проведен опрос для определения весовых коэффициентов групп характеристик. Коэффициент конкордации опроса W составил 0,63, уровень значимости (вероятность ошибки первого рода), определенный по Пирсону, составил 0,01. Весовые коэффициенты (δ_i), полученные в результате статистической обработки: стоимостно-весовые характеристики $\delta_1 = 0,04$; стандартные механические характеристики $\delta_2 = 0,19$; ударная вязкость $\delta_3 = 0,14$; характеристики трещиностойкости $\delta_4 = 0,24$; усталостные характеристик $\delta_5 = 0,29$; коррозионная стойкость $\delta_6 = 0,1$.

Интегральный критерий в соответствии с вышеизложенным:

$$Y_{i^{\circ}C} = -Y_1\delta_1 + Y_{2i^{\circ}C}\delta_2 + Y_{3i^{\circ}C}\delta_3 + Y_{4i^{\circ}C}\delta_4 + Y_{5i^{\circ}C}\delta_5 - Y_6\delta_6, \quad (5)$$

Или с учетом локальных обобщенных критериев:

$$Y_{i^{\circ}C} = -k_{1j}\delta_1 + \left(\sum_{i=1}^5 k_{2ijr^{\circ}C} \alpha_i \right) \delta_2 + k_{3ijr^{\circ}C} \delta_3 + \left(\sum_{i=1}^3 k_{4ijr^{\circ}C} \beta_i - \beta_4 k_{44jr^{\circ}C} \right) \delta_4 + k_{5ijr^{\circ}C} \delta_5 - \left(\sum_{c=1}^2 k_{6icj} \gamma_c \right) \delta_6. \quad (6)$$

Минус в выражении (6) стоит перед слагаемым, соответствующим тем группам характеристик, у которых оптимальными являются минимальные значения. Приняв интегральный критерий как целевую функцию оптимизации, можно утверждать, что оптимальным будет сплав, удовлетворяющий условию

$$Y_{t^{\circ}C} \rightarrow \max. \quad (7)$$

Результаты определения интегрального критерия сведены в табл. 10.

Таблица 10. Значения интегрального критерия $Y_{t^{\circ}C}$ при различных температурах испытаний
Table 10. Values of the integral criterion $Y_{t^{\circ}C}$ at different test temperatures

$t, ^{\circ}C$	АД35Т1 / AD35T1	1915Т	6082-Т6	1565ч / 1565ch
+20	-0,46	0,22	0,15	0,03
-20	-0,41	0,21	0,16	-0,03
-40	-0,35	0,19	0,25	-0,07
-70	-0,42	0,29	0,13	-0,22
-104	-0,42	0,28	0,15	-0,10

Источники: выполнено О.А. Корневым / Source: made by O.A. Kornev.

Максимальная величина интегрального критерия при всех температурах эксплуатации, кроме $-40^{\circ}C$, соответствует сплаву 1915Т, при температуре $-40^{\circ}C$ максимальное значение интегрального критерия у сплава 6082-Т6.

В работе впервые предложен оригинальный подход к выбору алюминиевых сплавов для строительства ВЦР в условиях Крайнего Севера и приближенных к ним регионов. Предложенный подход позволил сформулировать интегральный критерий, принятый в качестве целевой функции оптимизации свойств сплавов. В процессе работы были проведены экспертные опросы, позволившие выявить весовые коэффициенты характеристик сплавов, которые вошли в окончательную формулировку критерия. Альтернативами предлагаемого подхода к решению задачи мог бы быть метод TOPSIS, который сводится к измерению сходства с идеальным решением. В рассматриваемой инженерной задаче не предусмотрено идеального решения, выбор осуществляется из имеющегося набора экспериментально определенных характеристик. Другой альтернативой мог бы быть метод АНР, который предусматривает сравнение альтернатив по шкале Саати, но он в задачах такого типа дает грубую оценку функции полезности. Применение нечетких методов вносит субъективную составляющую в решение. Другие методы многокритериальной оптимизации, например метод Парето, адекватно работают при наличии конкурирующих альтернатив. В поставленной задаче такого однозначного разделения нет. Применение функции желательности Харрингтона основано на произвольной калибровке шкал откликов, что не позволяет получить точного решения в переходных областях. Поэтому авторы считают, что реализованный в данной работе подход дает наиболее адекватные результаты при поиске оптимального решения и, более того, подобный подход можно распространить на другие задачи подобного типа.

