

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-96-108

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА АМг6 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

С.А. Монин<sup>1</sup>, П.Н. Медведев<sup>1</sup>, К.Е. Пономарев<sup>2</sup>, И.В. Стрельников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Акционерное общество «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», г. Химки, Московская обл., Россия; npol@laspace.ru

**Аннотация.** Приведены результаты испытаний по определению характеристик ползучести алюминиевого сплава АМг6 при статическом и циклическом нагружении при повышенных температурах. Характеристики циклической и статической ползучести необходимы для прогнозирования остаточных напряжений в сварной конструкции, подвергшейся вибрационному воздействию во время сварки. Проведен анализ кривых ползучести при статическом и циклическом нагружении. Оценено влияние малой циклической нагрузки на сопротивление ползучести с использованием уравнения Ларсона–Миллера.

**Ключевые слова:** ползучесть, усталость, циклическая ползучесть, сплав АМг6, параметр Ларсона–Миллера, моделирование сварки, сварка трением, сварка с наложением вибрации

**Для цитирования:** Монин С.А., Медведев П.Н., Пономарев К.Е., Стрельников И.В. Характеристики сплава АМг6 при статическом и циклическом нагружении // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-96-108.

Scientific article

## CHARACTERISTICS OF AMg6 ALLOY UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING

S.A. Monin<sup>1</sup>, P.N. Medvedev<sup>1</sup>, K.E. Ponomarev<sup>2</sup>, I.V. Strelnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Joint Stock Company «Scientific and Production Association named after S.A. Lavochkin», Khimki, Moscow region, Russia; npol@laspace.ru

**Abstract.** The results of tests to determine the creep characteristics of aluminum alloy AMg6 under static and cyclic loading at elevated temperatures are presented in the article. Characteristics of static and cyclic creep are necessary to predict residual stresses in a welded structure subjected to vibration during welding. Creep curves under static and cyclic loading are analyzed and compared. The effect of the variable component of the load on creep resistance is estimated using the Larson–Miller equation.

**Keywords:** creep, fatigue, cyclic creep, AMg6, Larson–Miller, welding modeling, friction welding, vibration during welding

**For citation:** Monin S.A., Medvedev P.N., Ponomarev K.E., Strelnikov I.V. Characteristics of AMg6 alloy under static and cyclic loading. *Trudy VIAM*, 2024, no.12 (142), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-96-108.

### Введение

Для уменьшения сварочных деформаций в ответственных сварных конструкциях и дальнейшей стабилизации их геометрических размеров требуется снижение уровня остаточных напряжений в металле при их изготовлении [1, 2]. Снижение остаточных напряжений важно для сварных конструкций с малым коэффициентом запаса прочности, при наличии жестких требований к массе и ограниченных припусках на механическую обработку, при необходимости строгого соблюдения размерной точности во время эксплуатации, а также в целях экономии. На остаточные напряжения влияет термическая обработка, которую традиционно проводят для сварных конструкций [3]. Обычно термическую обработку сварной конструкции проводят в зафиксированном состоянии, когда последняя жестко закреплена в приспособлении; при этом происходят локальные пластические деформации наиболее напряженных участков в условиях снижения значений предела текучести при нагреве. Недостатками данного подхода являются высокая стоимость изготовления жестких точных кондукторов для сборки-сварки и последующей термической обработки, удлинение производственного цикла, увеличение энергоемкости, потребность в печах с достаточными размерами рабочей камеры. Помимо последующей термической обработки, существует альтернативная технология – вибрационная обработка, основанная на введении циклического механического воздействия посредством жестко закрепленного на сварной конструкции вибровозбудителя, когда сама конструкция виброизолирована. Возможно совмещение вибрационной обработки с процессом сварки – сопутствующая виброобработка, которая основана на интенсификации процессов ползучести в твердом металле при повышенных температурах, а также на особенностях механического воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл сварочной ванны. Сопутствующая виброобработка позволяет эффективно уменьшать остаточные напряжения и остаточные деформации сварных конструкций [4–6].

Релаксация остаточных напряжений, в том числе в сварных конструкциях, интенсифицируется при повышении температуры и напряжений, а также с течением времени. Релаксация вызвана сдвигодислокационными или диффузионными явлениями. В первом случае происходит групповое передвижение несовершенств («чужеродных» атомов или вакансий) по плоскостям сдвигов; во втором – индивидуальное перемещение отдельных атомов как у границ зерен основной структуры, так и между зернами. Скольжение и переползание несовершенств активизируются напряжениями определенного уровня и термическими флуктуациями колебаний атомов из равновесных положений в узлах кристаллической решетки. Релаксация остаточных напряжений связана с ползучестью. Существуют специальные методы пересчета, позволяющие преобразовывать экспериментальные кривые ползучести в расчетные кривые релаксации [7–10].

Процессы релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести при комбинированном воздействии статических и циклических (вибрационных) нагрузок мало изучены и не имеют точных реологических моделей и расчетных методов определения, поэтому их исследуют экспериментально. Известно, что при наложении на квазистатическую нагрузку циклической компоненты происходит ускорение релаксационных процессов, даже если циклическая компонента нагружения много меньше статической (виброползучесть) [11–13].

Для моделирования сварочных процессов широко применяют компьютерные технологии, позволяющие проводить большой объем расчетов конечно-элементной модели, учитывающей тепловые процессы, а также возникающие сварочные деформации и напряжения. Моделирование процесса сварки с сопутствующей

вибрационной обработкой позволит прогнозировать уровень остаточных напряжений в соединениях и конструкциях. Полученное на основе количественной оценки объективное обоснование уменьшения остаточных напряжений позволит при сокращении объема трудоемких экспериментальных исследований рекомендовать сопутствующую вибрационную обработку для ответственных сварных конструкций.

