

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-11-55-65>

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ AL – CU – MG – LI НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В ОБЛАСТИ МАЛЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

© Евгений Николаевич Каблов¹, Владислав Валерьевич Антипов¹,
Николай Олегович Яковлев¹, Владимир Вячеславович Куликов²,
Ярослава Владимировна Автаева^{1*}, Виталий Васильевич Автаев¹,
Павел Николаевич Медведев¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Россия, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17; *e-mail: ya4@list.ru

² Публичное акционерное общество «Авиационный комплекс им. С. В. Ильюшина», Россия, 125190, Москва, Ленинградский пр-т, д. 45 «Г».

*Статья поступила 10 февраля 2022 г. Поступила после доработки 15 апреля 2022 г.
Принята к публикации 26 мая 2022 г.*

Основные статические расчетные характеристики листовых полуфабрикатов авиационных материалов получают по результатам испытаний на одноосное растяжение, сжатие, смятие. При этом для аналитического описания диаграмм деформирования при статическом растяжении в области малых пластических деформаций широко применяют уравнение Рамберга – Осгуда. Для листов алюминий-литиевых сплавов характерна обратная анизотропия, вызванная кристаллографической текстурой после прокатки. Цель работы — исследование механических характеристик листов из сплава 1441PT1 при статическом нагружении (растяжении, сжатии, смятии) в трех направлениях проката (по направлению проката, перпендикулярно прокату, под углом 45° к направлению проката) с оценкой фактора Тейлора, характеризующего текстуру материала. Испытания на растяжение проводили при температурах +20, –70, +85 и +125 °С, на сжатие и смятие — при температуре +20 °С. Температуры испытаний выбирали исходя из условий эксплуатации обшивочных материалов. По диаграммам деформирования при растяжении и сжатии определяли коэффициент Рамберга – Осгуда. Для оценки фактора Тейлора проводили рентгеновский текстурный анализ с построением обратных полюсных фигур. Показано, что для листов толщиной 1 и 3 мм алюминий-литиевого сплава 1441PT1 температура испытаний, соответствующая температуре эксплуатации, оказывает слабое влияние на прочностные характеристики при растяжении в области малых пластических деформаций. При этом коэффициент Рамберга – Осгуда — одна из наиболее чувствительных характеристик к температуре воздействия, направлению проката материала и толщине листа. Определена функциональная зависимость коэффициента Рамберга – Осгуда от направления проката и температуры воздействия для исследованных листов из сплава 1441PT1.

Ключевые слова: алюминий-литиевый сплав; коэффициент Рамберга – Осгуда; направления проката; прочность; малые пластические деформации.

EFFECT OF THE TEMPERATURE AND ANISOTROPY OF SHEETS FROM Al – Cu – Mg – Li SYSTEM ON THE MECHANICAL PROPERTIES IN THE RANGE OF SMALL PLASTIC STRAINS

© Evgeny N. Kablov¹, Vladislav V. Antipov¹, Nikolay O. Yakovlev¹, Vladimir V. Kulikov², Yaroslava V. Avtaeva^{1*}, Vitaly V. Avtaev¹, Pavel N. Medvedev¹

¹ All-Russian scientific research institute of aviation materials of the National research center “Kurchatov institute”, 17, ul. Radio, Moscow, 105005, Russia; *e-mail: ya4@list.ru

² Public Joint Stock Company “Ilyushin Aviation Complex”, 45 “G”, Leningradsky prosp., Moscow, 125190, Russia.

Received February 10, 2022. Revised April 15, 2022. Accepted May 26, 2022.