Практическая ценность проведенного исследования заключается в определении комплекса характеристик наиболее распространенных алюминиевых сплавов, которые могут быть использованы проектировщиками ВЦР, эксплуатируемых при различных отрицательных температурах.

В дальнейшем предполагается проведение экспериментальных исследований сварных швов в алюминиевых конструкциях, полученных различными технологиями сварки, и расширение номенклатуры исследуемых сплавов.

4. Заключение

Статистическая обработка проведенных в процессе исследования экспертных опросов определила весовые коэффициенты внутри каждой группы характеристик и весовые коэффициенты групп характеристик, входящих в интегральный критерий выбора алюминиевого сплава для строительства резервуаров в условиях Арктики.

Весовые коэффициенты α_i составили внутри группы стандартных механических характеристик: для предела прочности $\alpha_1 = 0,27$; предела текучести $\alpha_2 = 0,33$; относительного сужения $\alpha_3 = 0,20$; относительного удлинения $\alpha_4 = 0,13$; модуля упругости $\alpha_5 = 0,07$.

Весовые коэффициенты внутри группы характеристик трещиностойкости β_i : для коэффициента интенсивности напряжений для максимального значения нагрузки и исходной длины трещины $\beta_1 = 0,4$; временного значения вязкости разрушения при плоской деформации $\beta_2 = 0,3$; критического J -интеграла $\beta_2 = 0,1$; раскрытия в вершине трещины при максимальной нагрузке $\beta_4 = 0,2$. Весовые коэффициенты внутри группы характеристик сопротивления коррозии $\gamma_{c1} = \gamma_{c2} = 0,5$. Весовые коэффициенты δ_i групп характеристик следующие: для стоимостно-весовых характеристик $\delta_1 = 0,04$; стандартных механических характеристик $\delta_2 = 0,19$; ударной вязкости $\delta_3 = 0,14$; характеристик трещиностойкости $\delta_4 = 0,24$; усталостных характеристик $\delta_5 = 0,29$; коррозионной стойкости $\delta_6 = 0,1$. Наибольший вес, согласно экспертным опросам, имеют усталостные характеристики и характеристики трещиностойкости, что указывает на необходимость включения расчета параметров усталости и трещиностойкости в нормативные документы по проектированию ВЦР из алюминиевых сплавов. Важность усталостных характеристик и трещиностойкости алюминиевых сплавов для применения в арктических условиях должна быть учтена и при проектировании новых сплавов, и при термических обработках существующих.

1. На основании проведенных экспериментальных исследований и экспертных опросов получен интегральный критерий, который предлагается использовать как целевую функцию выбора алюминиевого сплава для строительства резервуаров в арктических условиях.

2. Из рассмотренных в исследовании сплавов наилучший интегральный показатель у сплава 1915Т, наихудший у АД35Т1, что косвенно подтверждает преимущества естественного старения алюминиевых сплавов. Лучшими стоимостно-весовыми характеристиками обладает сплав 1565ч, лучшими стандартными механическими характеристиками при температуре +20 °С обладает сплав 6082-Т6, при температурах –20 °С, –70 °С, –104 °С — сплав АД35Т1, при температуре –20 °С — сплавы 6082-Т6 и АД35Т1 показывают равное между собой, но существенно большее, чем остальные изучаемые сплавы, значение обобщенного локального критерия. Сплав 1915Т обладает существенно более высокими усталостными характеристиками и ударной вязкостью по сравнению с остальными исследованными сплавами.