Эффект ползучести материалов и его интенсификация при наложении вибраций являются основополагающими при сопутствующей вибрационной обработке. Знание характеристик ползучести при статическом и циклическом нагружении необходимо для расчетного прогнозирования уменьшения остаточных напряжений в сварной конструкции, подвергающейся циклическому вибрационному воздействию во время сварки, что хорошо согласуется с современными направлениями моделирования сварочных процессов [14–18].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

В данной работе использованы результаты испытаний образцов из деформируемого алюминиевого сплава АМг6, характеризующегося хорошей свариваемостью. Сплав применяют во многих отраслях, в том числе в машиностроении, кораблестроении, авиационной промышленности [19].

Для определения условий испытаний на ползучесть и усталость (циклическую ползучесть) предварительно проводили испытания на растяжение на образцах из сплава АМг6 на каждом температурном уровне в диапазоне 200–500 °С через каждые 100 °С. Эти испытания проведены на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм и начальной расчетной длиной 25 мм (рис. 1) на электромеханической испытательной машине в соответствии с ГОСТ 9651–84. Нагружение до ожидаемого условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) осуществляли при контроле нагрузки со скоростью 10 Н/(мм<sup>2</sup>·с), далее образцы доводили до разрушения при управлении перемещением траверсы со скоростью 1,25 мм/мин.

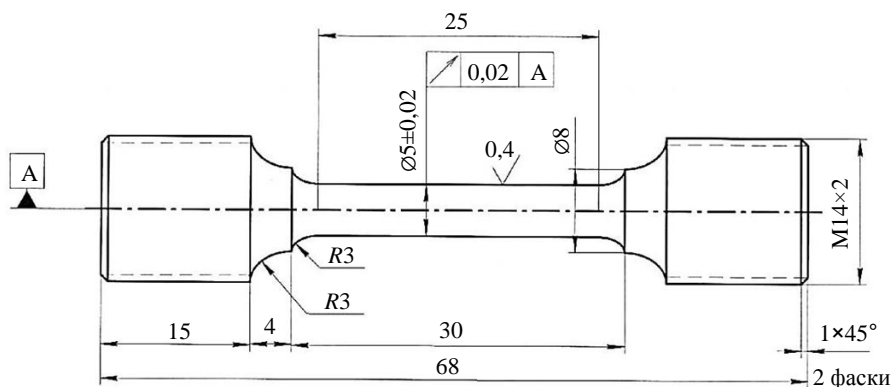


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение и ползучесть

Построение диаграмм растяжения для каждого образца осуществляли по показаниям силоизмерителя и экстензометра, установленного на рабочей части образца. В результате обработки полученных диаграмм растяжения для каждого образца определены значения модуля упругости ( $E$ ), предела прочности при растяжении ( $\sigma_B$ ), условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), относительных удлинения ( $\delta_5$ ) и сужения ( $\psi$ ). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты испытаний на растяжение образцов из сплава АМг6

Температура испытания, °С	$E$ , ГПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
200	69	215	185	41	74
300	60	120	115	97	89
400	54	56	35	110	91
500	10	34	19	54	82

Испытания на ползучесть (одноосное статическое нагружение) образцов из сплава АМг6 проводили на температурных уровнях 200, 300, 400 и 500 °С [20]. Напряжения выбирали ниже условного предела текучести сплава АМг6, определенные по результатам испытаний на растяжение для каждого температурного уровня. Выбранные напряжения позволили провести испытания до разрушения всех образцов.

Испытания на ползучесть проведены на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм и начальной расчетной длиной 25 мм (рис. 1) на электромеханической испытательной машине в соответствии с ГОСТ 3248–81. Нагружение осуществляли при контроле позиции траверсы со скоростью 0,5 мм/мин.

По результатам испытаний для каждого образца построены первичные кривые ползучести в координатах «деформация (%) – продолжительность испытания (ч)», определены суммарная деформация ползучести (сумма упругой и остаточной деформаций)  $\varepsilon_c$  и время ее накопления  $\tau_{ec}$ .

Проведены испытания на циклическую ползучесть образцов из сплава АМг6 при одноосном циклическом нагружении с синусоидальной формой цикла с частотой нагружения 50 Гц [21], на температурных уровнях 200, 300, 400 и 500 °С, на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм и длиной рабочей части 25 мм (рис. 2), на универсальной сервогидравлической испытательной машине. Нагружение до средней нагрузки цикла происходило со скоростью 500 Н/с. Регистрацию деформации образца осуществляли при помощи высокотемпературного экстензометра с керамическими ножами.

