НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 691.771
DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.5

Исследование физико-механических характеристик алюминиевых сплавов 1915Т, 1565ч и 6082-Т6 при низких температурах

Александр Николаевич Шувалов, Олег Александрович Корнев, Валентин Алексеевич Ермаков
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Алюминиевые сплавы характеризуются отсутствием порога хладноломкости, обладают высокими параметрами прочности и пластичности при низких температурах. Однако нормами не предусмотрено проектирование алюминиевых конструкций, воспринимающих циклические силовые воздействия при пониженных температурах. В связи с этим возникает необходимость изучения свойств и механизмов деформации и разрушения алюминиевых сплавов для оценки возможности их применения в условиях Крайнего Севера, а также для внутренних оболочек изотермических резервуаров.

Материалы и методы. Исследованы механические свойства конструкционных алюминиевых сплавов из серии отечественных 1915, 1565ч и зарубежных разработок 6082 (аналог АД35). Испытаны образцы на одноосное растяжение, ударную вязкость, усталостную прочность, определены характеристики статической трещиностойкости. Испытания проведены с использованием машин Instron 8802, Instron 1000HDX, LabTex, маятникового копра Instron 450MPX по соответствующим ГОСТам России.

Результаты. Получены экспериментальные зависимости прочностных и упругих (предела прочности, условного предела текучести, модуля упругости), а также деформативных характеристик (относительного удлинения и сужения площади поперечного сечения образцов) исследованных сплавов от температуры испытаний. Показано изменение характера деформирования алюминиевых сплавов при понижении температуры. Приведены результаты сопротивления деформации и разрушению в условиях ударного изгиба и внецентренного растяжения в интервале температур от –104 до +20 °С. Оценена вязкость разрушения (трещиностойкость) по критериям механики разрушения при испытании стандартных образцов с усталостными трещинами. Представлены ограниченные пределы выносливости на базе $2 \cdot 10^6$, 10^7 циклов исследованных сплавов при положительных и отрицательных температурах.

Выводы. Полученные результаты позволяют обоснованно осуществлять выбор материалов, назначать нагрузки при проектировании конструкций из алюминиевых сплавов и оценивать их срок службы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алюминиевые сплавы, испытания, пониженные температуры, прочность, деформативность, трещиностойкость, усталость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *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. Вып. 1. Ст. 5. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.5

Автор, ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Ермаков, Ermakov@mgsu.ru.

Investigation of physical and mechanical characteristics of aluminium alloys 1915T, 1565ch and 6082-T6 at low temperatures

Aleksandr N. Shuvalov, Oleg A. Kornev, Valentin A. Ermakov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Aluminium alloys are characterized by the absence of a cold fracture threshold, have high strength and ductility characteristics at low temperatures. However, the norms do not provide the design of aluminium structures that take cyclic force effects at low temperatures. In this regard, there is a need to study the properties and mechanisms of deformation and destruction of aluminium alloys to assess the possibility of their use in the Far North, as well as well as for the inner shells of isothermal reservoirs.

Materials and methods. The mechanical properties of structural aluminium alloys 1915, 1565ch and 6082 (similar to AD35) were studied. The specimens were tested for uniaxial tensile strength, impact toughness and fatigue strength, and the char-

© А.Н. Шувалов, О.А. Корнев, В.А. Ермаков, 2024
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

acteristics of static crack resistance were determined. The tests were carried out using Instron 8802, Instron 1000HDX, LabTex machines and Instron 450 MPX pendulum coper according to the relevant GOST standards of Russia.
Results. Experimental dependences of strength and elastic characteristics (tensile strength, offset yield strength, modulus of elasticity), as well as deformative ones (relative elongation and contraction of the cross-sectional area of specimens) of the studied alloys on the test temperature are obtained. The change of character of deformation of aluminium alloys with decrease in temperature is shown. The results of deformation and fracture resistance under conditions of impact bending and eccentric tension in the temperature range from –104...+20 °C are presented. Fracture toughness (crack resistance) was estimated according to the criteria of fracture mechanics when testing standard specimens with fatigue cracks. The paper also shows the limited limits of endurance based on $2 \cdot 10^6$, 10^7 cycles of the studied alloys at positive and negative temperatures.
Conclusions. The obtained results make it possible to reasonably select materials, assign loads when designing structures made of aluminium alloys and evaluate their service life.

KEYWORDS: aluminium alloys, tests, low temperatures, strength, deformability, crack resistance, fatigue

FOR CITATION: Shuvalov A.N., Kornev O.A., Ermakov V.A. Investigation on physical and mechanical characteristics of aluminum alloys 1915T, 1565ch and 6082-T6 at low temperatures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(1):5. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.5

Corresponding author: Valentin A. Ermakov, Ermakov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рациональный выбор материалов, конструктивное оформление и технология изготовления изделия, а также ограничение допустимых размеров исходных дефектов и защита от коррозии позволяют исключить возможность хрупкого разрушения, развития значительных пластических деформаций, рост трещин до критических размеров в течение расчетного срока службы конструкций [1, 2].

Алюминиевые сплавы по сравнению со сталью обладают малым весом, более высоким соотношением прочности и веса, высокой коррозионной стойкостью и хорошей формуемостью.

Использование алюминиевых сплавов в строительстве регламентируется сводом правил[1]. Нормативный документ содержит рекомендации по выбору марок упрочняемых и не упрочняемых термообработкой свариваемых сплавов с расчетным сопротивлением от 25 до 195 МПа.

Характеристики конструкционной прочности по СП ограничены результатами испытаний на растяжение с определением σ_B, $\sigma_{0,2}$, δ при 20 °С. При этом наибольшее расчетное сопротивление имеет термически упрочняемый сплав марки 1915 (системы Al-Zn-Mg). Данный сплав в конструкциях используется в закаленном и естественном или искусственном старении. Более высокие и стабильные свойства достигаются при искусственном старении, применяются в конструкциях, совмещающих несущие и ограждающие функции, в том числе при строительстве резервуаров.

Из термически упрочняемых сплавов системы Al-Mg-Si с эксплуатационными свойствами, отвечающими требованиям проектировщиков, наиболее экономичными и, как следствие, наиболее применимыми в строительных конструкциях являются марки АД31, АД33 с расчетным сопротивлением от 55 до 160 МПа, а также АВМ и АВТ1 с расчетной прочностью 70 и 170 МПа в зависимости от состояния поставки. Однако по данным работ[2] [3] максимальным значением прочности, равным σ_B = 340 МПа, в указанной серии обладает сплав марки 6082 (аналог в России — алюминиевый сплав АД35), который включен в ГОСТ[3], но отсутствует в СП[1] на текущий момент. Сплавы применяются для средненагруженных конструкций, отличаются хорошей коррозионной стойкостью и свариваемостью.

Уровень расчетного сопротивления термически не упрочняемых алюминиево-магниевых сплавов, рекомендуемых СП, не превышает 140 МПа.

Варианты замены традиционных сплавов на новые приводятся в публикации [3].

В последние годы российскими учеными разработан алюминиевый сплав 1565ч системы Al-Mg [4] прочностью не менее σ_B = 335 МПа по ГОСТ[4]. Сплав обладает высокой коррозионной стойкостью и хорошо сваривается. Сплав, как конструкционный материал, нашел применение в судостроении, вагоностроении и автомобилестроении. Исследование характеристик этого сплава и его сварных соединений широко представлено в отечественной литературе [5–8]. Сплав включен в ГОСТ[3], но отсутствует в СП[1].

Эффективность использования алюминиевых сплавов в резервуаростроении представлена в работе [9]. Сравнение технико-экономических показателей резервуаров из стали и алюминиевого сплава АМг6м с одинаковыми геометрическими характеристиками показало преимущество конструкций из алюминиевого сплава в уменьшении удельной металлоемкости (в среднем на 32 %), стоимости транспортировки (на 8 %), а также снижении экс-

[1] СП 128.13330.2016. Алюминиевые конструкции.

[2] DIN EN 573-3–2009. Алюминий и алюминиевые сплавы. Химический состав и форма деформированных изделий. Часть 3. Химический состав и форма изделий.

[3] ГОСТ 4784–2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.

[4] ГОСТ 21631–2019. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.

плуатационных расходов на противокоррозионную защиту и сокращение числа ремонтов.

Алюминиевые сплавы, характеризующиеся отсутствием порога хладноломкости, обладающие высокими характеристиками прочности и пластичности при низких температурах, могут стать эффективным материалом при возведении объектов в условиях Крайнего Севера [10], в том числе листовых конструкций: бункеров, силосов, внутренних оболочек изотермических резервуаров.

Влияние низких температур на прочность алюминиевых сплавов в СП учитывается коэффициентом изменения температуры γ_t. Значение этого коэффициента в диапазоне температур от –65 до +50 °С $\gamma_t = 1$, при температурах ниже –65 °С для системы Al-Mg и Al-Zn-Mg — $\gamma_t = 1{,}05$; для системы Al-Mg-Si — $\gamma_t = 1{,}1$, что в ряде случаев не отражает действительного увеличения прочности сплавов [11].

В СП также приводятся значения модуля упругости при отрицательных температурах: для всех сплавов при t = –70 °С — $E = 0{,}735 \cdot 10^5$ МПа; при изменении температур от –40 до 50 °С значение модуля упругости принято $E = 0{,}7 \cdot 10^5$ МПа.

Изменение параметров, характеризующих пластические свойства сплавов (относительное удлинение при растяжении δ, относительное сужение площади поперечного сечения при разрыве ψ) при отрицательных температурах, в СП не представлено. Нормами также не предусмотрено проектирование алюминиевых конструкций, воспринимающих циклические силовые воздействия, которые испытывают оболочки листовых конструкций.

Сегодня значительно увеличилась номенклатура и расширилась область применения алюминиевых сплавов. В связи с этим возникает необходимость всестороннего исследования работы алюминиевых сплавов с изучением свойств и механизмов деформации и разрушения при отрицательных температурах для оценки возможности их применения в листовых конструкциях в условиях Крайнего Севера, а также для внутренних оболочек изотермических резервуаров.

Для данного исследования с учетом рекомендации СП, имеющегося зарубежного и отечественного опыта были выбраны деформируемые сплавы:

- 1915Т — сплав системы Al-Zn-Mg после закалки и естественного старения;
- 6082-Т6 — сплав системы Al-Mg-Si, искусственно состаренный на максимальную прочность;
- 1565ч — сплав системы Al-Mg, упрочняемый в процессе наклепа, термонеупрочняемый.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящем исследовании температуры испытаний приняты в диапазоне от –104 до +20 °С, что обосновано температурой хранения и использования широкого спектра газов (бутан, аммиак, пропан, пропилен, ацетилен, этан, этилен и др.).

Химический состав исследованных промышленных сплавов на основе алюминия в состоянии поставки представлен в табл. 1.

Испытание образцов на одноосное растяжение проводилось в соответствии с ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение», с использованием испытательных машин Instron 8802, Instron 1000HDX, LabTex. Запись диаграмм деформирования осуществлялась с помощью экстензометра базой 20 мм и тензорезисторов базой 5 мм в координатах σ – ε. Нагружение образцов при отрицательных температурах (–20, –40, –70, –104 °С) выполнялось в термокамере. В работе испытывались образцы в форме двухсторонних лопаток с рабочей частью размерами 200 × 30/10/11 мм и цилиндрические образцы диаметром 6 мм.

Характеристики статической трещиностойкости сплавов определялись при испытании компактных образцов размерами 80 × 80 × 10/11 мм с краевой трещиной на внецентренное растяжение в соответствии с требованиями ГОСТ[5] при температурах +20, –40, –70, –104 °С.

Испытания на ударную вязкость выполнялись на образцах с V-образным и U-образным надрезами при температурах +20, –20, –40, –60, –104 °С на маятниковом копре Instron 450 MPX с регистрацией работы удара, Дж, и расчетом величины ударной вязкости по ГОСТ[6].

[5] ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

[6] ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

Табл. 1. Химический состав испытанных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Процентное содержание компонентов								
	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Cr	Ti	Fe, примесь	Другие
1915Т ГОСТ 4784	<0,35	1–1,8	0,2–0,7	<0,1	4–5	0,08–0,2	0,01–0,06	<0,4	0,06–0,2
1565ч ТУ 1-3210–2013	0,2	5,1–6,2	0,4–1,2	0,01–0,2	0,45–1,2	0,25	–	0,3	–
6082-Т6 DIN EN 573-3:2009	0,7–1,3	0,6–1,2	0,4–1,0	<0,1	<0,2	<0,2	0,053	<0,5	<0,06

Испытания на усталостную прочность проводились в соответствии с ГОСТ[7] на сериях корсетных образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний образцов исследуемых материалов на одноосное растяжение при положительной и отрицательных температурах с постоянной скоростью нагружения («жесткий режим») приведены в табл. 2.

Диаграммы деформирования при комнатной температуре в координатах σ – ε представлены на рис. 1–3. Для всех систем легирования характерно отсутствие ярко выраженной «шейки» при разрушении, а величина относительного сужения площади поперечного сечения ψ мала по сравнению со сталью. Разрушение образцов происходило по линиям сдвига, ориентированным под углом ≈40° к плоскости прокатки [12].