Список литературы

1. *Альтман М.Б.* Применение алюминиевых сплавов. Москва : Металлургия, 1973. 408 с.
2. *Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Averyanov A.S.* Influence of Environmental Temperature on the Corrosion Resistance of Various Aluminum Alloys: an Experimental Study // RUDN Journal of Engineering Research. 2025. Vol. 26. No. 1. P. 94–106. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-94-106> EDN LACBPD
3. *Sovetbayev R., Nugman Ye., Shayakhmetov Ye., Kawalek A.* Preparation of AlMgSi1 (6082) aluminum alloy for the study of mechanical and physico-chemical properties in the rolling process // Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series. 2024. No. 147. P. 231–244. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-147-2-231-244> EDN: IVEQDU
4. *Лессиг Е.Н., Лилеев А.Ф., Соколов А.Г.* Листовые металлические конструкции. Москва : Изд-во Литературы по строительству, 1970. 244 с.
5. *Шувалов А.Н., Корнев О.А., Ермаков В.А.* Исследование физико-механических характеристик алюминиевых сплавов 1915Т, 1565ч и 6082-Т6 при низких температурах // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. № 1. С. 73–94. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.5> EDN: HACFND
6. *Горицкий В.М., Гусева И.А., Кулемин А.М.* Особенности трещинообразования в вертикальных монтажных стыках резервуара объемом 50 000 м³, изготовленного из высокопрочной стали 16Г2АФ // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 5. С. 14–16. EDN: IULFTV
7. *Kopec M., Liu X., Gorniewicz D., Modrzejewski P., Zasada D., Jóźwiak S., Janiszewski Ja., Kowalewski Z.L.* Mechanical response of 6061-T6 aluminium alloy subjected to dynamic testing at low temperature: Experiment and modeling //

International Journal of Impact Engineering. 2024. Vol. 185. Article no. 104843. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104843> EDN: SSQTOL

8. Yan J.B., Kong G., Wang Zh., Zhang L., Wang X. Compression behaviours of aluminium alloy I-column at low temperatures // Structures. 2022. Vol. 44. P. 418–435. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.009> EDN: GPKMMX

9. Chikhalikar A., Roy I., Aboueillella H., Umretiya R., Hoffman A., Larsen M., Rebak R.B. Effect of aluminum on the FeCr(Al) alloy oxidation resistance in steam environment at low temperature (400°C) and high temperature (1200°C) // Corrosion Science. 2022. Vol. 209. Article no. 110765. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110765> EDN: BICKUB

10. Fernandes R.F., Jesus J.S., Branco R., Borrego L.P., Costa J.D., Ferreira J.A.M. Effect of low-temperature stress relieving heat treatments on fatigue behaviour and failure mechanisms of L-PBF AlSi10Mg aluminium alloy // Engineering Failure Analysis. 2025. Vol. 169. Article no. 109210. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109210> EDN: OMKGIA

11. Yang H., Cui Y., Qin F., Lin T., Zheng Y. Fatigue failure analysis and life prediction of forged 6061 aluminum alloy wheel hubs based on precipitate size effects and multiaxial stress modeling // Engineering Failure Analysis. 2025. Vol. 182. Part C. Article no. 110181. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.110181>

12. Cong J., Liu Z., Zhou S., Zhu X., Gao S. Fatigue life prediction of ultrasonic impact treatment aluminum alloy weld joint based on the continuous damage model and artificial neural network // Engineering Fracture Mechanics. 2025. Vol. 327. Article no. 111503. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111503>

13. Liu Z., Li J., Zhang L. Fatigue characteristics of high-strength aluminum alloy with and without surface mechanical rolling treatment in the transition regime between high cycle and very-high cycle fatigue // Engineering Fracture Mechanics. 2025. Vol. 328. Article no. 111585. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111585>

14. Wang H., Zhang Z.J., Zhu S.Z., Li X.T., Zhu Y.K., Liu R., Hou J.P., Gong B.S., Liu H.Z., Wang D., Ma Z.Y., Zhang Z.F. Enhancing the high-cycle fatigue property of aluminum alloy by adding fine-sized hard particles // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2026. Vol. 200. Article no. 109344. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109344>