The main static design characteristics of sheet semi-finished aircraft materials are obtained from the results of tests for uniaxial tension, compression and bearing. At the same time, the Ramberg – Osgood equation is widely used for the analytical description of strain diagrams under static tension in the region of small plastic deformations. The inverse anisotropy resulted from the crystallographic texture after rolling is characteristic of the sheets of aluminum-lithium alloys. We have studied the mechanical characteris-

tics of 1441RT1 alloy sheets under static loading (tension, compression, bearing) in three rolling directions (longitudinal, long transverse, at 45° angle to the longitudinal direction), with an estimate of the Taylor factor characterizing the texture of the material. Tension tests were carried out at a temperature of –70, +20, +85, and +125°C, compression and beading tests were carried out at a temperature of 20°C. Test temperatures were chosen proceeding from operating conditions of panel skin materials. The Ramberg – Osgood coefficient was determined from the tensile and compressive strain diagrams. To determine the Taylor factor, the X-ray texture analysis was performed with the construction of inverse pole figures. It is shown that for 1-mm- and 3-mm sheets of aluminum-lithium alloy 1441RT1 the test temperature corresponding to the operation temperature has a weak effect on the tensile strength characteristics in the region of small plastic deformations. At the same time, the Ramberg – Osgood coefficient is a characteristic most sensitive to the exposure temperature, rolling direction and sheet thickness. The functional dependence of the Ramberg – Osgood coefficient on the rolling direction and the exposure temperature has been determined for 1-mm and 3-mm sheets of 1441RT1 alloy.

Keywords: aluminum-lithium alloy; Ramberg – Osgood coefficient; directions of rolling; strength; small plastic deformations.

Введение

При выборе материала на этапе проектирования, а также расчете на устойчивость и прочность элементов конструкций авиационной техники используют статические характеристики прочности и пластичности. Для конструкции планера воздушного судна перспективно использовать алюминий-литиевые сплавы, обладающие пониженной плотностью, высокими характеристиками прочности и усталости [1].

Основные статические расчетные характеристики листовых полуфабрикатов авиационных материалов получают по результатам испытаний на одноосное растяжение и сжатие, а также на смятие материала стержнем, имитирующим болтовое или заклепочное соединение [2 – 5]. К расчетным характеристикам относят также диаграммы деформирования, которые могут быть представлены как в табличном, так и в аналитическом видах [6 – 8]. Для аналитического описания диаграмм деформирования при статическом растяжении в области малых пластических деформаций широко применяют уравнение Рамберга – Осгуда [9]. В зарубежной практике процедура нахождения коэффициента Рамберга – Осгуда хорошо отработана, выпускаются справочники, содержащие диаграммы деформирования и коэффициенты [10, 11]. Традиционное представление уравнения Рамберга – Осгуда базируется на допущении о линейной зависимости напряжение — пластическая деформация в двойных логарифмических координатах, что позволяет описывать поведение материала в области начала пластической макродеформации. Применение уравнения Рамберга – Осгуда позволяет решать задачи не только статической прочности элементов конструкции, но и оценки усталостной прочности. Методология поциклового изменения механических характеристик материала в области малых пластических деформаций описана в работе [12].

Для листов алюминий-литиевых сплавов характерна обратная анизотропия, вызванная кри-

сталлографической текстурой после прокатки. Она приводит к тому, что прочностные свойства в поперечном направлении несколько выше, чем в направлении проката, и минимальны — в направлении 45° к прокату [13 – 15]. У поликристаллов критическое напряжение сдвига достигается в зернах при различных действующих на образец макронапряжениях. Включение в пластическую деформацию новых зерен при нагружении выражается на диаграмме деформирования в постепенном нарастании пластического течения в виде плавного перехода от упругой к упругопластической деформации. При этом текстурное состояние поликристалла описывается моделью Тейлора и характеризуется интегрально с использованием соответствующего фактора. Поэтому должна наблюдаться связь фактора Тейлора с характеристиками течения и коэффициентом Рамберга – Осгуда.

Цель работы — исследование механических характеристик при растяжении, сжатии, смятии листов из сплава 1441РТ1 в трех направлениях плоскости проката: по направлению проката, перпендикулярно прокату и под углом 45° к направлению проката. По результатам испытаний получены значения коэффициента Рамберга – Осгуда, определена их связь с температурой воздействия, направлением проката полуфабрикатов в виде функциональной зависимости. Рассмотрены различия текстурного состояния двух полуфабрикатов, которые могут оказывать влияние на полученные коэффициенты при механических испытаниях.