Установлено, что образцы сплава 6082-Т6 деформировались монотонно (рис. 1), а на экспериментальных кривых сплавов 1915Т и 1565ч наблюдались сбросы нагрузки («зубцы/скачки»). Скачкообразность кривой проявлялась после 3 %-ной деформации образцов 1915Т и практически сразу после нагружения выше $\sigma_{0,2}$ для сплава 1565ч, и отличалась низкочастотным (рис. 2) и высокочастотным (рис. 3) прерывистым течением. В литературе [13–15] по-

[7] ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

Табл. 2. Характеристики прочности и пластичности исследуемых алюминиевых сплавов

Исследуемый сплав	Температура испытаний, °С	Характеристики материала				
		σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	*E*, МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение ψ, %
1915Т Al-Zn-Mg	+20	360	255	71 000	10,9	28,0
	–20	365	265	73 000	11,2	27,6
	–40	370	270	73 500	12,0	27,5
	–70	395	275	75 000	13,0	26,5
	–104	415	280	78 000	13,5	26,0
6082-Т6 Al-Mg-Si	+20	330	315	72 000	13,0	23,0
	–20	345	332	74 000	14,0	23,0
	–40	350	335	74 500	14,8	22,0
	–70	375	350	77 000	15,5	21,5
	–104	400	360	78 500	16,0	21,0
1565ч Al-Mg	+20	390	285	71 000	12,0	15,0
	–20	390	285	71 000	12,5	16,0
	–40	400	290	71 500	13,0	17,5
	–70	405	290	74 000	14,5	19,0
	–104	420	295	77 000	16,5	20,0

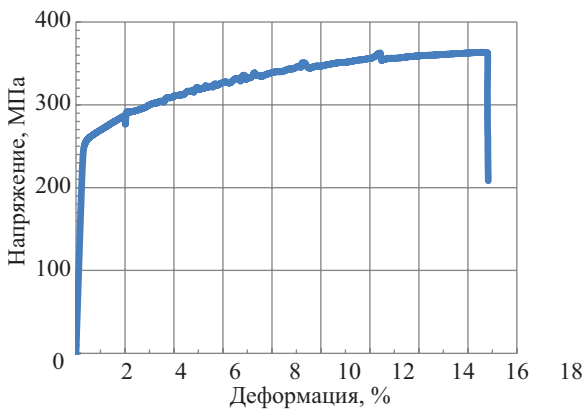

Рис. 1. Диаграмма деформирования сплава 1915Т при +20 °С

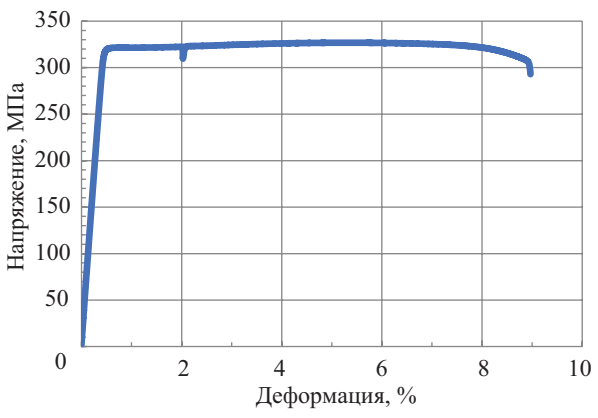

Рис. 2. Диаграмма деформирования сплава 6082-Т6 при +20 °С

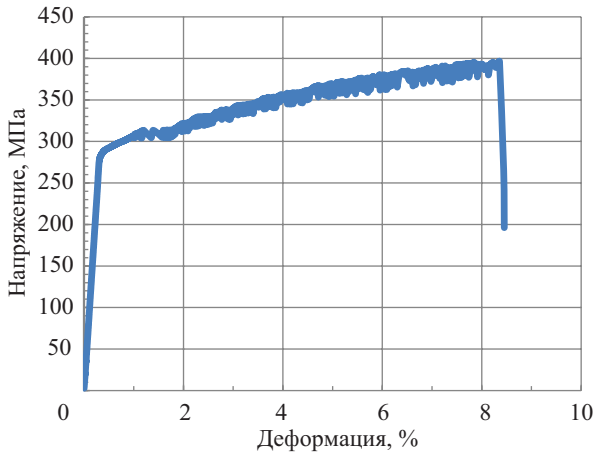

Рис. 3. Диаграмма деформирования сплава 1565ч при +20 °С

добные скачки на диаграммах деформирования связаны с эффектом Портевена – Ле Шателье (ПЛШ) (The Portevin – Le Chatelier (PLC) effect), который проявляется при «жестком режиме» нагружения. Появление указанного эффекта зависит от состава и структуры материала [16, 17].

Потеря устойчивого деформационного поведения сплава связывается с устранением скопления растворенных элементов и частиц вторичных фаз в алюминиевых сплавах. При исследовании сплавов системы Al-Mg (АМг6, АМг3) [18] установлено, что для сплава АМг3, содержащего 0,48 % Si, записывалась гладкая кривая, а при снижении содержания кремния в сплаве до 0,05 % — скачкообразная диаграмма. Монотонная кривая нагружения была получена для холоднокатаного листа сплава АМг6, а после отжига этого сплава при температуре 450 °С — ступенчатая кривая. Варьирование режима отжига сплава АМг6 приводило к растворению β(Al_3Mg_2) фазы и вызывало переход от гладкой к ступенчатой кривой деформации. В сплавах, склонных к скачкообразной деформации, наблюдаются эрозионные повреждения и снижение коррозионной стойкости сплавов [19, 20].

Следует отметить, что при снижении температуры испытаний скачки напряжений на диаграмме деформирования сплава 1915Т не проявлялись уже при температуре –40 °С (рис. 4). Для сплава 1565ч также наблюдается значительное снижение амплитуды и частоты скачков при –40 °С и их практически полное исчезновение при –104 °С (рис. 5), что согласуется с экспериментальными результатами, представленными в источниках [6, 21].

По результатам испытаний на одноосное растяжение до разрушения был определен комплекс характеристик прочности и пластичности ($\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, E, δ, ψ) сплавов марок 1915Т, 6082-Т6, 1565ч при различных температурах испытаний.

На рис. 6 представлены зависимости предела прочности и условного предела текучести исследованных сплавов от температуры испытаний. Приведенные результаты показывают увеличение прочности исследованных сплавов с понижением температуры, при этом наиболее интенсивное увеличение прочности наблюдается при изменении температур от –40 до –104 °С.

Увеличение предела прочности при температуре –104 °С по сравнению с комнатной температурой составило для сплава 6082-Т6 21,2 %; сплава 1915Т — 15,2 %, сплава 1565ч — 7,7 % [22].

Аналогичное изменение характерно и для условного предела текучести. При этом увеличение $\sigma_{0,2}$

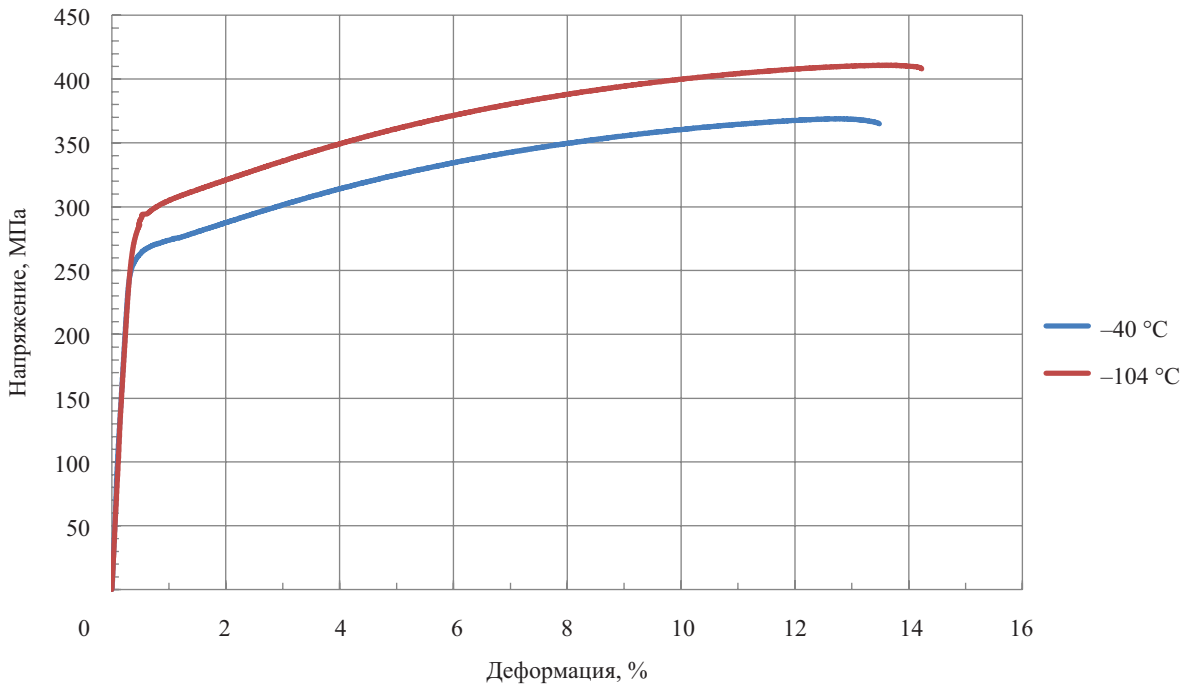

Рис. 4. Диаграммы деформирования сплава 1915Т при температурах испытаний –40 и –104 °С

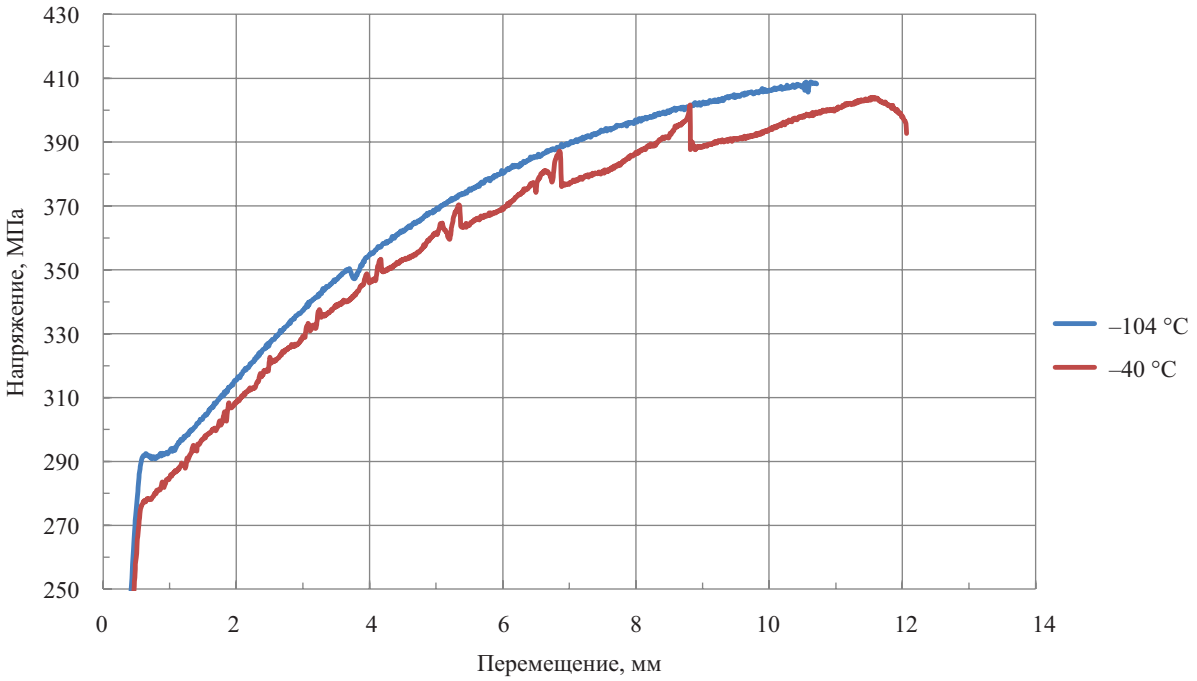

Рис. 5. Диаграммы деформирования сплава 1565ч при температурах испытаний –40 и –104 °С

реализуется на меньшую величину, чем возрастание σ_B. При температуре –104 °С увеличение $\sigma_{0,2}$ составило для сплава 6082-Т6 — 14,3 %; сплава 1915Т — 9,8 %; сплава 1565ч — 3,5 %, т.е. разница между σ_B и $\sigma_{0,2}$ с понижением температуры возрастает.

Значения модуля упругости исследованных сплавов и его изменения в зависимости от температуры испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 7.

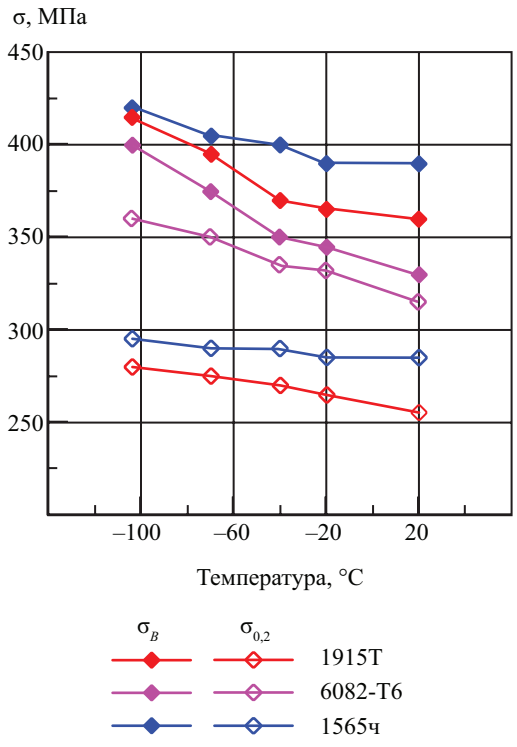

Рис. 6. Изменение предела прочности и условного предела текучести исследованных сплавов от температуры испытаний

Наблюдается повышение модуля упругости у всех исследованных сплавов с понижением температуры. Наибольшее увеличение модуля упругости при температуре –104 °С, составляющее 9,9 %, отмечается у сплава 1915Т; у сплава 6082-Т6 увеличение модуля упругости составило 9,0 %, а у сплава 1565ч — 8,4 %. В диапазоне температур от –20 до –40 °С отмечалось минимальное увеличение модуля упругости у исследованных сплавов.