15. Song S., Wu Z., Zhao J., Zhou L., Guo S., Kan Q., Chen X., Zhang X. Crystal plasticity modeling of uniaxial tensile and fatigue failure behaviors of laser shock peened aluminum alloy // International Journal of Fatigue. 2025. Vol. 201. Article no. 109145. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.109145>

16. Konstantinov I.L., Baykovskiy Yu.V., Yuryev P.O., Bezrukikh A.I., Sidelnikov S.B., Saparova A.S., Mansurov Yu.N., Partyko E.G., Bozhko D.N. Study of deformability during the rolling of aluminum alloy 1580 doped with small additions of erbium and ytterbium // Metallurgist. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01833-z> EDN IPZBXD

17. Шаталов П.Л., Хоанг Ф.В., Куанг Ч.В. Определение механических свойств полос из алюминиевого сплава АД33 по различным показателям твердости при холодной прокатке // Технология металлов. 2021. № 9. С. 31–37. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-9-31-37> EDN XYBVMJ

18. Лукиенко М.И. Исследование прочности и технологичности листовых резервуарных конструкций из алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 1980. 199 с.: ил.

19. Купрешивили С.М. Механика разрушения вертикальных цилиндрических резервуаров // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 5. С. 40–42. EDN PLFWJH

20. Vuherer T., Kramberger J., Milčić D., Glodež S. Fatigue behaviour of friction stir welded AA-2024 aluminium alloy sheet // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 659. Article no. 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012032>

21. Wang M.Z., Kassner M.E. Tensile and fatigue properties of aluminum alloy sheet 6022 // Journal of Materials Engineering and Performance. 2002. Vol. 11. P. 166–168. <https://doi.org/10.1361/105994902770344222>

22. Kendall M.G., Gibbons J.D. Rank correlation methods. 5th ed. London: Edward Arnold, 1990. 260 p.

23. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling // Philosophical Magazine Series. 2009. Series 5. Vol. 50. Issue 302. P. 157–175. <https://doi.org/10.1080/14786440009463897>

24. Милова Ю.А., Дукарев А.В. Нормированный натуральный ряд. Полипараметрическое кодирование // European Journal of Technical and Natural Sciences. 2020. № 3. С. 19–23. <https://doi.org/10.29013/EJTNS-20-3-19-23> EDN SWBNAА

References

1. Al'tman M.B. *Application of aluminum alloys*. Moscow: Metallurgy Publ.; 1973. (In Russ.)
2. Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Averyanov A.S. Influence of Environmental Temperature on the Corrosion Resistance of Various Aluminum Alloys: an Experimental Study. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):94–106. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-94-106> EDN: LACBPD
3. Sovetbayev R., Nugman Ye., Shayakhmetov Ye., Kawalek A. Preparation of AlMgSi1 (6082) aluminum alloy for the study of mechanical and physico-chemical properties in the rolling process. *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series*. 2024;(147):231–244. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-147-2-231-244> EDN: IVEQDU