Объекты и методы исследований

Для исследований использовали листы из алюминий-литиевого сплава 1441РТ1 номинальной толщиной 1 и 3 мм, изготовленные из слитков одной плавки. Для всех механических испытаний из листов каждой толщины вырезали образцы в трех направлениях по отношению к прокату — вдоль (НП), 45° (45) и поперек (ПП).

Для корректной оценки свойств полуфабрикатов образцы одной группы (каждого полуфабриката, вида испытания, направления вырезки и температуры испытаний) изготавливали из разных зон листов. Количество образцов в группах: 33 — для испытаний на растяжение при +20 °С; по 10 — в остальных группах.

Испытания на растяжение проводили при температурах +20, -70, +85 и +125 °С. Температуры испытаний выбирали исходя из условий эксплуатации обшивочных материалов. Образцы на растяжение изготавливали с шириной рабочих частей $b_0 = 12,5$ мм (из листа 1 мм) и 20 мм (из листа 3 мм), длина рабочих частей $4b_0$ составляла 50 и 80 мм соответственно.

Испытания на сжатие проводили при температуре +20 °С. Образцы на сжатие представляли собой параллелепипед размерами $S \times 20 \times 100$ мм, где S — толщина листа. Образцы испытывали в специальном приспособлении, обеспечивающем продольную устойчивость образца и свободную деформацию при нагружении, до общей деформации ~0,7 %.

Испытания на смятие проводили при температуре +20 °С. Образцы на смятие имели форму параллелепипеда размерами $S \times 36 \times 150$ мм с отверстием диаметром 6 мм, расположенным на расстоянии 12 мм от торца образца. Испытывали их в приспособлении типа «вилка», закрепляя в нем образец через сминающий стержень [16].

Все испытания проводили со скоростью перемещения активного захвата 1 мм/мин на универсальных электромеханических испытательных машинах. Для контроля деформаций устанавливали экстензометры с классом точности 0,5 по EN ISO 9513.

При испытаниях на растяжение и сжатие определяли напряжения, при которых остаточная деформация составляет 0,01 % ($\sigma_{0,01}$ и $\sigma_{0,01}^c$), пределы пропорциональности ($\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{\text{пл}}^c$), условные пределы текучести ($\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,2}^c$), временное сопротивление (σ_B). При испытаниях на смятие определяли напряжения смятия, соответствующие величине остаточной овализации отверстия в 2,4 и 6 % ($\sigma_2^{\text{см}}$, $\sigma_4^{\text{см}}$, $\sigma_6^{\text{см}}$), предел прочности при смятии ($\sigma_B^{\text{см}}$).

По диаграммам деформирования при растяжении и сжатии определяли коэффициент Рамберга – Осгуда в соответствии с формулой [9]

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{\Pi} = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n, \quad (1)$$

где ε_{Σ} — полная деформация, мм/мм; ε_{Π} — пластическая деформация, мм/мм; σ — напряжение, МПа; E — модуль упругости, МПа; $\sigma_{0,2}$ — услов-

ный предел текучести, МПа; n — коэффициент Рамберга – Осгуда.

Уравнение Рамберга – Осгуда (1) представлено в виде суперпозиции упругих и необратимых деформаций материала. Левые слагаемые уравнения отражают упругие деформации, правые слагаемые связывают пластическую деформацию и напряжение в логарифмическую линейную зависимость, которая наблюдается у многих металлических материалов в диапазоне напряжений от «предела пропорциональности» материала до его условного предела текучести. Существует два подхода определения предела пропорциональности. В отечественной практике он характеризует напряжение в материале, при котором тангенс угла наклона между касательной на кривой деформирования и осью напряжений увеличивается на 50 % относительно своего значения на упругом (прямолинейном) участке ($\sigma_{\text{пл}}$) [2]. В зарубежной практике под «пределом пропорциональности» понимается максимальное напряжение, при котором деформация остается пропорциональной напряжению. Поскольку точно определить эту точку на кривой напряжение — деформация практически невозможно, принято назначать малое значение пластической деформации для определения соответствующего напряжения в качестве предела пропорциональности [11]. Обычно при таком подходе принимают напряжение, при котором остаточная пластическая деформация составляет 0,01 % ($\sigma_{0,01}$).