Увеличение предела прочности σ_B и модуля упругости E вызвано снижением температуры, которое приводит к уменьшению межатомных расстоя-

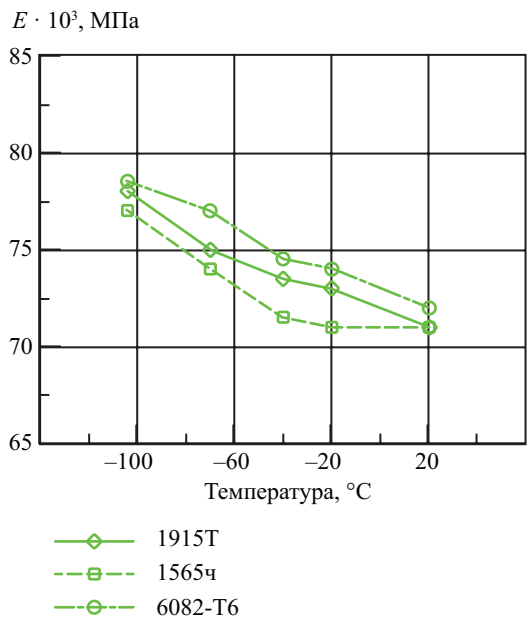

Рис. 7. Изменение модуля упругости алюминиевых сплавов в зависимости от температуры испытаний

ний и увеличению сил притяжения между атомами. Для стали также с понижением температуры характерно увеличение $\sigma_{0,2}$, σ_B и E, но вместе с тем наблюдается снижение пластичности и вязкости [23].

Параметры, характеризующие пластические свойства исследуемых алюминиевых сплавов: относительное удлинение δ, %, и относительное сужение площади поперечного сечения ψ, %, испытанных образцов приведены в табл. 2, характер их изменения от температуры испытаний — на рис. 8. Следует отметить плавное увеличение равномерного относительного удлинения образцов исследованных сплавов с понижением температуры от +20 до –104 °С. Минимальное увеличение δ на 20,0 % получено для сплава 6082-Т6. Для сплавов 1915Т и 1565ч увеличение относительного удлинения составило 23,8 и 37,5 % соответственно. Относительное сужение площади поперечного сечения образцов сплавов 1915Т и 6082-Т6 с изменением температуры изменялось незначительно — уменьшалось в пределах 7,6–9,5 %. Для сплава 1565ч увеличение относительного сужения зафиксировано на уровне 33,3 %.

По результатам испытаний образцов с надрезом была сопоставлена работоспособность исследуемых сплавов в условиях динамического нагружения ударным изгибом. На рис. 9 приведены экспериментальные зависимости ударной вязкости KCV и KCU, Дж/см^2, алюминиевых сплавов от температуры испытания (–104, –60, –40, 0 и +20 °С). Более высокие значения вязкости получены на образцах с U-образным надрезом, при самой низкой температуре KCU составило 48,5 и 30,0 Дж/см^2 для сплавов 1915Т и 1565ч соответственно.

Из полученных температурных зависимостей следует, что ударная вязкость всех алюминиевых сплавов в исследуемом интервале температур сохраняется практически постоянной (с незначительным снижением у сплава 1565ч), что характерно для сплавов с ГЦК решеткой [24–26]. Образцы из сплава марки 6082-Т6 уступают по ударной вязкости KCV сплаву 1915Т в 4 раза, а сплаву 1565ч почти в 2 раза. При увеличении в образцах радиуса надреза вязкость (KCU) сплава 1565ч возрастает на большую величину, чем у сплавов 1915Т и 6082-Т6, что свидетельствует о большей величине работы, затрачиваемой на зарождение трещины у сплава 1565ч по сравнению с другими.

Кроме ударной вязкости (KCU, KCV) определялось сопротивление разрушению алюминиевых сплавов по критериям механики разрушения, полученным при испытании стандартных образцов с усталостными трещинами [21, 27–29].

Вязкость разрушения (трещиностойкость) оценивалась по ГОСТ[4] с использованием критериев механики разрушения на образцах III типа с трещиной в интервале температур –104...+20 °С. Определялись силовые критерии разрушения — критические коэффициенты интенсивности напряжений K_Q, K_C^* знание которых позволяет оценить критическую длину трещины и выполнять расчеты на прочность элементов конструкции с дефектами. Кроме

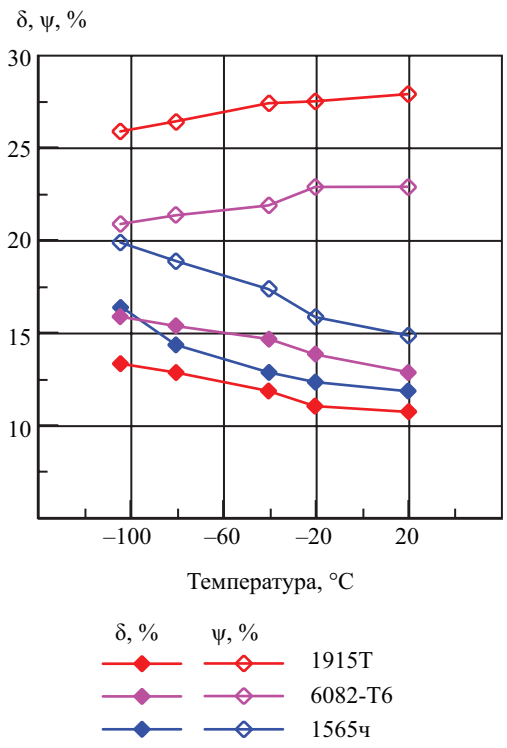

Рис. 8. Изменение относительного удлинения и сужения площади поперечного сечения образцов испытанных сплавов от температуры испытаний

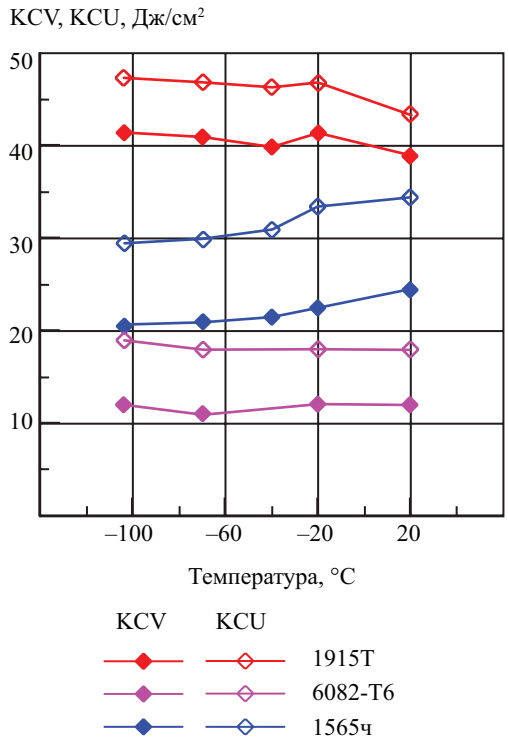

Рис. 9. Влияние температуры испытания на ударную вязкость KCV и KCU алюминиевых сплавов

того, устанавливались: деформационный критерий — раскрытие в вершине трещины δ_c (деформационная характеристика трещиностойкости материала) и энергетический — критическое значение J-интеграла J_c (характеризует работу упругопластических деформаций, разрушение и напряженно-деформированное состояние материала вблизи вершины трещины при упругопластическом деформировании). Сопротивление деформации и разрушению определяли по данным, полученным из диаграмм «нагрузка – смещение».

Влияние температуры на параметры механики разрушения представлено в табл. 3 и на рис. 10, 11.

Области перехода от вязкого состояния к хрупкому в исследованном интервале температур не выявлено; силовой критерий K_C^* исследованных сплавов практически не зависит от температуры испытаний. При этом следует отметить уменьшение величины K_Q на 20 % с понижением температуры испытаний у сплава 1565ч.

Более чувствительны к изменению температуры оказались параметры механики разрушения: критическое раскрытие трещины δ_c и J_c-интеграл. При понижении температуры испытания критическое раскрытие трещины δ_c уменьшалось в образцах сплавов 1565ч на 80 %, сплава 1915Т приблизительно на 40 %, δ_c сплава 6082-Т6 практически не изменялось. Притупление вершины трещины по значениям пластической составляющей раскрытия δ_c в сплавах растет в соотношении 6082-Т6 < 1565ч < 1915Т.

Все сплавы в заданном диапазоне температур показали изменение значений вязкости разрушения J_c, подобной изменению δ_c. Величина параметра J_c в образцах сплава 1565ч с понижением температуры до –104 °С уменьшалась на ≈90 %, J_c сплава 1915Т — на ≈36 %, J_c сплава 6082-Т6 изменялся в пределах 8 %.

Одной из причин разрушения листовых конструкций является образование усталостных трещин в зонах концентрации напряжений при малоцикловом нагружении [30–34]. Для оценки числа циклов до зарождения усталостных трещин в листовых конструкциях с использованием зависимостей, представленных в ПНАЭ[8], необходимо знание предела выносливости сплавов при симметричном цикле нагружения.

В ходе работ при испытании на выносливость (усталость) гладких корсетных образцов основного металла по схеме нагружения «растяжение – сжатие» определяли пределы выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ и 10^7 циклов при комнатной и отрицатель-

[8] ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

Табл. 3. Влияние температуры на силовые, энергетические и деформационные характеристики алюминиевых сплавов при испытании на внецентренное растяжение

Марка сплава	Толщина, мм	Критерий трещиностойкости при t, °С				
		+20	0	–40	–70	–104
		Силовой критерий K_C^*, МПа$\sqrt{\text{м}}$				
1915Т	10	43,0	41,0	43,0	43,0	44,0
6082-Т6	12	42,0	40,5	45,0	43,0	42,0
1565ч	10	52,0	48,0	48,0	51,0	51,0
Марка сплава Alloy	Толщина, мм	Критерий трещиностойкости при t, °С				
		+20	0	–40	–70	–104
		Силовой критерий K_Q, МПа$\sqrt{\text{м}}$				
1915Т	10	34,0	35,0	35,0	33,5	32,5
6082-Т6	12	29,5	31,0	30,0	30,5	29,0
1565ч	10	37,0	38,5	37,5	34,0	30,5
Марка сплава	Толщина, мм	Критерий трещиностойкости при t, °С				
		+20	0	–40	–70	–104
		Энергетический критерий J_c, МДж/м^2				
1915Т	10	0,075	0,079	0,083	0,074	0,061
6082-Т6	12	0,044	0,048	0,046	0,051	0,053
1565ч	10	0,096	0,083	0,080	0,067	0,049
Марка сплава	Толщина, мм	Деформационный критерий δ_c, мм				
1915Т	10	0,279	0,285	0,291	0,261	0,215
6082-Т6	12	0,138	0,137	0,146	0,136	0,135
1565ч	10	0,289	0,250	0,240	0,204	0,161

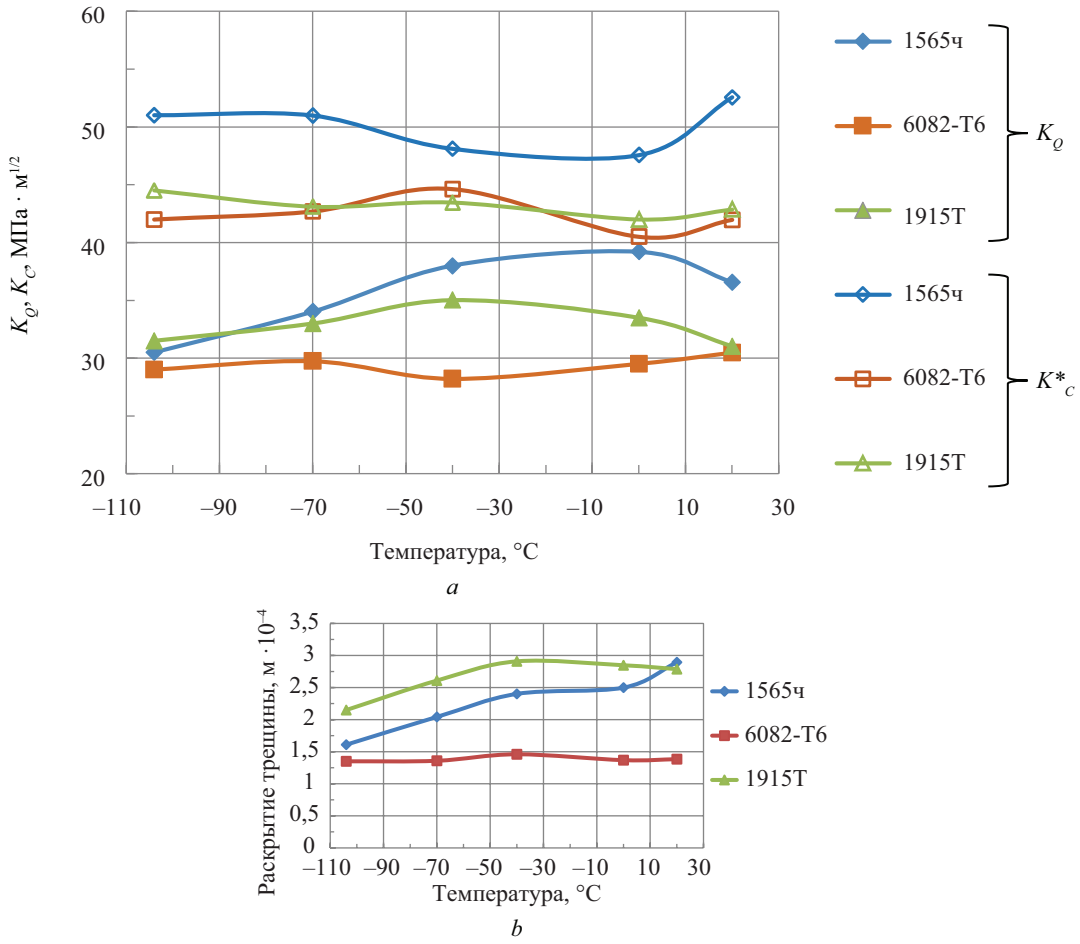

Рис. 10. Влияние температуры испытаний: *a* — на силовые критерии разрушения образцов алюминиевых сплавов; *b* — на величину раскрытия трещины в образцах алюминиевых сплавов