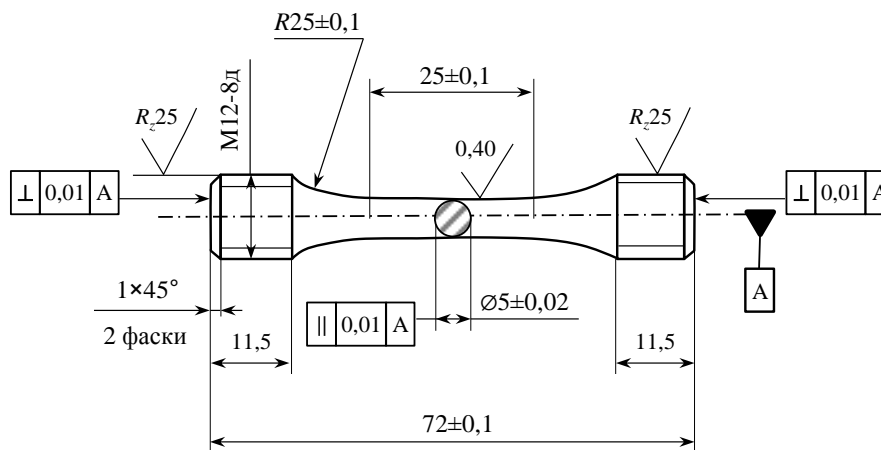


Рис. 2. Образец для испытаний на усталость

На каждом температурном уровне испытано по три образца. В качестве среднего напряжения выбраны значения условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), в качестве амплитуды – напряжение  $\sigma_a$ , соответствующее перемещению  $\pm 0,2$  мм по траверсе. Эти значения выбраны на основании результатов испытаний на растяжение.

Все испытанные образцы доведены до разрушения. По результатам испытаний построены первичные кривые удлинения (накопленной односторонней относительной

продольной деформации) в координатах «деформация (%) – продолжительность испытания (с)», определены суммарная деформация ползучести (сумма упругой и остаточной деформаций)  $\varepsilon_c$  и время ее накопления  $\tau_{ec}$ .

### Результаты и обсуждение

При увеличении температуры значительно снижается прочность – предел текучести. Характеристики пластичности (относительные удлинение и сужение) достигают пика при температуре 400 °С. Диаграммы растяжения образцов из сплава АМг6 представлены на рис. 3.

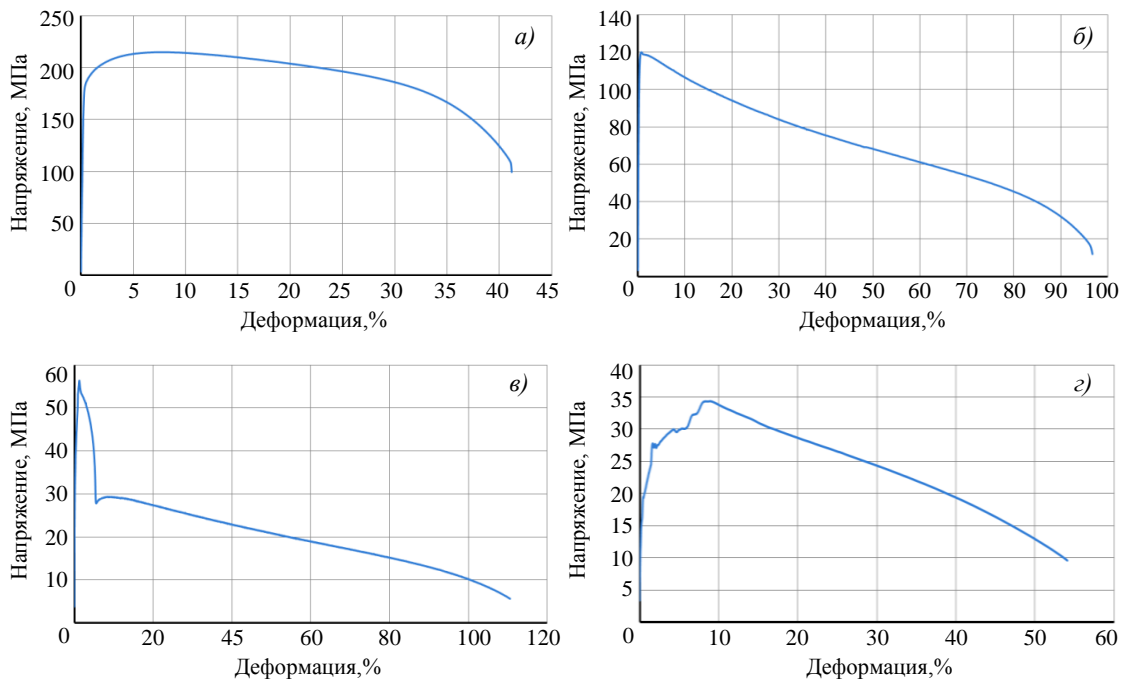


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов из сплава АМг6 при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (з)

Первичные кривые статической ползучести образцов из сплава АМг6 представлены на рис. 4, а циклической – на рис. 5. Символом  $\varepsilon_0$  на рис. 5 обозначена деформация, которая достигнута на момент первого достижения средней нагрузки цикла, т. е. до приложения циклической нагрузки.

Для обоих случаев следует отметить, что участок затухающей ползучести, являющейся результатом деформационного упрочнения, либо не наблюдается, либо слабо выражен. Границы между участками затухающей и установившейся ползучести выделены тонкой черной линией для тех кривых, на которых можно определить эту границу. Участки же установившейся и ускоренной ползучести выражены явно, границы между ними обозначены пунктирными линиями.

В табл. 2 представлены накопленные деформации и время до разрушения, а также приведены коэффициенты вариации, определенные по формуле:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}}, \quad (1)$$

где  $x_i$  –  $i$ -й элемент выборки;  $\bar{x}$  – среднее значение выборки,  $n$  – количество элементов выборки.