Для нахождения коэффициента Рамберга – Осгуда диаграммы деформирования при растяжении и сжатии аппроксимировали на участке $\sigma_{0,01} - \sigma_{0,2}$. Коэффициент в уравнении (1), равный 0,002, соответствует остаточной деформации 0,2 %. Аппроксимацию по уравнению (1) проводят до этого значения.

При испытаниях на смятие фиксируют диаграмму деформирования, подобную диаграммам при растяжении или сжатии. Поэтому для анализа диаграмм деформирования при смятии применяли степенное уравнение, подобное исходному уравнению Рамберга – Осгуда:

$$\varepsilon_{\Sigma}^{\text{см}} = \frac{\sigma^{\text{см}}}{E^{\text{см}}} + \varepsilon_{\Pi}^{\text{см}} = \frac{\sigma^{\text{см}}}{E^{\text{см}}} + 0,02 \left(\frac{\sigma^{\text{см}}}{\sigma_2^{\text{см}}} \right)^{n^{\text{см}}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\Sigma}^{\text{см}}$ — полная деформация (овализация отверстия), мм/мм; $\varepsilon_{\Pi}^{\text{см}}$ — пластическая деформация, мм/мм; $\sigma^{\text{см}}$ — напряжение смятия, МПа; $E^{\text{см}}$ — тангенс угла наклона диаграммы смятия на линейном участке, МПа; $\sigma_2^{\text{см}}$ — напряжения смятия, соответствующие величине остаточной овализации отверстия в 2 %, МПа; $n^{\text{см}}$ — степенной коэффициент при смятии.

Существуют различные подходы к определению условного предела текучести при смятии. В одном случае принимают его значение при остаточной овализации отверстия 6 % ($\sigma_6^{\text{см}}$), в другом [11] — для напряжения, вызывающего остаточную овализацию отверстия в 2 % ($\sigma_2^{\text{см}}$). Для нахождения степенного коэффициента ($n^{\text{см}}$) диаграммы деформирования при смятии аппроксимировали на участке до $\sigma_2^{\text{см}}$.

В соответствии с уравнением (1) коэффициент Рамберга – Осгуда связан только с пластической деформацией, которая может быть определена путем вычитания упругой составляющей деформации из общей. Расчетная упругая деформация непосредственно зависит от модуля упругости конкретного образца, определенного в ограниченном диапазоне линейного участка диаграммы деформирования. Поэтому на точность функционального описания диаграммы деформирования каждого образца с помощью уравнения (1) будут влиять два присутствующих на диаграммах фактора — начальная нелинейность и область перехода от упругой к упругопластической деформации, которые хорошо учитываются введением дополнительных поправок $d\epsilon$ и dE :

$$\epsilon_{\Sigma} = \frac{\sigma}{E + dE} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n + d\epsilon, \quad (3)$$

где dE — поправка к наклону линейного участка, МПа; $d\epsilon$ — поправка к смещению линейного участка, мм/мм. При этом регрессионный анализ по трем неизвестным значительно повышает достоверность аппроксимации R^2 .

Микроструктуру исследовали при увеличении 200 при помощи оптического инвертированного микроскопа Olympus GX51, величину зерна определяли методом подсчета пересечений зерен.

Рентгеновский текстурный анализ листов проводили на дифрактометре Empyrean фирмы PanAlytical. Съемку прямых полюсных фигур (ППФ) осуществляли в монохроматическом CuK α -излучении при фиксированном положении рентгеновской трубки и счетчика на рефлексах (111 — $2\theta = 38^\circ$), (200 — $2\theta = 45^\circ$), (220 — $2\theta = 65^\circ$), образец при этом поворачивался и наклонялся с помощью специализированной текстурной приставки.