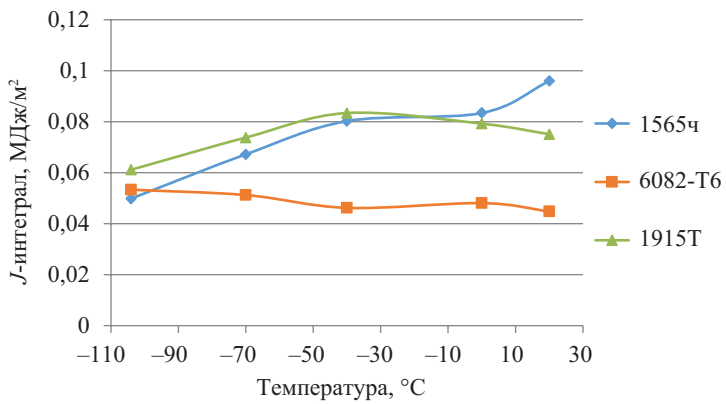

Рис. 11. Влияние температуры на величину J_c-интеграла

ных температурах. Результаты испытаний образцов при +20 °С представлены на рис. 12 в логарифмических координатах ($\lg\sigma_{max}$ – $\lg N$) в виде двух наклонных прямых, в отличие от сталей, у которых второй участок горизонтальный.

Значения ограниченного предела выносливости исследуемых сплавов на базе $2 \cdot 10^6$ и 10^7 циклов при температуре +20 °С, соответствующие вероятности разрушения 50 %, приведены в табл. 4.

В табл. 4 также представлены принятые в инженерной практике соотношения условного (ограниченного) предела выносливости к пределу прочности листового проката деформируемых алюминиевых сплавов.

Результаты испытаний образцов сплавов 1915Т и 6082-Т6 на базе $2 \cdot 10^6$ циклов при температурах –70 и –104 °С приведены в табл. 4, а зависимости ограниченного предела выносливости от температу-

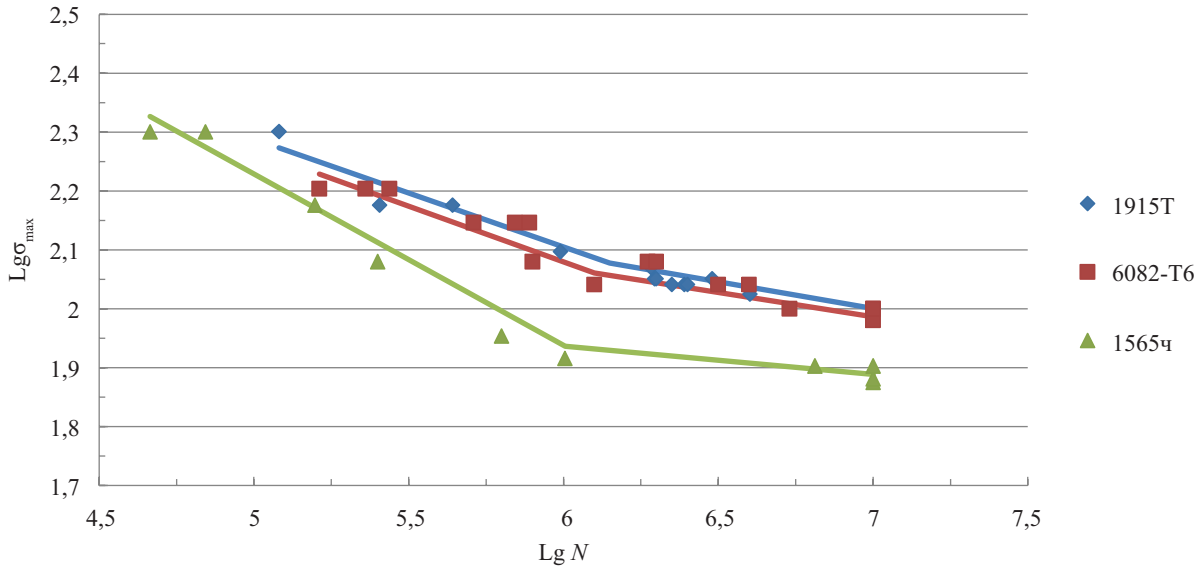

Рис. 12. Диаграммы усталостного разрушения алюминиевых сплавов при симметричном цикле нагружения «растяжение – сжатие» при комнатной температуре

Табл. 4. Ограниченные пределы выносливости исследованных сплавов и отношение предела выносливости к пределу прочности σ_{-1p}/σ_B при различных температурах испытаний

Температура испытаний, °С	База испытаний	Сплав			Сплав		
		1915Т	6082-Т6	1565ч	1915Т	6082-Т6	1565ч
		Предел выносливости			Отношение σ_{-1p}/σ_B		
+20	10^7	100	95	76	0,28	0,29	0,195
+20	$2 \cdot 10^6$	110	105	80	0,305	0,318	0,205
–70	$2 \cdot 10^6$	120	122	–	0,30	0,325	–
–104	$2 \cdot 10^6$	124	–	–	0,303	–	–

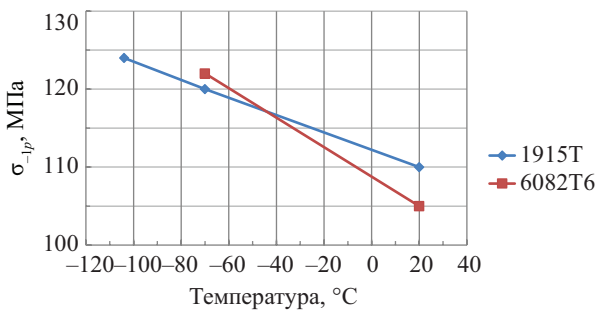

Рис. 13. Влияние низких температур на σ_{-1p} на базе $2 \cdot 10^6$ циклов

ры показаны на рис. 13. Из представленных результатов видно, что предел усталости увеличивается с понижением температуры и в большей степени для менее прочного сплава 6082-Т6.

Значения отношений σ_{-1p}/σ_B, полученные в процессе испытаний при комнатной и в заданном диапазоне отрицательных температурах, практически совпадают. Как отмечается в работе [35], при дальнейшем понижении температуры испытаний на базе 10^6 циклов отношение σ_{-1p}/σ_B возрастает, т.е. предел выносливости материала увеличивается на большую величину по сравнению с его пределом прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований алюминиевых сплавов, рекомендованных в качестве конструкционных материалов сварных конструкций, а именно термоупрочняемых сплавов 6082-Т6 и 1915Т и термонеупрочняемого сплава 1565ч, получены экспериментальные зависимости характеристик прочности и пластичности (σ_B, $\sigma_{0,2}$, E, δ, ψ), ударной вязкости (KCV, KCU), критериев механики разрушения (K_C^*, K_Q, δ_c, J_c), а также ограниченного предела выносливости σ_{-1p} от температуры в диапазоне +20…–104 °С.

Для испытанных сплавов установлено:

• низкотемпературное упрочнение (увеличение на 8–20 % предела прочности при температуре –104 °С) с сохранением пластических свойств (увеличение относительного равномерного удлинения на ≈23–37 % при незначительном снижении площади поперечного сечения образцов сплавов 1915Т и 6082-Т6) и увеличением модуля упругости на ≈10 %;

• скачкообразное деформирование при испытании образцов сплавов 1915Т и 1565ч в условиях одноосного растяжения при комнатной температуре

и их монотонное деформирование при отрицательных температурах испытаний;

• увеличение с понижением температуры ограниченного предела выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов (при температуре –70 °С у сплава 6082-Т6 на 16 %, а у сплава 1915Т — на 9 %);

• отсутствие резкого снижения ударной вязкости и трещиностойкости K_C^* при понижении температуры у всех испытанных сплавов. Вместе с тем в процессе экспериментальных исследований зафиксировано уменьшение (на 20, 40 и 90 %) значений K_Q, δ_c и J_c, что необходимо учитывать при проектировании листовых конструкций из алюминиевых сплавов.

Работа по исследованию алюминиевых сплавов выполнена в рамках определения возможного использования их при конструировании листовых конструкций, работающих в условиях пониженных температур. При малом весе, высокой прочности в сочетании с пластичностью при низких температурах, высокой коррозионной стойкости применение алюминиевых сплавов в строительных конструкциях будет определяться прочностью и деформативностью сварных соединений. Таким образом, необходимы исследования влияния сварки и их способов на сопротивление соединений статическим, динамическим и циклическим нагрузкам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ботвина Л.Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М. : Наука, 2008. 333 с.

2. *Махутов Н.А.* Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность : в 2 ч. Новосибирск : Наука, 2005. 493 с. EDN QMENHR.

3. *Дриц А.М., Овчинников В.В.* Сварка алюминиевых сплавов. М. : Руда и металлы, 2020. 476 с.

4. Патент RU № 2431692. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава / *Орыщенко А.С., Осокин Е.П., Барахтина Н.Н., Дриц А.М., Григорян В.А., Соседков С.М., Арцруни А.А., Хромов А.П., Цургозен Л.А.*; заявл. № 2010125006/02, 20.10.2011.

5. *Дриц А.М., Соседков С.М., Орыщенко А.С., Осокин Е.П., Барахтина Н.Н.* Новый свариваемый сплав системы алюминий–магний для коммерческого транспорта и судостроения // Алюминий 21/ Плоский прокат : 1-я Междунар. конф. 2011.

6. *Орыщенко А.С., Осокин Е.П., Барахтина Н.Н., Дриц А.М., Соседков С.М.* Алюминиево-магниевый сплав 1565ч для криогенного применения // Цветные металлы. 2012. № 11. С. 84–90. EDN PIQMXF.

7. *Дриц А.М., Овчинников В.В.* Свариваемый алюминиевый сплав 1565Ч // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 4 (41). С. 6–12. EDN TGLASZ.

8. *Овчинников В.В.* Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 1 // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 2 (51). С. 24–38. EDN ZBPVBL.

9. *Лукиенко М.И.* Исследование прочности и технологичности листовых резервуарных конструкций из алюминиевых сплавов : дис. … канд. техн. наук. М., 1980. 199 с.

10. *Пригожкин М.Д.* Сравнение эффективности строительных стальных и алюминиевых сплавов при различных условиях эксплуатации // NovaInfo. Ru. 2014. № 24. С. 20–23. EDN SXFSPF.

11. *Кауфман Дж.Г., Уэндерер Е.Т.* Механические свойства при растяжении и чувствительность к надрезу некоторых алюминиевых сплавов серии 7XXX при температурах до 4К // Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах : сб. науч. тр. Металлургия, 1983. С. 163–175.

12. *Полмеар Я.* Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. М. : Техносфера, 2008. 463 с. EDN QMZYTD.

13. *Estrin Y., Kubin L.P.* Plastic instabilities: phenomenology and theory // Materials Science and Engineering: A. 1991. Vol. 137. Pp. 125–134. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90326-I

14. *Криштал М.М.* Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть I. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 5. С. 5–29. DOI: 10.24411/1683-805X-2004-00207

15. *Криштал М.М.* Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть II. Теоретические представления о механизмах неустойчивости пластической деформации // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 5. С. 31–45. DOI: 10.24411/1683-805X-2004-00214

16. *Шуклинов А.В., Денисов Е.К., Михлик Д.В., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шибков А.А.* Переход от устойчивой к скачкообразной деформации, вызванный изменением состава и структуры сплава Al-Mg // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 3. С. 30–35. EDN KBYEWN.

17. *Шибков А.А., Мазилкин А.А., Протасова С.Г., Михлик Д.В., Золотов А.Е., Желтов М.А. и др.* Влияние выделений вторичной фазы на скачкообразную деформацию алюминиево-магниевого сплава АМг6 // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 6. С. 12–17. EDN KBYFBX.

18. *Шибков А.А., Золотов А.Е., Денисов А.А., Гасанов М.Ф., Шибков Е.А., Кочегаров С.С.* Динамическая твердость и образование полос Портевена – Ле Шателье при ударном индентировании // Физика твердого тела. 2023. Т. 65. № 4. С. 594–603. DOI: 10.21883/FTT.2023.04.55296.23. EDN YEWCHC.

19. *Шибков А.А., Денисов А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Гасанов М.Ф., Кочегаров С.С.* Коррозия

и механическая неустойчивость алюминиевых сплавов : монография. Тамбов : Изд-во ТГУ, 2017. 155 с.

20. *Dubey R., Jayaganthan R., Ruan D., Gupta N.K., Jones N., Velmurugan R.* Energy absorption and dynamic behaviour of 6xxx series aluminium alloys : a review // International Journal of Impact Engineering. 2023. Vol. 172. P. 104397. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104397

21. *Лабур Т.М.* Прочность и особенности разрушения сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов при низкой температуре // Автоматическая сварка. 2011. № 5. С. 18–25.