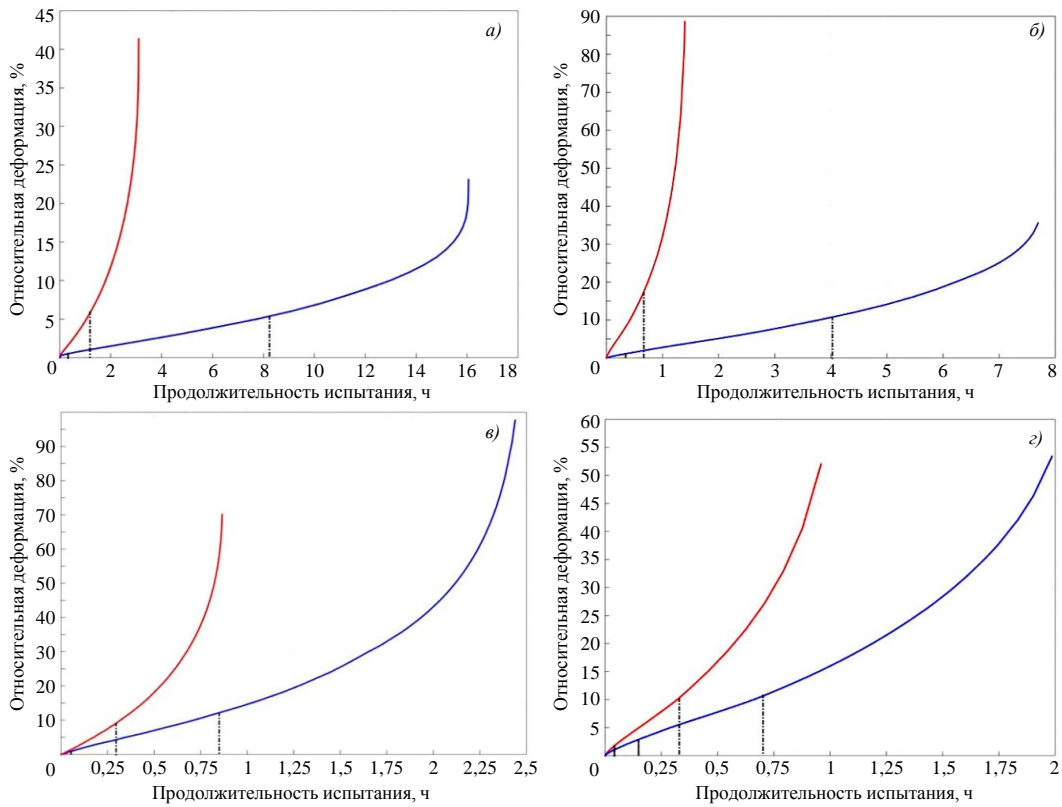


Рис. 4. Кривые статической ползучести двух образцов из сплава АМг6 при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (з)

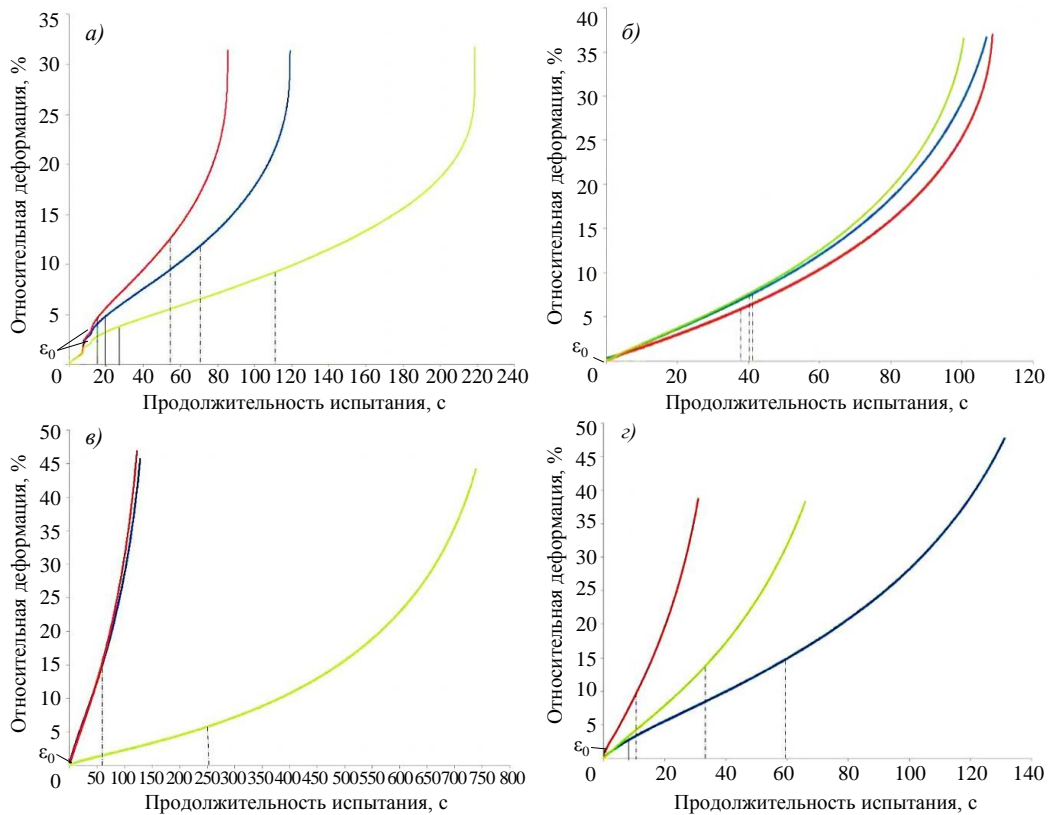


Рис. 5. Кривые удлинения трех образцов из сплава АМг6 при циклической ползучести при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (з)