Для исключения влияния послойной неоднородности съемку ППФ проводили на кубиках $3 \times 3 \times 3$ мм с плоскостей, нормальных к НП и ПП направлениям. При такой съемке получают более представительные результаты исследования текстурного состояния со всех слоев материала. Для листов толщиной 1 мм кубик изготавливали набором из трех листов.

Для анализа рентгеновских текстурных данных проводили расчет функции распределения ориентации (ФРО) из набора неполных прямых полюсных фигур. Далее из данных ФРО строили обратные полюсные фигуры (ОПФ) для направлений НП, ПП и 45 и рассчитывали интегральные факторы Тейлора.

Фактор Тейлора связывает приложенное напряжение (σ) с напряжением сдвига (τ) в кристалле:

$$\tau = \sigma \cos(\chi) \cos(\lambda), \quad (4)$$

где χ , λ — углы между приложенной силой и направлением скольжения, а также нормалью к плоскости скольжения. Таким образом, фактор Тейлора

$$F = \frac{\sigma}{\tau} = \frac{1}{\cos(\chi) \cos(\lambda)} \quad (5)$$

определяет ориентационную зависимость начала пластической деформации в кристаллите.

Результаты и их обсуждение

Типичные диаграммы деформирования образцов, вырезанных в направлениях НП, 45 и ПП, из листов толщиной 1 и 3 мм при испытании на растяжение, сжатие, смятие при температуре +20 °С представлены на рис. 1.

Для каждой группы образцов были рассчитаны средние значения прочностных характеристик, а также коэффициенты вариации. Для характеристик, полученных при растяжении и сжатии, коэффициенты вариации составили: $\leq 1\%$ — для σ_b и $\sigma_{0,2}$; $\leq 2\%$ — для $\sigma_{0,2}^c$, $\sigma_{\text{пл}}$, $\sigma_{\text{пл}}^c$; $\leq 3\%$ — для $\sigma_{0,01}$; $\leq 4\%$ — для $\sigma_{0,01}^c$. Коэффициент вариации для характеристик, полученных при смятии ($\sigma_2^{\text{см}}$, $\sigma_4^{\text{см}}$, $\sigma_6^{\text{см}}$, $\sigma_b^{\text{см}}$), не превысил 2%. Дальнейший анализ прочностных характеристик и коэффициента Рамберга – Осгуда проводили по средним значениям группы.

По результатам испытаний на растяжение (рис. 2) прослеживается небольшое повышение прочностных характеристик (на $\sim 3\%$) с увеличением толщины листа при всех направлениях вырезки образцов. Для каждой исследуемой толщины наблюдается обратная анизотропия, характерная для алюминий-литиевых сплавов [17]: условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_b листов в направлении ПП выше, чем в направлении НП (на 3 и 6 % соответственно). Образцы обеих толщин, вырезанные в направлении 45° к прокату листа, обладают меньшими значениями прочностных характеристик $\sigma_{0,01}$, $\sigma_{\text{пл}}$, $\sigma_{0,2}$, чем вырезанные в направлениях НП и ПП (на $\sim 12\%$ меньшими, чем в направле-