22. *Клевцов Г.В., Ганеев А.В., Семенова И.П., Валиев Р.З.* Особенности ударного разрушения ультрамелкозернистых материалов, полученных при интенсивной пластической деформации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2013. № 4–1 (182). С. 182–189. EDN RSZXAV.

23. *Одесский П.Д., Ведяков И.И.* Сталь в строительных металлических конструкциях. М. : Металлургиздат, 2018. 906 с. EDN UOIAZL.

24. *Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Клевцова Н.А., Семенова И.П., Исламгалиев Р.К., Рааб Г.И.* Влияние типа кристаллической решетки на закономерности ударного разрушения материалов в субмикрокристаллическом состоянии // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 4–2. С. 2002–2003. EDN RAISQZ.

25. *Одесский П.Д., Ведяков И.И.* Ударная вязкость сталей для металлических конструкций. М. : Интермет Инжиниринг, 2003. 231 с. EDN QMZLLJ.

26. *Зинхем Р.И., Дедрик Дж.Х.* Разрушение. Том 6. Разрушение металлов / пер. с англ. В.А. Займовский, Д.В. Лаптев ; под ред. М.Л. Бернштейна. М. : Металлургия, 1976. С. 296–369.

27. *Kumar V., Singh I.V., Mishra B.K., Jayaganthan R.* Improved fracture toughness of cryorolled and room temperature rolled 6082 Al Alloys // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2014. Vol. 27. Issue 2. Pp. 359–367. DOI: 10.1007/s40195-014-0057-z

28. *Chakraborty P., Tiwari V.* Dynamic fracture behaviour of AA7475-T7351 alloy at different strain rates and temperatures // Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 279. P. 109065. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109065

29. *Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П., Букаемский А.А., Буров А.Е., Зырянов И.А. и др.* Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем : монография. Новосибирск : ГУП Академический научно-издательский производственно-полиграфический и книгораспространительский центр РАН «Издательство “Наука”». Обособленное подразделение «Сибирская издательская фирма “Наука”», 2002. 334 с. EDN VDPUMN.

30. *Баско Е.М.* О ресурсе безопасной эксплуатации изотермических стальных резервуаров для хранения жидкого аммиака // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 3. С. 51–55. EDN HUMCAD.

31. *Дорошенко Ф.Е.* Особенности продления ресурса резервуаров РВСПК 50 000 // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 6. С. 17–18. EDN HUIYSH.

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

33. *Кондрашова О.Г., Назарова М.Н.* Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2004. № 2. С. 19. EDN TWVUMF.

34. *Ханухов Х.М., Алипов А.В.* Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр. 2011. № 10. С. 384–422.

35. *Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В.* Усталость легких конструкционных сплавов. М. : Машиностроение, 1973. 317 с.

Поступила в редакцию 22 декабря 2023 г.
Принята в доработанном виде 15 января 2024 г.
Одобрена для публикации 17 января 2024 г.

Об авторах: **Александр Николаевич Шувалов** — кандидат технических наук, доцент кафедры испытания сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 737861, Scopus: 7005121558; Ashuvalov@mgsu.ru;

Олег Александрович Корнев — заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, РИНЦ ID: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; KornevOA@mgsu.ru;

Валентин Алексеевич Ермаков — кандидат технических наук, доцент кафедры испытания сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; Ermakov@mgsu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Rational choice of materials, structural design and manufacturing technology of the product, as well as limitation of allowable sizes of initial defects and corrosion protection allow to exclude the possibility of brittle fracture, development of significant plastic deformations, and growth of cracks to critical sizes during the design life of structures [1, 2].

Aluminium alloys are lightweight, have a higher strength-to-weight ratio, high corrosion resistance and good formability compared to steel.

The use of aluminium alloys in construction is regulated by the Code of Practice[1]. The normative document contains recommendations on the selection of grades of hardened and not hardened heat-treatable weldable alloys with design resistance from 25 to 195 MPa.

Characteristics of structural strength according to CP are limited to the results of tensile tests with the determination of σ_B, $\sigma_{0.2}$, δ at 20 °C. In this case, the greatest design resistance has a heat-hardenable alloy of grade 1915 (Al-Zn-Mg system). This alloy is used in structures in hardened and natural or artificial ageing. Higher and more stable properties are achieved with artificial ageing, used in structures combining load-bearing and enclosing functions, including tank construction.

Of thermally hardened alloys of the Al-Mg-Si system with operational properties that meet the requirements of designers, the most economical and, consequently, the most applicable in building structures are grades AD31, AD33 with design resistance from 55 to 160 MPa, as well as AVM and AVT1 with design strength of 70 and 170 MPa depending on the delivery condition. However, according to the data of works[2] [3] the maximum strength value equal σ_B = 340 MPa to in the specified series possesses alloy of mark 6082 (analogue in Russia — aluminium alloy AD35), which is included in GOST[3], but is absent in CP[1] at the present moment. The alloys are used for medium-loaded structures and are characterized by good corrosion resistance and weldability.

The design resistance level of thermally unstrengthen aluminium-magnesium alloys recommended by CP does not exceed 140 MPa.

Options for replacing traditional alloys with new ones are given in [3].

In recent years, Russian scientists have developed aluminium alloy 1565h of Al-Mg system [4] with strength not less than σ_B = 335 MPa according to GOST[4]. The alloy has high corrosion resistance and welds well. The alloy as a structural material has found application in shipbuilding, wagon building and automotive industry. The study of the characteristics of this alloy and its welded joints is widely presented in the domestic literature [5–8]. The alloy is included in GOST[3], but is absent in CP[1].

The efficiency of using aluminium alloys in tank construction is presented in [9]. Comparison of technical and economic indicators of tanks made of steel and aluminium alloy AMg6m with the same geometrical characteristics showed the advantage of aluminium alloy structures in the reduction of specific metal intensity (on average by 32 %), transportation cost (by 8 %), as well as reduction of operating costs for corrosion protection and reduction in the number of repairs.

Aluminium alloys, characterized by the absence of cold-break threshold, having high strength and plasticity characteristics at low temperatures, can become an effective material for the construction of objects in the Far North [10], including sheet structures: hoppers, silos, inner shells of isothermal tanks.

The effect of low temperatures on the strength of aluminium alloys in the CP is taken into account by the coefficient of temperature change γ_t. The value of this coefficient in the temperature range from –65 to + 50 °C γ_t = 1, at temperatures below –65 °C for Al-Mg and Al-Zn-Mg system — γ_t = 1.05; for Al-Mg-Si system — γ_t = 1.1, which in some cases does not reflect the actual increase in the strength of alloys [11].

The CP also gives values of modulus of elasticity at negative temperatures: for all alloys at t = –70 °C — $E = 0.735 \cdot 10^5$ MPa; for temperature changes from –40 to 50 °C, the value of the modulus of elasticity is taken as $E = 0.7 \cdot 10^5$ MPa.

Change of parameters characterizing plastic properties of alloys (relative elongation in tension δ, relative contraction of cross-sectional area at break ψ) at negative temperatures are not presented in the CP. The norms also do not provide for the design of aluminium structures that absorb cyclic force effects that are experienced by the shells of sheet structures.

Today, the nomenclature and application area of aluminium alloys has significantly increased. In this regard, there is a need for a comprehensive study of the performance of aluminium alloys with the study of properties and mechanisms of deformation and fracture at subzero temperatures to assess the possibility of their use in sheet structures in the Far North, as well as for the inner shells of isothermal tanks.

Deformable alloys were selected for this study taking into account the recommendation of CP, available foreign and domestic experience:

- 1915T is an alloy of the Al-Zn-Mg system after hardening and natural ageing;
- 6082-T6 is an alloy of the Al-Mg-Si system, artificially aged for maximum strength;
- 1565h is an Al-Mg system alloy, hardened by the riveting process, thermally not hardened.

[1] CP 128.13330.2016. Aluminium structures.

[2] DIN EN 573-3–2009. Aluminium and aluminium alloys. Chemical composition and shape of deformed products. Part 3. Chemical composition and shape of products.

[3] GOST 4784–2019. Aluminium and aluminium deformable alloys. Grades.

[4] GOST 21631–2019. Aluminium and aluminium alloy sheets. Technical conditions.

MATERIALS AND METHODS

In the present research, the test temperatures are adopted in the range of –104 to +20° C, which is justified by the storage and use temperature of a wide range of gases (butane, ammonia, propane, propylene, acetylene, ethane, ethylene, etc.).

The chemical composition of the investigated industrial aluminium-based alloys in the delivery state is presented in Table 1.

Uniaxial tensile testing of specimens was carried out in accordance with GOST 1497–84 "Metals. Tensile test methods", using testing machines Instron 8802, Instron 1000HDX, LabTex. Record of deformation diagrams was carried out with the help of extensometer with the base of 20 mm and strain gauges with the base of 5 mm in coordinates σ – ε. Loading of specimens at negative temperatures (–20, –40, –70, –104 °C) was carried out in a thermal chamber. The specimens in the form of double-sided blades with a working part of 200 × 30/10/11 mm and cylindrical specimens with a diameter of 6 mm were tested.

The characteristics of static crack resistance of alloys were determined by testing compact specimens with dimensions 80 × 80 × 10/11 mm with an edge crack in eccentric tension in accordance with the requirements of GOST[5] at temperatures +20, –40, –70, –104 °C.

Tests on impact toughness were performed on specimens with V-shaped and U-shaped notches at temperatures +20, –20, –20, –40, –60, –104 °C on Instron 450 MPX pendulum compressor with registration of impact work, J, and calculation of impact toughness value according to GOST[6].

Fatigue strength tests were carried out in accordance with GOST[7] on a series of corset specimens.

RESEARCH RESULTS

The results of uniaxial tensile testing of the specimens of the investigated materials at positive and negative temperatures with a constant loading rate ("hard mode") are given in Table 2.

Deformation diagrams at room temperature in coordinates σ – ε are presented in Fig. 1–3. All alloying systems are characterized by the absence of a pronounced "neck" at fracture, and the magnitude of the relative contraction of the cross-sectional area ψ is small compared to steel. Fracture of the specimens occurred along shear lines orientated at an angle of 40° to the rolling plane [12].

It was found that the specimens of alloy 6082-T6 deformed monotonically (Fig. 1), while the experimental curves of alloys 1915T and 1565h showed load shedding ("teeth/jumps"). The jumpiness of the curve was evident after 3 % deformation of 1915T specimens and almost immediately after loading above the $\sigma_{0.2}$ for alloy 1565h, and was characterized by low frequency (Fig. 2) and high frequency (Fig. 3) discontinuous flow. In the literature [13–15], such jumps in the strain diagrams are associated with The Portevin – Le Chatelier (PLC) effect, which appears under "hard mode" loading. The appearance of this effect depends on the composition and structure of the material [16, 17].

The loss of stable deformation behaviour of the alloy is attributed to the elimination of the accumulation of dissolved elements and secondary phase particles in aluminium alloys. In the study of alloys of the Al-Mg system (AMg6, AMg3) [18], it was found that a smooth curve was recorded for the AMg3 alloy containing 0.48 % Si, and a jump diagram was obtained when the silicon content in the alloy was reduced to 0.05 %. A monotonic loading curve was obtained for cold rolled sheet of AMg6 alloy, and after annealing of this alloy at 450 °C a step curve was obtained. Varying the annealing regime of the AMg6 alloy led to the dissolution of the β(Al_3Mg_2) phase and caused the transition from a smooth to a stepped deformation curve. In alloys prone to discontinuous deformation, erosion damage and a decrease in the corrosion resistance of alloys are observed [19, 20].

It should be noted that with decreasing test temperature, stress jumps on the deformation diagram of alloy 1915T did not appear already at –40 °C (Fig. 4). For alloy 1565h, a significant decrease in the amplitude and frequency of jumps at –40° C and their almost complete disappearance at –104 °C is also observed (Fig. 5), which agrees with the experimental results presented in the sources [6, 21].

[5] GOST 25.506–85. Calculations and tests for strength. Methods of mechanical tests of metals. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading.

[6] GOST 9454–78. Metals. Method of impact bending test at reduced, room and elevated temperatures.

[7] GOST 25.502–79. Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods of mechanical tests of metals. Methods of fatigue tests.