## Результаты испытаний на циклическую и статическую ползучесть

Условный номер образца	Температура испытания, °С	$\sigma_{cp}$	$\sigma_a$	$\tau_{ec}$ , с	$\varepsilon_c$	$\nu(\tau_{ec})$	$\nu(\varepsilon_c)$	$(\tau_{III}/\tau_{ec})100\%$
		МПа			%			
Статическая ползучесть								
1	200	140	0	11160	41,5	68	29	60
2				57960	23			50
3	300	45	0	27720	35,5	69	42	48
4				5040	88,5			46
5	400	12	0	8784	97,5	48	16	64
6				3096	70			67
7	500	4	0	3456	52	35	1	68
8				7128	53,5			64
Циклическая ползучесть								
1	200	200	10	119	29	40	3	38
2				85	31			38
3				219	31			40
4	300	110	5	107	35	14	3	66
5				109	37			68
6				100	35			64
7	400	34	4	128	42	88	4	57
8				123	46			55
9				739	42			66
10	500	16	4	131	48	54	12	54
11				32	37			53
12				66	39			52

Для статической ползучести наблюдается значительный разброс значений времени до разрушения и накопленной деформации. Для циклической ползучести большим рассеянием значений характеризуется только время до разрушения.

В среднем деформация до разрушения увеличивается с повышением температуры с 200 до 400 °С, а затем снижается при температуре 500 °С. Аналогичная закономерность изменения характеристик пластичности  $\delta_5$  и  $\psi$  при изменении температуры, показанная в табл. 1 для статического разрушения, хорошо согласуется с данными, наблюдаемыми для циклической ползучести.

В табл. 2 также приведены данные о протяженности участков ускоренной ползучести ( $\tau_{III}$ ), отнесенные к полному времени до разрушения ( $\tau_{ec}$ ). Все полученные значения попадают в диапазон от 38 до 68 %, однозначной зависимости от температуры не наблюдается.

Для сопоставления кривых ползучести на рис. 6 представлены зависимости деформации от относительного времени до разрушения при испытаниях на циклическую и статическую ползучесть. Следует отметить следующие закономерности, характерные для всех четырех рассмотренных температур:

– как для циклической, так и для статической ползучести наблюдается стадийность – выраженные участки установившейся и ускоренной ползучести, значительно менее выраженный участок затухающей ползучести;

– для циклической ползучести характерно разрушение при меньшей накопленной деформации, чем для статической ползучести.

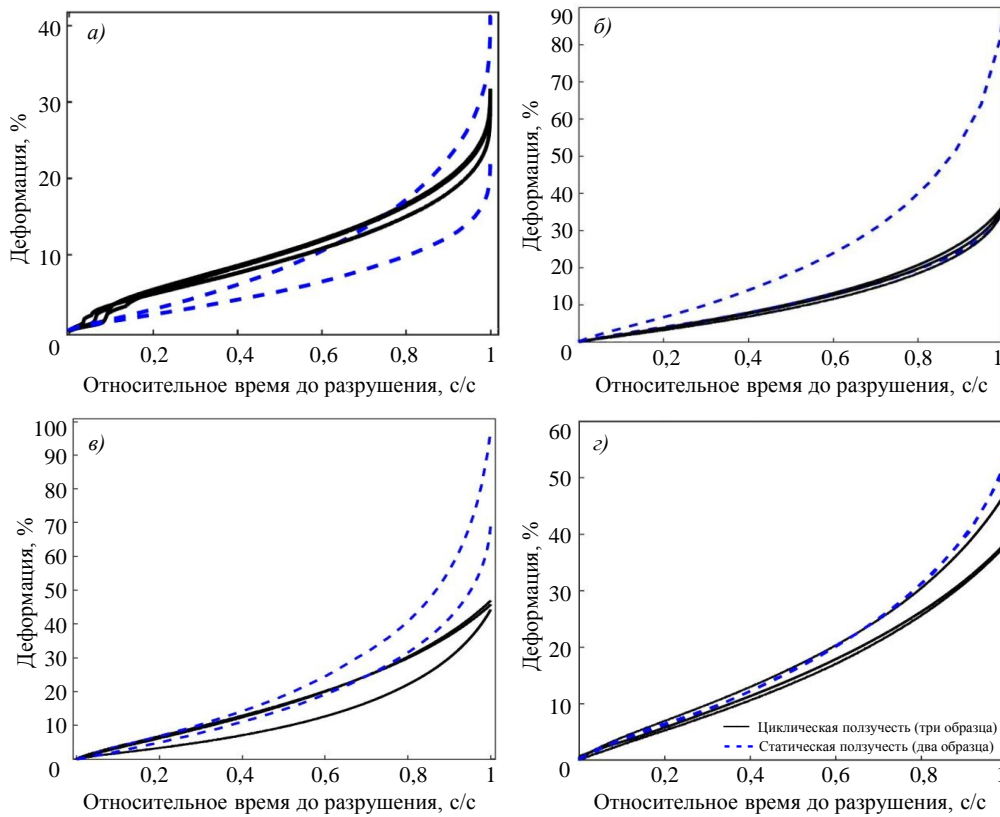


Рис. 6. Зависимость деформации от относительного времени до разрушения образцов из сплава АМг6 при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (з)

Часто срок эксплуатации конструкций значительно превышает доступную длительность испытаний, поэтому для прогнозирования долговечности конструкций используют результаты эквивалентных испытаний на меньших долговечностях. Высокую эффективность при этом показали методы, основанные на введении параметров, включающих температуру испытания и время до разрушения – эти параметры коррелируют с логарифмом напряжения. Введение температурно-временных параметров позволило прогнозировать ползучесть при высоких значениях долговечности с помощью проведения испытаний при температурах, превышающих температуру эксплуатации. Однако такие параметры можно использовать и в других целях – например, чтобы сопоставить результаты испытаний на ползучесть, проведенных при разных температурах.