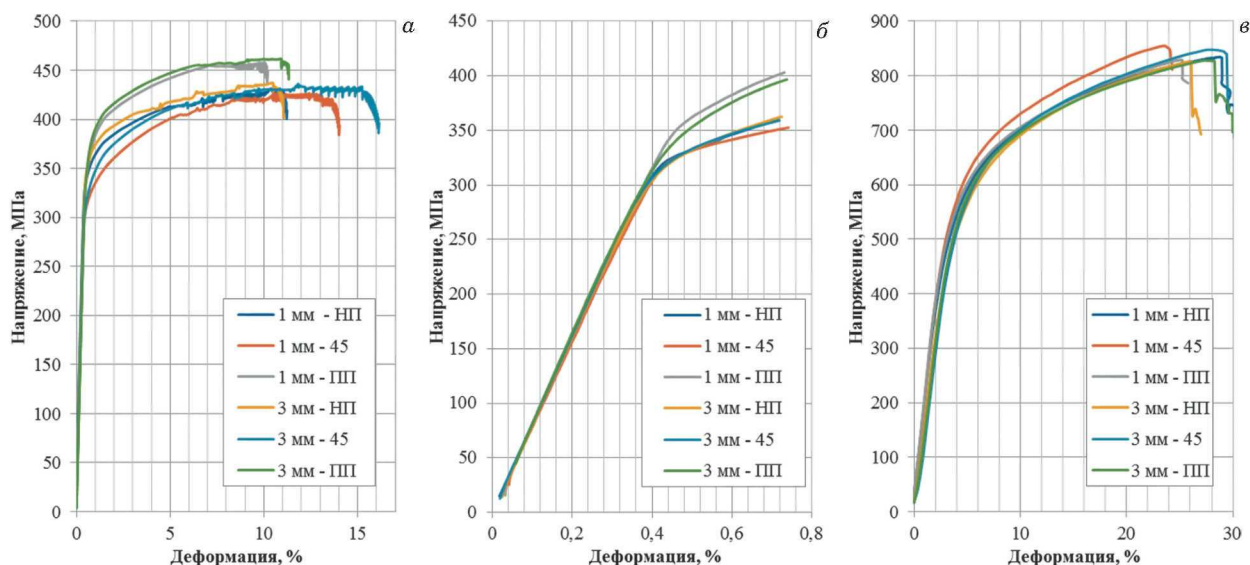


Рис. 1. Типичные диаграммы деформирования образцов при температуре +20 °C: *a* — на растяжение; *б* — на сжатие; *в* — на смятие

Fig. 1. Typical deformation diagrams of specimens at a temperature of +20 °C under: *a* — tension; *b* — compression; and *c* — bearing

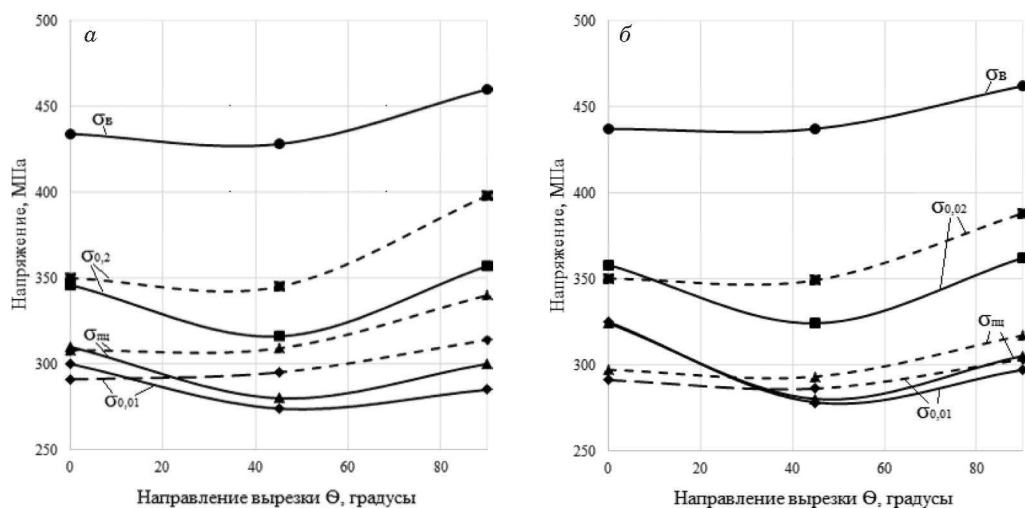


Рис. 2. Средние значения механических характеристик полуфабрикатов при растяжении (—) и сжатии (---) при температуре +20 °C: *a* — лист 1 мм; *б* — лист 3 мм

Fig. 2. Average values of the mechanical characteristics of semi-finished products under tension (—) and compression (---) at a temperature of +20 °C: *a* — 1-mm sheet; *b* — 3-mm sheet

нии НП). При этом данная закономерность не сохраняется для временного сопротивления $\sigma_{\text{в}}$.