Table 1. Chemical composition of tested aluminium alloys

Alloy grade	Percentage content of components								
	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Cr	Ti	Fe, impurity	Others
1915T GOST 4784	<0.35	1–1.8	0.2–0.7	<0.1	4–5	0.08–0.2	0.01–0.06	<0.4	0.06–0.2
1565h TU 1-3210–2013	0.2	5.1–6.2	0.4–1.2	0.01–0.2	0.45–1.2	0.25	–	0.3	–
6082-T6 DIN EN 573-3:2009	0.7–1.3	0.6–1.2	0.4–1.0	<0.1	<0.2	<0.2	0.053	<0.5	<0.06

Table 2. Strength and ductility characteristics of investigated aluminium alloys

The alloy under study	Test temperature, °C	Material characteristics				
		σ_B, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	E, МПа	Relative elongation δ, %	Relative narrowing ψ, %
1915T Al-Zn-Mg	+20	360	255	71,000	10.9	28.0
	–20	365	265	73,000	11.2	27.6
	–40	370	270	73,500	12.0	27.5
	–70	395	275	75,000	13.0	26.5
	–104	415	280	78,000	13.5	26.0
6082-T6 Al-Mg-Si	+20	330	315	72,000	13.0	23.0
	–20	345	332	74,000	14.0	23.0
	–40	350	335	74,500	14.8	22.0
	–70	375	350	77,000	15.5	21.5
	–104	400	360	78,500	16.0	21.0
1565ch Al-Mg	+20	390	285	71,000	12.0	15.0
	–20	390	285	71,000	12.5	16.0
	–40	400	290	71,500	13.0	17.5
	–70	405	290	74,000	14.5	19.0
	–104	420	295	77,000	16.5	20.0

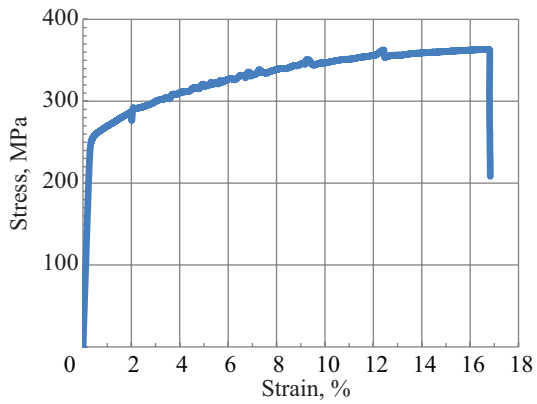

Fig. 1. Deformation diagram of alloy 1915T at +20 °C

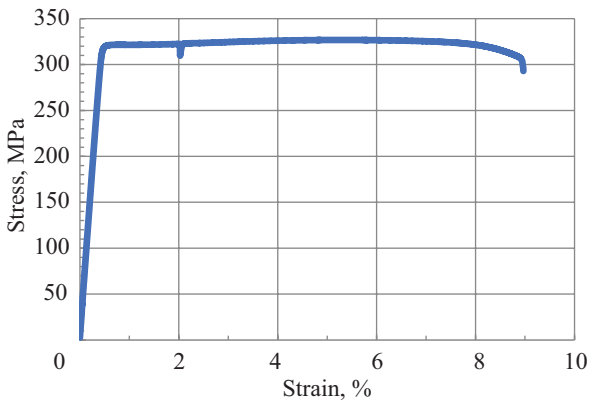

Fig. 2. Deformation diagram of alloy 6082-T6 at +20 °C

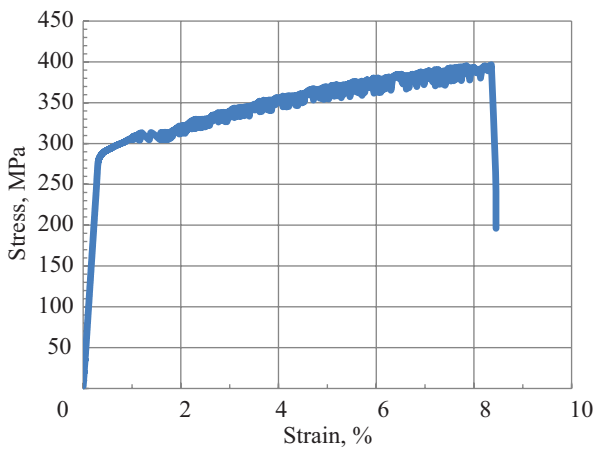

Fig. 3. Deformation diagram of alloy 1565h at +20 °C

According to the results of uniaxial tensile tests until fracture, the complex of strength and plasticity characteristics (σ_B, $\sigma_{0.2}$, E, δ, ψ) of 1915T, 6082-T6, 1565h alloys at different test temperatures.

Fig. 6 shows the dependences of the strength and conditional yield strength of the investigated alloys on the test temperature. The given results show an increase in the strength of the investigated alloys with decreasing temperature, and the most intensive increase in strength is observed at temperature changes from –40 to –104 °C.

The increase in tensile strength at –104 °C compared to room temperature was 21.2 % for alloy 6082-T6; alloy 1915T — 15.2 %, alloy 1565h — 7.7 % [22].

A similar change is characteristic of the conditional yield strength. At that, the increase of $\sigma_{0.2}$ is realized by a smaller value than the increase of σ_B. At temperature –104° C the increase $\sigma_{0.2}$ was for alloy 6082-T6 — 14.3 %; alloy 1915T — 9.8 %; alloy 1565h — 3.5 %, i.e. difference between σ_B and $\sigma_{0.2}$ increases with decreasing temperature.

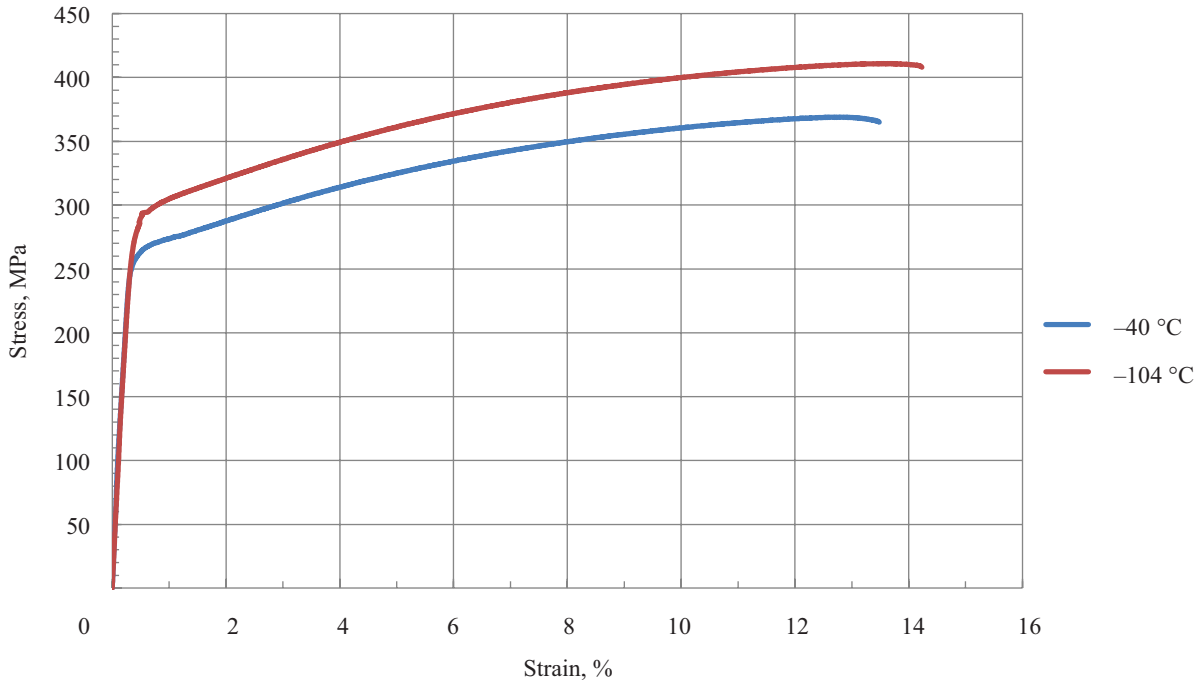

Fig. 4. Deformation diagrams of alloy 1915T at test temperatures of –40 and –104 °C

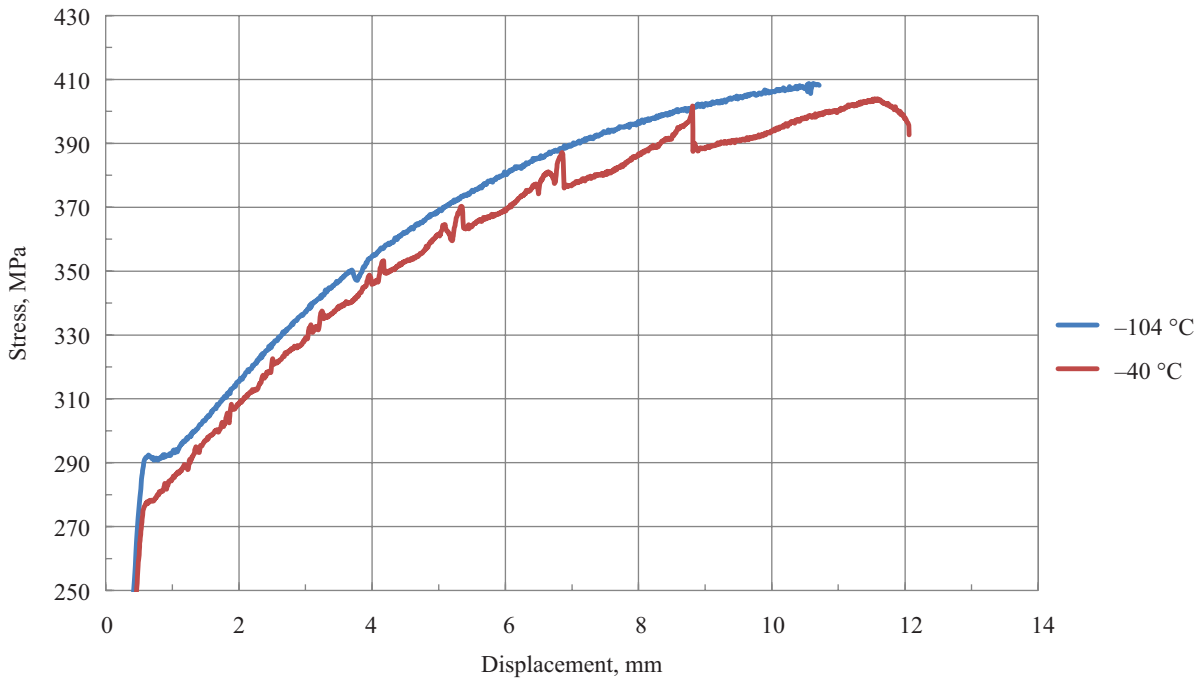

Fig. 5. Deformation diagrams of alloy 1565h at test temperatures of –40 and –104 °C

Values of the modulus of elasticity of the studied alloys and its changes depending on the test temperature are shown in Table 2 and Fig. 7. An increase in modulus of elasticity is observed for all investigated alloys with decreasing temperature. The greatest increase in modulus of elasticity at temperature –104 °C, making 9.9 %, is noted at alloy 1915T; at alloy 6082-T6 the increase in modulus of elasticity made 9.0 %, and at alloy 1565h — 8.4 %. In the temperature range from –20 to –40 °C, the minimum increase in modulus of elasticity of the studied alloys was observed.

Increase in tensile strength σ_B and modulus of elasticity E is caused by a decrease in temperature, which leads to a decrease in the interatomic distances and an increase in the attraction forces between atoms. Steel is also characterized by an increase with decreasing temperature $\sigma_{0.2}$, σ_B and E, but at the same time there is a decrease in ductility and toughness [23].

Parameters characterizing the plastic properties of the investigated aluminium alloys: relative elongation δ, %, and relative contraction of cross-sectional area ψ, %, of the tested specimens are shown in Table 2,

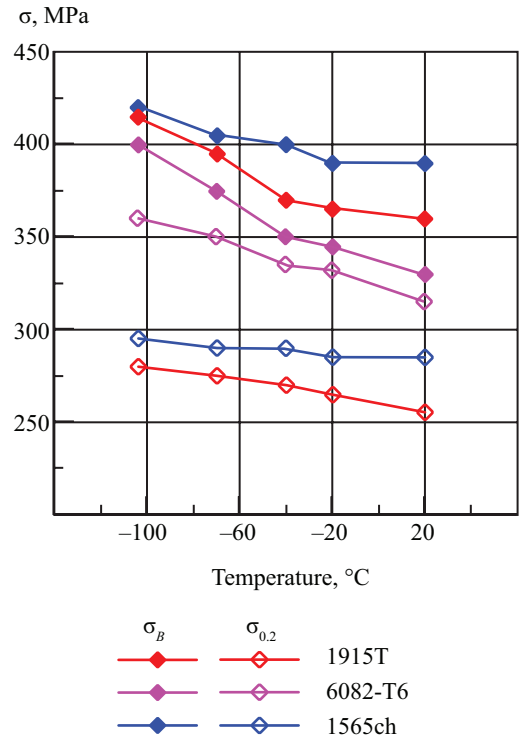

Fig. 6. Variation of tensile strength and conditional yield strength of investigated alloys from test temperature

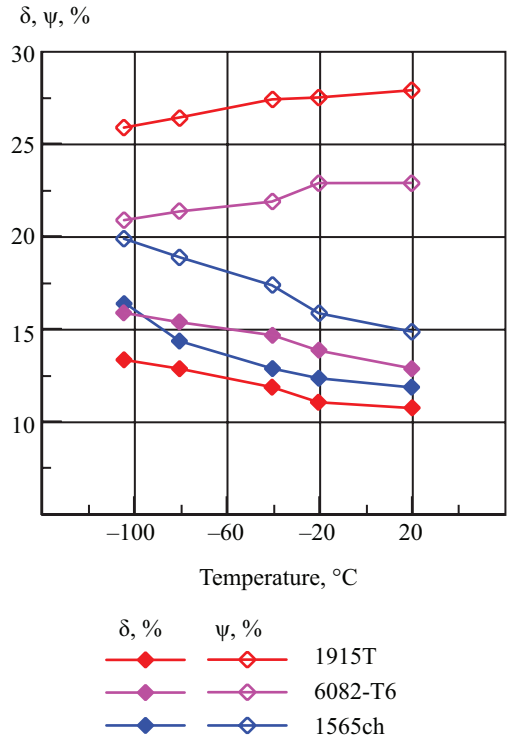

Fig. 8. Variation of relative elongation and contraction of the cross-sectional area of the tested alloy specimens from the test temperature

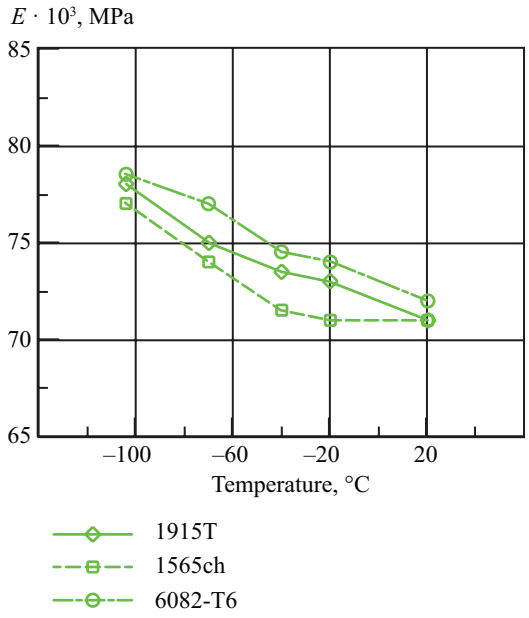

Fig. 7. Variation of modulus of elasticity of aluminium alloys as a function of test temperature

the character of their variation with the test temperature is shown in Fig. 8. It is necessary to note smooth increase of uniform relative elongation of the specimens of the investigated alloys with temperature decrease from +20 to –104 °C. The minimum increase σ by 20.0 % was obtained for alloy 6082-T6. For alloys 1915T and 1565h, the increase in relative elongation was 23.8 and 37.5 %, respectively. The relative contraction of the cross-sectional area of the specimens of alloys 1915T and 6082-T6 with temperature change changed insignificantly — decreased within the range of 7.6–9.5 %. For alloy 1565h the increase in relative contraction was recorded at the level of 33.3 %.