Один из наиболее распространенных температурно-временных параметров – параметр Ларсона–Миллера [22, 23], основанный на уравнении Аррениуса:

$$\dot{\varepsilon} = A(\sigma)e^{\frac{-Q}{RT}}, \quad (2)$$

где  $A(\sigma)$  – функция, характеризующая зависимость скорости деформирования от уровня напряжения;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $Q$  – энергия активации.

После интегрирования и подстановки значений времени до разрушения и деформации при разрушении уравнение принимает вид

$$\varepsilon_p = A(\sigma)\tau_p e^{\frac{-Q}{RT}}, \quad (3)$$

где  $\tau_p$  – время до разрушения;  $\varepsilon_p$  – деформация разрушения.

В уравнении выделяют время температурной компенсации (*temperature-compensated time* [22])

$$\theta_p = \tau_p e^{\frac{-Q}{RT}}. \quad (4)$$

Предполагается, что  $\theta_p$  постоянна для каждого материала, тогда после логарифмирования обеих частей уравнения (4), подстановки значения универсальной газовой постоянной, замены  $\log_{10}\theta_p$  на константу и  $0,217Q$  на параметр Ларсона–Миллера получается следующее уравнение:

$$P_{LM} = T(\log\tau_p + C), \quad (5)$$

где  $P_{LM}$  – параметр Ларсона–Миллера;  $T$  – температура, К;  $\tau_p$  – время до разрушения, ч;  $C$  – константа, которую для большинства конструкционных сплавов принимают равной 20 [24].

Для большинства металлических материалов параметр Ларсона–Миллера коррелирует с логарифмом напряжения, и результаты испытаний на ползучесть аппроксимируют полиномом первой степени или более высокого порядка. В данной работе проведена аппроксимация полиномом первой степени:

$$\lg(\sigma) = a + b \cdot P_{LM}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – константы.

Константа  $C$  принята равной 20. Для циклической и статической ползучести определены коэффициенты уравнения (3) с применением линейного регрессионного анализа:

$$\lg(\sigma_{\text{цикл}}) = 4,172 - 2,089 \cdot 10^{-4} \cdot P_{LM}, \quad (7)$$

$$\lg(\sigma_{\text{стат}}) = 4,835 - 2,731 \cdot 10^{-4} \cdot P_{LM}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{\text{цикл}}$  – среднее напряжение в цикле при циклической ползучести;  $\sigma_{\text{стат}}$  – напряжение при статической ползучести.

Экспериментальные точки и полученные зависимости в полулогарифмических координатах представлены на рис. 7. Линия циклической ползучести находится выше линии статической ползучести в области высоких напряжений (от 100 МПа и более) и ниже – при напряжениях <100 МПа, т. е. при снижении среднего уровня напряжений для указанного диапазона температур (200–500 °С) следует ожидать большее увеличение долговечности при циклической ползучести, чем при статической.

На рис. 8 приведены диаграммы распределения десятичных логарифмов времени до разрушения в координатах «температура–напряжение», построенные по уравнениям (7) и (8). По этим диаграммам можно увидеть весь диапазон температур и напряжений, соответствующий определенной долговечности. Так, рис. 8, *а* соответствует случаю, когда есть малая циклическая составляющая нагрузки, а по оси абсцисс указана преобладающая статическая составляющая; рис. 8, *б* соответствует случаю, когда нагрузка приложена только статически; на рис. 8, *в* представлены разности логарифмов времени до разрушения. Этот рисунок демонстрирует, в какой области нагрузок и температур ожидается более быстрое разрушение при статической ползучести, а в какой – при циклической.