При испытании на сжатие характер начального пластического деформирования меняется по сравнению с испытанием на растяжение (см. рис. 1, *a*, *б*). Для обеих толщин листов характеристики $\sigma_{0,01}^{\text{с}}$, $\sigma_{\text{пл}}^{\text{с}}$, $\sigma_{0,2}^{\text{с}}$ в направлении 45° к прокату находятся на уровне аналогичных характеристик в направлении НП. В направлении ПП наблюдается более высокий уровень свойств, например, $\sigma_{0,2}^{\text{с}}$ на 12 % выше, чем в направлении НП.

При этом для направлений 45 и ПП сохраняется одинаковая тенденция к росту характеристик при переходе от растяжения к сжатию: отношение прочностных характеристик при сжатии к аналогичным характеристикам при растяжении $\sim 1,08$. Для направления НП отношение характеристик обратное — $\sim 0,91 - 1,00$.

Часто для прочностных расчетов отсутствуют необходимые характеристики материала, определенные экспериментально. Эти характеристики могут быть получены пересчетом. Например [2],

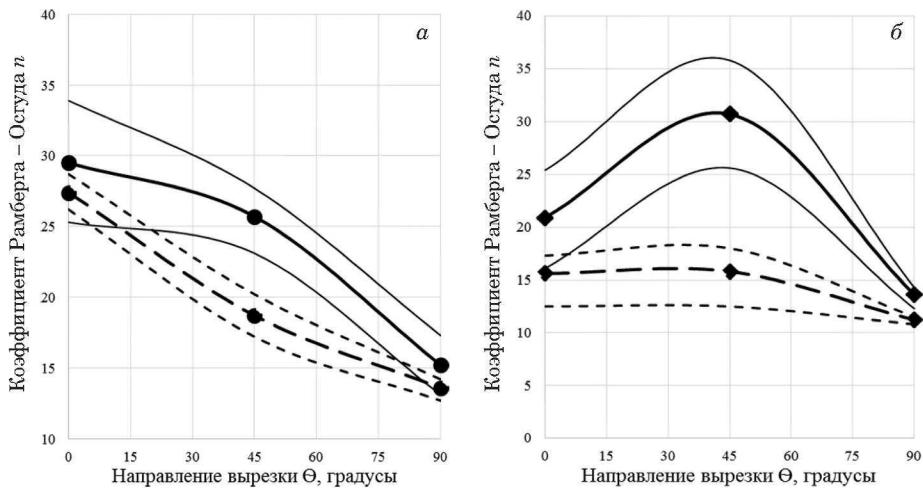


Рис. 3. Средние значения коэффициента Рамберга – Осгуда и разброс значений для листов 1 (—) и 3 мм (---); а — при растяжении; б — при сжатии

Fig. 3. The average values and range of the Ramberg – Osgood coefficient for sheets 1 (—) and 3 mm (---) under: а — tension; б — compression

для ряда сплавов и сталей условный предел текучести при сжатии определяют по формуле

$$\sigma_{0,2}^c = k\sigma_{0,2}, \tag{6}$$

где k — коэффициент пропорциональности, принимаемый равным 0,98 для алюминиевых сплавов, 0,97 — для титановых сплавов, 0,93 — для сталей.

При испытаниях на растяжение и сжатие листов алюминий-литиевого сплава 1441PT1 получены коэффициенты пропорциональности k , приведенные в табл. 1. Данные результаты подтверждают, что пересчет характеристик сжатия через единый коэффициент для всех направлений проката может вносить существенную ошибку в последующие прочностные расчеты.