Based on the results of testing of notched specimens, the workability of the studied alloys under dynamic loading conditions by impact bending was compared. Fig. 9 shows the experimental dependences of impact toughness KCV and KCU, J/cm^2, of aluminium alloys on the test temperature (–104, –60, –40, 0 and +20 °C). Higher toughness values were obtained on U-notched specimens, at the lowest temperature KCU was 48.5 and 30.0 J/cm^2 for 1915T and 1565h alloys, respectively.

It follows from the obtained temperature dependences that the impact toughness of all aluminium alloys in the investigated temperature range remains practically constant (with a slight decrease in alloy 1565h), which is typical for alloys with FCC lattice [24–26]. Specimens from 6082-T6 alloy are four times inferior in KCV impact toughness to alloy 1915T and almost two times inferior to alloy 1565h. When the notch radius increases in the specimens, the toughness (KCU) of alloy 1565h increases by a greater value than that of alloys 1915T and 6082-T6, which indicates a greater value of work spent on crack initiation in alloy 1565h compared to others.

In addition to impact toughness (KCU, KCV), the fracture resistance of aluminium alloys was determined using fracture mechanics criteria obtained by testing standard specimens with fatigue cracks [21, 27–29].

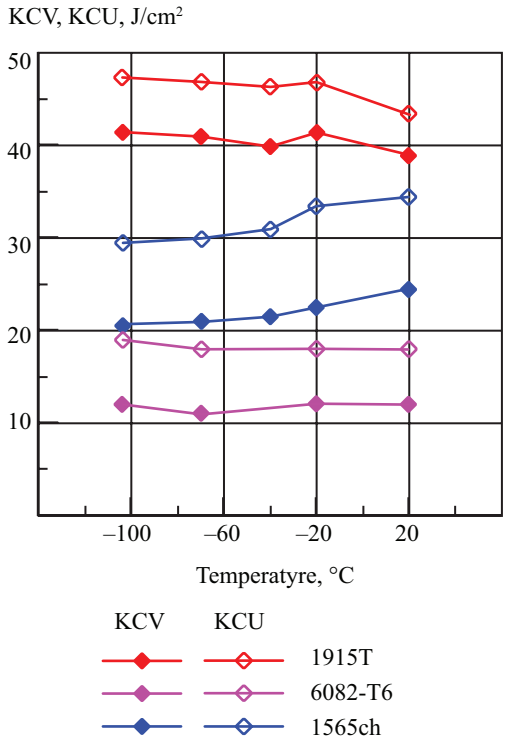

Fig. 9. Effect of test temperature on impact toughness of KCV and KCU of aluminium alloys

Fracture toughness (crack resistance) was evaluated according to GOST4 using fracture mechanics criteria on type III specimens with a crack in the temperature range –104...+20 °C. Force criteria of fracture — critical coefficients of stress intensity were determined. K_Q, K_C^* knowledge of which allows to estimate the critical crack length and to perform strength calculations of structural elements with defects. In addition, the following criteria were established: deformation criterion — opening at the crack tip δ_c (deformation characteristic of crack resistance of material) and energy criterion — critical value of *J*-integral J_c (characterises the work of elastic-plastic deformations, fracture and stress-strain state of the material near the crack tip under elastic-plastic deformation). The resistance to deformation and fracture was determined using data obtained from the load-displacement diagrams.

The effect of temperature on the fracture mechanics parameters is presented in Table 3 and Fig. 10, 11.

The area of transition from ductile to brittle state in the investigated temperature range is not revealed; the force criterion K_C^* of the investigated alloys practically does not depend on the test temperature. At the same time it should be noted that the value of K_Q by 20 % with decreasing test temperature in alloy 1565h.

Fracture mechanics parameters were more sensitive to temperature change: critical crack opening δ_c and J_c-integral. At lowering the test temperature, the critical crack opening δ_c decreased in specimens of 1565h alloy by 80 %, 1915T alloy by about 40 %, δ_c of alloy 6082-T6

Table 3. Effect of temperature on force, energy and deformation characteristics of aluminium alloys in eccentric tensile tests

Alloy grade	Thickness, mm	Crack resistance criterion at *t*, °C				
		+20	0	–40	–70	–104
		Force criterion K_C^*, MPa$\sqrt{\text{m}}$				
1915T	10	43.0	41.0	43.0	43.0	44.0
6082-T6	12	42.0	40.5	45.0	43.0	42.0
1565h	10	52.0	48.0	48.0	51.0	51.0
Alloy grade	Thickness, mm	Crack resistance criterion at *t*, °C				
		+20	0	–40	–70	–104
		Force criterion K_Q, MPa$\sqrt{\text{m}}$				
1915T	10	34.0	35.0	35.0	33.5	32.5
6082-T6	12	29.5	31.0	30.0	30.5	29.0
1565h	10	37.0	38.5	37.5	34.0	30.5
Alloy grade	Thickness, mm	Crack resistance criterion at *t*, °C				
		+20	0	–40	–70	–104
		Energy criterion J_c, MJ/m²				
1915T	10	0.075	0.079	0.083	0.074	0.061
6082-T6	12	0.044	0.048	0.046	0.051	0.053
1565h	10	0.096	0.083	0.080	0.067	0.049
Alloy grade	Thickness, mm	Deformation criterion δ_c, mm				
1915T	10	0.279	0.285	0.291	0.261	0.215
6082-T6	12	0.138	0.137	0.146	0.136	0.135
1565h	10	0.289	0.250	0.240	0.204	0.161

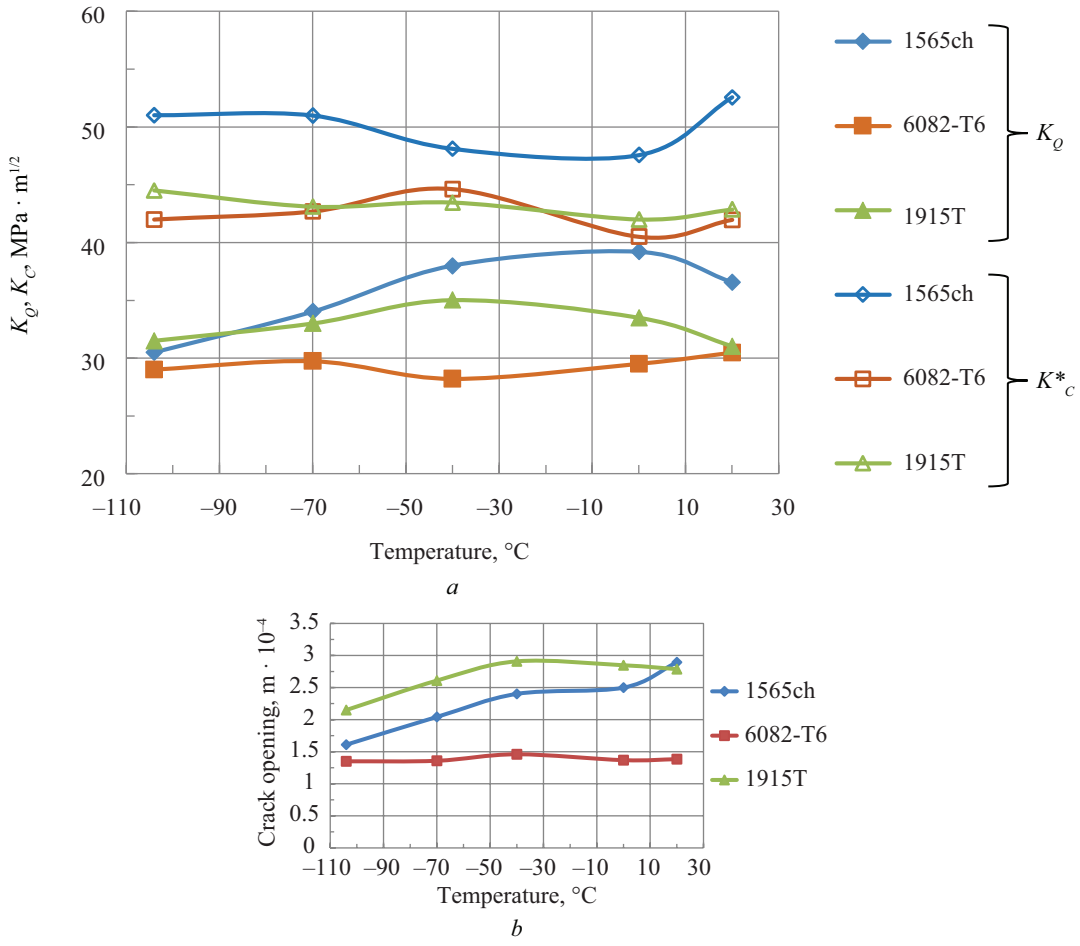

Fig. 10. Effect of test temperature: *a* — on the force criteria of fracture of aluminium alloy specimens; *b* — on the crack opening value in aluminium alloy specimens

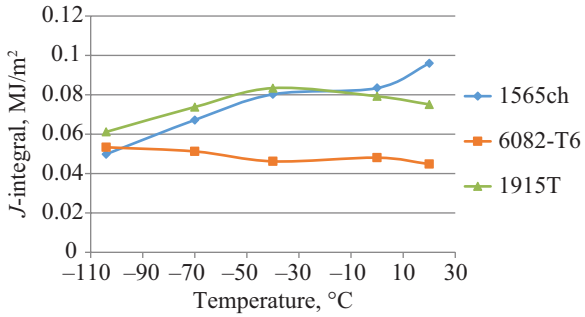

Fig. 11. Effect of temperature on the value of J_c-integral

practically did not change. Blunting of the crack tip by the values of the plastic component of the crack opening δ_c in alloys grows in the ratio 6082-T6 < 1565h < 1915T.

All alloys in the given temperature range showed a change in fracture toughness values J_c similar to the change in δ_c. The value of the parameter J_c in specimens of alloy 1565h with decreasing temperature to –104 °C decreased by ≈90 %, J_c 1915T alloy — by ≈36 %, J_c of alloy 6082-T6 varied within 8 %.

One of the causes of failure of sheet structures is the formation of fatigue cracks in stress concentration zones under low-cycle loading [30–34]. To estimate the number of cycles before fatigue crack initiation in sheet structures using the relationships presented in RNPI[8], it is necessary to know the endurance limit of alloys under symmetric cycle loading.

In the course of work during endurance (fatigue) testing of smooth corset specimens of base metal under the scheme of loading "tension-compression" the endurance limits were determined based on $2 \cdot 10^6$ and 10^7 cycles at room and negative temperatures. The results of testing the specimens at +20 °C are presented in Fig. 12 in logarithmic coordinates (lg σ_{max}/lg N) in the form of two inclined straight lines, in contrast to steels, in which the second section is horizontal.

Values of the limited endurance limit of the investigated alloys based on $2 \cdot 10^6$ and 10^7 cycles at temperature +20 °C, corresponding to the probability of failure of 50 %, are given in Table 4.

Table 4 also presents the ratios of the conditional (limited) endurance limit to the strength limit of sheet metal of deformable aluminium alloys accepted in engineering practice.

The results of tests of specimens of alloys 1915T and 6082-T6 based on $2 \cdot 10^6$ cycles at temperatures –70

[8] RNPI G-7-002–86. Rules and Norms of Nuclear Power Industry.