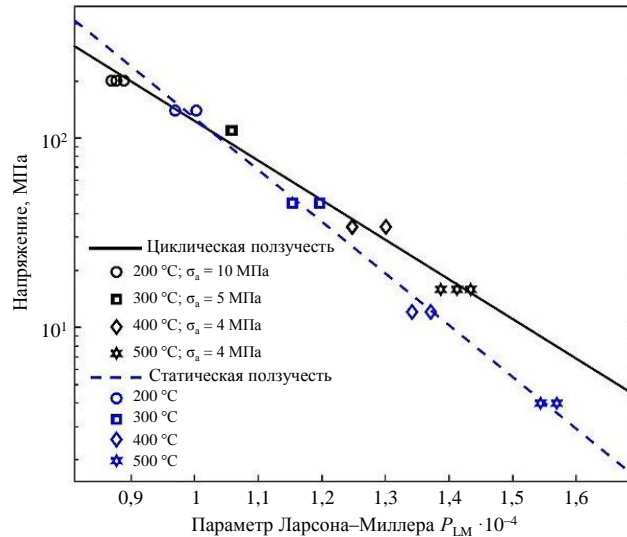


Рис. 7. Кривые Ларсона–Миллера для статической и циклической ползучести

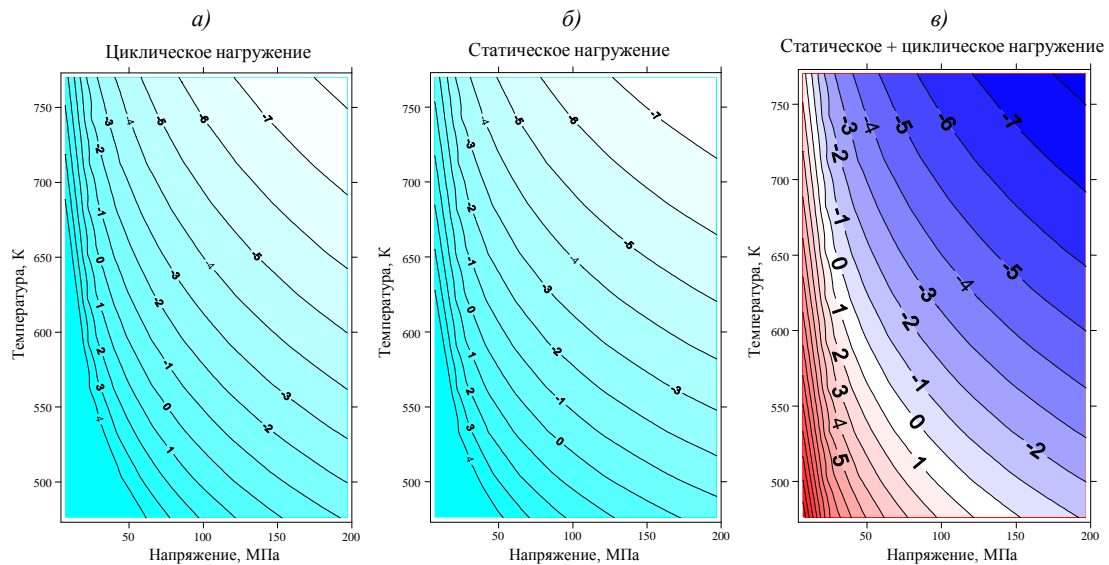


Рис. 8. Кривые равной долговечности

Полученные зависимости могут быть применены для моделирования сварочных процессов и вибрационной обработки.

### Заключения

Проведены испытания образцов из сплава АМг6 на ползучесть при четырех температурах и при двух режимах испытания: на циклическую ползучесть, при которой нагрузка циклически меняется в небольшом диапазоне около среднего значения с частотой 50 Гц; на статическую ползучесть, при которой нагрузка постоянна. В результате обработки экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

– в обоих случаях при всех рассмотренных температурах наблюдается стадийность процесса на кривых ползучести – прослеживаются участки установившейся и ускоренной ползучести, продолжительность которых приблизительно одинакова. Участок затухающей ползучести либо намного менее продолжителен, либо отсутствует;

– при циклической ползучести разрушение происходит при меньших деформациях, чем при статической ползучести, кроме того, при циклической ползучести эта характеристика более стабильна;

– для аппроксимации результатов испытаний на циклическую и статическую ползучесть хорошо подходит зависимость Ларсона–Миллера. Для тех напряжений, температур и долговечностей, для которых применима эта зависимость, следует ожидать, что снижение напряжения вызовет большее увеличение долговечности при циклической ползучести, чем при статической.

### Список источников

1. Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Живучесть сварных конструкций элементов фюзеляжа из алюминий-литиевого сплава В-1469 // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 4 (69). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П., Иода Е.Н., Лоскутов В.М. Особенности и перспективы сварки алюминийлитиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. № 4. С. 3–12.
3. Май Суан З., Гневко А.И., Пучков Ю.А. Исследование влияния криогенной обработки на остаточные напряжения и свойства алюминиевого сплава Д16 // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-25-31.
4. Jose M.J., Kumar S.S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds // *Science and Technology of Welding & Joining*. 2016. Is. 4. P. 45–49. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000088.
5. Ingram E., Golan O., Haj-Ali R., Noam Eliaz. The effect of localized vibration during welding of the microstructure and mechanical behavior of steel welds // *Materials*. 2019. No. 12 (2553). DOI: 10.3390/ma12162553.
6. Пономарев К.Е., Стрельников И.В. Перспективы применения различных способов вибрационной обработки ответственных сварных конструкций космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2023. № 2. С. 126–131. DOI: 10.26732/j.st.2023.2.05.
7. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов / под ред. В.Б. Киреева. М.: Металлургия, 1986. 280 с.
8. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение, 2005. 226 с.
9. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. Киев: Наукова думка, 1978. 238 с.
10. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
11. Дубовова Е.В. Разработка методов расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненных элементах конструкций в условиях стационарной и циклической ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2012. 20 с.
12. Хохлов А.В. Анализ общих свойств кривых ползучести при циклических ступенчатых нагружениях, порождаемых линейной теорией наследственности // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки*. 2017. Т. 21. № 2. С. 326–361.
13. Хохлов А.В. Свойства семейства кривых ползучести при ступенчатом нагружении линейного определяющего соотношения вязкоупругости // *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77. № 4. С. 344–359.
14. Артемьев Д.М., Буканов В.А., Садкин К.Е., Ильин А.В. Моделирование методом конечных элементов релаксации остаточных напряжений при послесварочном отпуске крупногабаритной конструкции из высокопрочной стали // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2018. № 1. С. 130–136.
15. Булков А.Б., Пешков В.В., Петренко В.Р., Балбеков Д.Н. Моделирование процесса высокотемпературной деформации металла при диффузной сварке в условиях ползучести // *Вестник ВГТУ*. 2011. № 8. С. 4–8.