4. Lessig E.N., Lileev A.F., Sokolov A.G. *Sheet metal structures*. Moscow: Literature on Construction Publ.; 1970. (In Russ.)
5. Shuvalov A.N., Kornev O.A., Ermakov V.A. Investigation of physical and mechanical characteristics of aluminium alloys 1915T, 1565ch and 6082-T6 at low temperatures. *Construction: science and Education*. 2024;14(1):73–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.5> EDN: HACFND
6. Gorickij V.M., Guseva I.A., Kulemin A.M. Peculiarities of cracking in vertical erection joints of a tank of 50 000 m³ made of high-strength steel 16G2AF. *Industrial and Civil Engineering*. 2008;(5):14–16. (In Russ.) EDN: IULFTV
7. Kopec M., Liu X., Gorniewicz D., Modrzejewski P., Zasada D., Józwiak S., Janiszewski Ja., Kowalewski Z.L. Mechanical response of 6061-T6 aluminium alloy subjected to dynamic testing at low temperature: Experiment and modeling. *International Journal of Impact Engineering*. 2024;185:104843. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104843> EDN: SSQTOL
8. Yan J.B., Kong G., Wang Zh., Zhang L., Wang X. Compression behaviours of aluminium alloy I-column at low temperatures. *Structures*. 2022;44:418–435. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.009> EDN: GPKMMX
9. Chikhalikar A., Roy I., Abouelella H., Umretiya R., Hoffman A., Larsen M., Rebak R.B. Effect of aluminum on the FeCr(Al) alloy oxidation resistance in steam environment at low temperature (400°C) and high temperature (1200°C). *Corrosion Science*. 2022;209:110765. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110765> EDN: BICKUB
10. Fernandes R.F., Jesus J.S., Branco R., Borrego L.P., Costa J.D., Ferreira J.A.M. Effect of low-temperature stress relieving heat treatments on fatigue behaviour and failure mechanisms of L-PBF AlSi10Mg aluminium alloy. *Engineering Failure Analysis*. 2025;169:109210. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109210> EDN: OMKGIA
11. Yang H., Cui Y., Qin F., Lin T., Zheng Y. Fatigue failure analysis and life prediction of forged 6061 aluminum alloy wheel hubs based on precipitate size effects and multi-axial stress modeling. *Engineering Failure Analysis*. 2025;182:110181. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.110181>
12. Cong J., Liu Z., Zhou S., Zhu X., Gao S. Fatigue life prediction of ultrasonic impact treatment aluminum alloy weld joint based on the continuous damage model and artificial neural network. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025;327:111503. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111503>
13. Liu Z., Li J., Zhang L. Fatigue characteristics of high-strength aluminum alloy with and without surface mechanical rolling treatment in the transition regime between high cycle and very-high cycle fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025;328:111585. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111585>
14. Wang H., Zhang Z.J., Zhu S.Z., Li X.T., Zhu Y.K., Liu R., Hou J.P., Gong B.S., Liu H.Z., Wang D., Ma Z.Y., Zhang Z.F. Enhancing the high-cycle fatigue property of aluminum alloy by adding fine-sized hard particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2026;200:109344. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109344>
15. Song S., Wu Z., Zhao J., Zhou L., Guo S., Kan Q., Chen X., Zhang X. Crystal plasticity modeling of uniaxial tensile and fatigue failure behaviors of laser shock peened aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*. 2025;201:109145. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.109145>
16. Konstantinov I.L., Baykovskiy Yu.V., Yuryev P.O., Bezrukikh A.I., Sidelnikov S.B., Saparova A.S., Mansurov Yu.N., Partyko E.G., Bozhko D.N. Study of deformability during the rolling of aluminum alloy 1580 doped with small additions of erbium and ytterbium. *Metallurgist*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01833-z> EDN IPZBXD
17. Shatalov R.L., Hoang F.V., Kuang Ch.V. Determination of mechanical properties of aluminum alloy strips AD33 according to various hardness parameters during cold rolling. *Metal technology*. 2021;(9):31–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-9-31-37> EDN: XYBVMJ
18. Lukienko M.I. *Investigation of the strength and manufacturability of aluminum alloy sheet tank structures: [dissertation]*. Moscow, 1980. (In Russ.)
19. Kupreishvili S.M. Mechanics of destruction of vertical cylindrical tanks. *Industrial and civil engineering*. 2004;(5):40–42. (In Russ.) EDN: PLFWJH
20. Vuherer T., Kramberger J., Milčić D., Glodež S. Fatigue behaviour of friction stir welded AA-2024 aluminium alloy sheet. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;659:012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012032>
21. Wang M.Z., Kassner M.E. Tensile and fatigue properties of aluminum alloy sheet 6022. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2002;11:166–168. <https://doi.org/10.1361/105994902770344222>
22. Kendall M.G., Gibbons J.D. *Rank correlation methods*. 5th ed. London: Edward Arnold Publ.; 1990.
23. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical Magazine Series*. 2009;5(50):157–175. <https://doi.org/10.1080/14786440009463897>
24. Milova Yu.A., Dikarev A.V. Rationed natural row. Polyparametric coding. *European Journal of Technical and Natural Sciences*. 2020;(3):19–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.29013/EJTNS-20-3-19-23> EDN: SWBNA