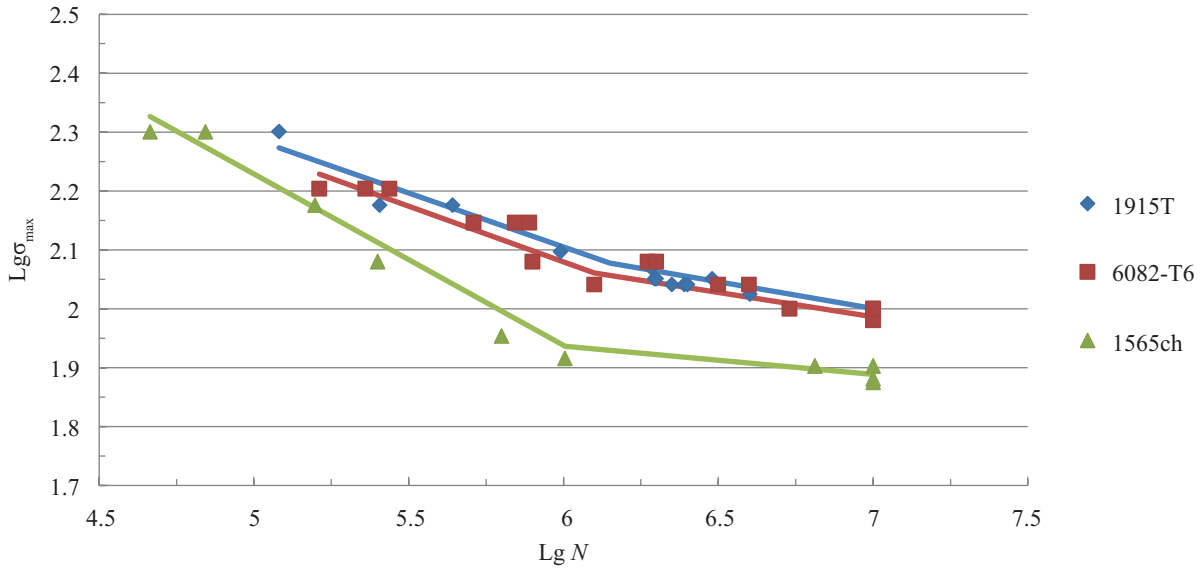

Fig. 12. Fatigue failure diagrams of aluminium alloys under symmetrical "tension-compression" loading cycle at room temperature

Table 4. Limited endurance limits of the investigated alloys and the ratio of endurance limit to tensile strength σ_{-1p}/σ_B at different test temperatures

Test temperature, °C	Test base	Alloy			Alloy		
		1915T	6082-T6	1565h	1915T	6082-T6	1565h
		Endurance limit			Attitude σ_{-1p}/σ_B		
+20	10^7	100	95	76	0.28	0.29	0.195
+20	$2 \cdot 10^6$	110	105	80	0.305	0.318	0.205
–70	$2 \cdot 10^6$	120	122	–	0.30	0.325	–
–104	$2 \cdot 10^6$	124	–	–	0.303	–	–

and –104 °C are given in Table 4, and the dependences of the limited endurance limit on temperature are shown in Fig. 13. From the presented results, it is clear that the fatigue limit increases with decreasing temperature and to a greater extent for the less durable alloy 6082-T6.

Ratio values σ_{-1p}/σ_B obtained during the tests at room temperature and in the specified range of negative temperatures practically coincide. As it is noted in [35], at further lowering of the test temperature based on 106 cycles the ratio σ_{-1p}/σ_B increases, i.e. the endurance limit of the material increases by a larger value compared to its strength limit.

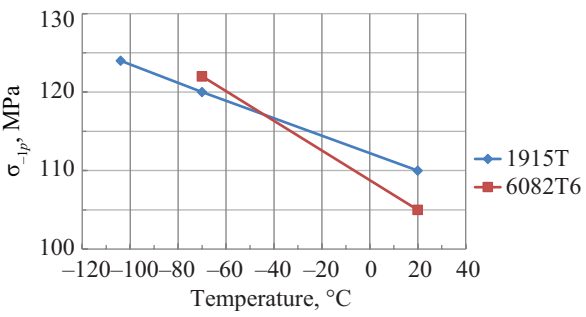

Fig. 13. Effect of low temperatures on σ_{-1p} based on $2 \cdot 10^6$ cycles

CONCLUSION AND DISCUSSION

As a result of experimental studies of aluminium alloys recommended as structural materials for welded structures, namely thermally hardened alloys 6082-T6 and 1915T and thermally not hardened alloy 1565h, experimental dependences of strength and ductility characteristics (σ_B, $\sigma_{0.2}$, E, δ, ψ), impact toughness (KCV, KCU), fracture mechanics criteria (K_C^*, K_Q, δ_c, J_c), as well as the limited endurance limit σ_{-1p} on temperature in the range of +20...–104 °C.

For the tested alloys, it is found that:

- low-temperature hardening (8–20 % increase in the ultimate strength at –104 °C) with preservation of plastic properties (increase in the relative uniform elongation by ≈23–37 % with a slight decrease in the cross-sectional area of the 1915T and 6082-T6 alloy specimens) and an increase in the elastic modulus by ≈10 %;
- jump-like deformation when testing 1915T and 1565h aloy specimens under uniaxial tensile conditions at room temperature and their monotonic deformation at negative test temperatures;
- increase with decreasing temperature of the limited endurance limit on the basis of $2 \cdot 10^6$ cycles (at –70 °C for alloy 6082-T6 by 16 %, and for alloy 1915T — by 9 %);

• no sharp decrease in impact toughness and crack resistance K_C^* at decreasing temperature in all tested alloys. At the same time, in the process of experimental studies, a decrease (by 20, 40 and 90 %) of the values was recorded K_Q, δ_c and Jc that should be taken into account when designing sheet structures made of aluminium alloys.

The work on the study of aluminium alloys is carried out within the framework of determining their possible use in the construction of sheet structures operating at low temperatures. With low weight, high strength combined with ductility at low temperatures, high corrosion resistance and the use of aluminium alloys in building structures will be determined by the strength and deformability of welded joints. Thus, it is necessary to investigate the influence of welding and its methods on the resistance of joints to static, dynamic and cyclic loads.

REFERENCES

1. Botvina L.R. *Destruction: kinetics, mechanisms, general patterns.* Moscow, Nauka, 2008; 334. (rus.).

2. Mahutov N.A. *Structural strength, resource and man-made safety : in 2 parts.* Novosibirsk, Nauka. 2005; 493. EDN QMENHR. (rus.).

3. Drits A.M., Ovchinnikov V.V. *Aluminium alloys welding.* Moscow, Ore and metals, 2020; 476. (rus.).

4. Patent RU No. 2431692. *Aluminum-based alloy and product made from this alloy* / Oryshchenko A.S., Osokin E.P., Barakhtina N.N., Drits A.M., Grigoryan V.A., Sosedkov S.M., Artsruni A.A., Khromov A.P., Tsurgozen L.A.; application No. 2010125006/02, 10/20/2011.

5. Drits A.M., Sosedkov S.M., Oryshchenko A.S., Osokin E.P., Barahtina N.N. New weldable aluminum–magnesium alloy System for Commercial transport and shipbuilding. *Aluminum 21/Flat rolled products : 1st international conference.* 2011. (rus.).

6. Oryshchenko A.S., Osokin E.P., Barakhtina N.N., Drits A.M., Sosedkov S.M. Aluminum-magnesium alloy 1565 ch (1565ч) for cryogenic application. *Non-ferrous metals.* 2012; 11:84-90. EDN PIQMXF. (rus.).

7. Drits A.M., Ovchinnikov V.V. 1565 aluminum alloy to be welded. *Mechanical Engineering and Engineering Education.* 2014; 4(41):6-12. EDN TGLASZ. (rus.).

8. Ovchinnikov V. Perspectives for development of high technology deformed aluminum alloys for welded constructions. Part 1. *Mechanical Engineering and Engineering Education.* 2017; 2(51):24-38. EDN ZBPVBL. (rus.).

9. Lukienko M.I. *The study of the strength and manufacturability of sheet tank structures made of aluminum alloys : thesis of candidate of technical sciences.* Moscow, 1980; 199. (rus.).

10. Prigozhkin M.D. Comparison of the efficiency of building steel and aluminum alloys under different operating conditions. *NovaInfo.Ru.* 2014; 24:20-23. EDN SXFSPF. (rus.).

11. Kaufman D.G., Uenderer E.T. Tensile mechanical properties and notch sensitivity of some 7XXX series aluminum alloys at temperatures up to 4K. *Mechanical properties of structural materials at low temperatures : collection of scientific papers.* Metallurgy, 1983; 163-175. (rus.).

12. Polmear Ya. *Light alloys: from traditional to nanocrystals.* Moscow, Technosphere, 2008; 463. EDN QMZYTD. (rus.).

13. Estrin Y., Kubin L.P. Plastic instabilities: phenomenology and theory. *Materials Science and Engineering: A.* 1991; 137:125-134. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90326-I

14. Krishtal M.M. Instability and mesoscopic heterogeneity of plastic deformation (analytical review). Part I. Phenomenology of tooth fluidity and intermittent fluidity. *Physical Mesomechanics.* 2004; 7(5):5-29. DOI: 10.24411/1683-805X-2004-00207 (rus.).

15. Krishtal M.M. Instability and mesoscopic heterogeneity of plastic deformation (analytical review). Part II. Theoretical concepts of the mechanisms of instability of plastic deformation. *Physical Mesomechanics.* 2004; 7(5):31-45. DOI: 10.24411/1683-805X-2004-00214 (rus.).

16. Shuklinov A.V., Denisov E.K., Mikhlik D.V., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Shibkov A.A. The transition from stable to abrupt deformation caused by a change in the composition and structure of the Al-Mg alloy. *Deformation and Destruction of Materials.* 2008; 3:30-35. EDN KBYEWN. (rus.).

17. Shibkov A.A., Mazilkin A.A., Protasova S.G., Mikhlik D.V., Zolotov A.E., Zheltov M.A. et al. The effect of secondary phase emissions on the discontinuous deformation of aluminum-magnesium alloy AMg6. *Deformation and Destruction of Materials.* 2008; 6:12-17. EDN KBYFBX. (rus.).

18. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Denisov A.A., Gasanov M.F., Shibkov E.A., Kochegarov S.S. Dynamic hardness and formation of Portevin-Le Chatelier bands during impact indentation. *Solid State Physics.* 2023; 65(4):594-603. DOI: 10.21883/FTT.2023.04.55296.23. EDN YEWCHC. (rus.).

19. Shibkov A.A., Denisov A.A., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Gasanov M.F., Kochegarov S.S. *Corrosion and mechanical instability of aluminum alloys : monograph.* Tambov, Publishing House of TSU, 2017; 155. (rus.).

20. Dubey R., Jayaganthan R., Ruan D., Gupta N.K., Jones N., Velmurugan R. Energy absorption and dynamic behaviour of 6xxx series aluminium alloys : a review. *International Journal of Impact Engineering.* 2023; 172:104397. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104397

21. Labur T.M. Strength and fracture characteristics of welded joints of high-strength aluminum aluminum alloys at low temperature. *Automatic Welding.* 2011; 5:18-25. (rus.).

22. Klevtsov G.V., Ganeev A.V., Semenova I.P., Valiev R.Z. Some features of the impact fracture of ultrafine grained materials obtained by intensive plastic deformation. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics.* 2013; 4-1(182):182-189. EDN RSZXAV. (rus.).

23. Odesskij P.D., Vedyakov I.I. *Steel in building metal structures.* Moscow, Metallurgizdat, 2018; 906. EDN UOIAZL. (rus.).

24. Klevtsov G.V., Valiyev R.Z., Klevtsova N.A., Semenova I.P., Islamgaliyev R.K., Raab G.I. Influence of crystal lattice type on regularities of impact fracture of materials in sub microcrystal state. Bulletin of the Tambov University. *Series: Natural and Technical Sciences.* 2013; 18(4-2):2002-2003. EDN RAISQZ. (rus.).

25. Odesskij P.D., Vedyakov I.I. *Impact strength of steels for metal structures.* Moscow, Intermet Inzhiniring, 2003; 231. EDN QMZLLJ. (rus.).

26. Zinhem R.I., Dedrik D.X. *An advanced treatise. Volume VI. Fracture of metals.* Zajmovskij V.A., Laptev D.V. Edited by Bernshtejn M.L. Moscow, Metallurgy, 1976; 296-369. (rus.).

27. Kumar V., Singh I.V., Mishra B.K., Jayaganthan R. Improved Fracture Toughness of Cryorolled and Room Temperature Rolled 6082 Al Alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters).* 2014; 27(2):359-367. DOI: 10.1007/s40195-014-0057-z

28. Chakraborty P., Tiwari V. Dynamic fracture behaviour of AA7475-T7351 alloy at different strain rates and temperatures. *Engineering Fracture Mechanics.* 2023; 279:109065. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109065

29. Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Chernyaev A.P., Bukaemskiy A.A., Burov A.E., Zyryanov I.A. et al. *Crack resistance and mechanical properties of structural materials of technical systems.* Novosibirsk, GUP Academic Scientific Publishing Production, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences "Publishing House «Nauka»". Separate division "Siberian Publishing Company «Nauka»", 2002; 334. EDN VDPUMN. (rus.).

30. Basko E.M. Resource of safe operation of isothermal steel tanks for liquid ammonia storage. *Industrial Laboratopy. Materials Diagnostics.* 2006; 72(3):51-55. EDN HUMCAD. (rus.).

31. Doroshenko F.E. Features of extending the life of RVSPK 50,000 tanks. *Industrial and Civil Engineering.* 2006; 6:17-18. EDN HUIYSH. (rus).

32. Kupreishvili S.M. Mechanics of destruction of vertical cylindrical tanks. *Industrial and Civil Engineering.* 2004; 5:40-42. EDN PLFWJH. (rus.).

33. Kondrashova O.G., Nazarova M.N. Causal analysis of vertical steel tank accidents. *Oil and Gas Business.* 2004; 2:19. EDN TWVUMF. (rus.).

34. Hanuhov H.M., Alipov A.B. Regulatory, technical and organizational support for the safe operation of tank structures. *Prevention of accidents in buildings and structures : collection of scientific papers.* 2011; 10:384-422. (rus.).

35. Stepnov M.N., Giacintov E.V. *Fatigue of light structural alloys.* Moscow, Mashinostroenie, 1973; 317. (rus.).

Received December 22, 2023.
Adopted in revised form on January 15, 2024.
Approved for publication on January 17, 2024.

BIONOTES: **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) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 737861, Scopus: 7005121558; Ashuvalov@mgsu.ru;

Oleg A. Kornev — Deputy Director of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; KornevOA@mgsu.ru;

Valentin A. Ermakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; Ermakov@mgsu.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare that there is no conflict of interests.