16. Киселев А.С. Разработка методов анализа и проектирования сварочной технологии на основе компьютерного моделирования термомодеформированного и структурного состояния сварных конструкций: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1999. 317 с.
17. Экспериментальные методы исследований деформаций и напряжений: справ. пособие / под ред. Б.С. Касаткина. Киев: Наукова думка, 1981. 584 с.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
20. Расчеты и испытания на прочность. Метод испытаний на ползучесть при регулярном многоцикловом нагружении: Р 50-54-35-88. М.: ВНИИМАШ, 1988. 24 с.
21. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
22. Dowling N.E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, 1999. 830 p.
23. Maruyama K., Abe F., Sato H. et al. On the physical basis of a Larson–Miller constant of 20 // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018. No. 159. P. 93–100.
24. Larson F.R., Miller J. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses // *Transcriptions of ASME*. 1952. Vol. 7. P. 765–775.

#### References

1. Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S. Aluminum-Lithium alloy V-1469 welded fuselage constructions survivability. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.
2. Kablov E.N., Lukin V.I., Zhegina I.P., Ioda E.N., Loskutov V.M. Features and Prospects of Welding Aluminum-Lithium Alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, no. 4, pp. 3–12.
3. Mai Xuan D., Gnevko A.I., Puchkov Yu.A. Study of cryogenic treatment influence on residual stresses and properties of D16 aluminium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-25-31.
4. Jose M.J., Kumar S.S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2016, is. 4, pp. 45–49. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000088.
5. Ingram E., Golan O., Haj-Ali R., Noam Eliaz. The effect of localized vibration during welding of the microstructure and mechanical behavior of steel welds. *Materials*, 2019, no. 12 (2553). DOI: 10.3390/ma12162553.
6. Ponomarev K.E., Strelnikov I.V. Prospects for the Application of Various Methods of Vibration Treatment of Critical Welded Structures of Spacecraft. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, 2023, no. 2, pp. 126–131. DOI: 10.26732/j.st.2023.2.05.
7. Taira S., Otani R. *Theory of High-Temperature Strength of Materials*. Ed. V.B. Kireev. Moscow: Metallurgiya, 1986, 280 p.
8. Radchenko V.P., Saushkin M.N. *Creep and Relaxation of Residual Stresses in Hardened Structures*. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 226 p.
9. Strizhalo V.A. *Cyclic strength and creep of metals under low-cycle loading under low and high temperature conditions*. Kyiv: Naukova Dumka, 1978, 238 p.
10. Birger I.A. *Residual stresses*. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p.
11. Dubovova E.V. *Development of methods for calculating the relaxation of residual stresses in hardened structural elements under steady-state and cyclic creep conditions*: abstract thesis, Cand. Sc. (Tech.). Samara, 2012, 20 p.

12. Khokhlov A.V. Analysis of general properties of creep curves under cyclic step loading generated by the linear theory of heredity. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Fiziko-matematicheskiye nauki*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 326–361.
13. Khokhlov A.V. Properties of the creep curve family under step loading of the linear constitutive relation of viscoelasticity. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2015, vol. 77, no. 4, pp. 344–359.
14. Artemyev D.M., Bukanov V.A., Sadkin K.E., Ilyin A.V. Finite element modeling of residual stress relaxation during post-weld tempering of a large-sized structure made of high-strength steel. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2018, no. 1, pp. 130–136.
15. Bulkov A.B., Peshkov V.V., Petrenko V.R., Balbekov D.N. Modeling the process of high-temperature deformation of metal during diffusion welding under creep conditions. *Vestnik VGTU*, 2011, no. 8, pp. 4–8.
16. Kiselev A.S. *Development of methods for analysis and design of welding technology based on computer modeling of the thermally deformed and structural state of welded structures*: thesis, Dr. Sc. (Tech.). Moscow, 1999, 317 p.
17. *Experimental methods for studying deformations and stresses*: reference manual. Ed. B.S. Kasatkin. Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 584 p.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kutyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
20. *Calculations and strength tests. Creep test method under regular multi-cycle loading*: P 50-54-35-88. Moscow: VNIIMASH, 1988, 24 p.
21. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
22. Dowling N.E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, 1999, 830 p.
23. Maruyama K., Abe F., Sato H. et al. On the physical basis of a Larson–Miller constant of 20. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018, no. 159, pp. 93–100.
24. Larson F.R., Miller J. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses. *Transcriptions of ASME*, 1952, vol. 7, pp. 765–775.

**Информация об авторах**

**Монин Сергей Алексеевич**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Медведев Павел Николаевич**, начальник сектора, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Пономарев Константин Ефимович**, главный сварщик, АО «НПО Лавочкина», npol@laspace.ru

**Стрельников Илья Владимирович**, ведущий инженер-технолог, к.т.н., АО «НПО Лавочкина», npol@laspace.ru

**Information about the authors**

**Sergey A. Monin**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

**Pavel N. Medvedev**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

**Konstantin E. Ponomarev**, Chief Welder, JSC «SPA Lavochkin», npol@laspace.ru

**Ilya V. Strelnikov**, Leading Engineer-Technologist, Candidate of Sciences (Tech.), JSC «SPA Lavochkin», npol@laspace.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; получена после доработки 22.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.11.2024.  
The article was submitted 21.10.2024; received in revised form 22.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.11.2024.