Анализ значений коэффициентов Рамберга – Осгуда при растяжении показал, что по мере отклонения вырезки образцов от направления проката наблюдается общая тенденция его снижения (рис. 3, а). Данная закономерность не сохраняется для образцов на сжатие, вырезанных в направлении НП (рис. 3, б). Наибольшее рассеяние значений коэффициента при испытаниях на

сжатие проявляется для листа 1 мм, что может быть связано с нелинейностью упругого деформирования, инициированной начальными этапами потери устойчивости образца.

У образцов листов обеих толщин, вырезанных в направлении ПП, наблюдается наименьший разброс коэффициента n как при растяжении, так и при сжатии. Это указывает на большую стабильность начала пластического течения в данном направлении и потенциально меньший разброс характеристик малоциклового усталости. Последнее наиболее важно при расчетах конструкции, поскольку рассеяние характеристик усталости, выраженное в виде дисперсии логарифма долговечности, определяет коэффициент запаса (редукционный коэффициент).

Характеристики смятия (σ_2^{cm} , σ_4^{cm} , σ_6^{cm} , σ_B^{cm}) для всех направлений проката обеих толщин исследуемых листов находятся примерно на одном уровне — их разница для толщин не превышает 2 %, для направлений — 4 % (рис. 4, а). Наиболее высокими прочностными свойствами обладает направление 45.

Степенной коэффициент n^{cm} для уравнения (2), аппроксимирующего диаграммы при смятии, по сравнению с коэффициентами Рамберга – Осгуда для растяжения и сжатия меняется несущественно для всех исследуемых направлений вырезки и толщин полуфабрикатов (рис. 4, б). Эти особенности связаны со сложным напряженно-деформированным состоянием образца при испытании на смятие. В отличие от растяжения и сжатия, когда образец подвергается одноосному нагружению и одинаковому по сечению его рабочей части напряженно-деформированному состоянию, образец при смятии нагружается не-

Таблица 1. Коэффициент пропорциональности k для листов алюминий-литиевого сплава 1441PT1

Table 1. Coefficient k for sheets of 1441PT1 aluminum-lithium alloy

Толщина листа из сплава 1441PT1, мм	Направление вырезки образцов относительно проката		
	НП	45	ПП
1	1,01	1,09	1,11
3	0,98	1,08	1,07

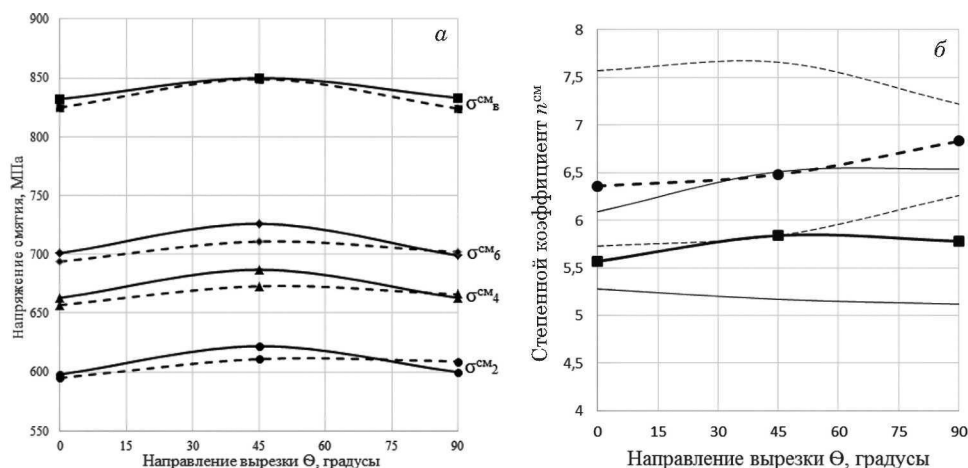


Рис. 4. Средние значения механических характеристик смятия при температуре +20 °С для листов 1 (—) и 3 мм (---): *a* — прочностные характеристики образцов; *b* — значения степенного коэффициента ($n_{с}$) и разброс значений

Fig. 4. Average values of the mechanical characteristics in bearing test at a temperature of +20 °C for 1 (—) and 3 mm (---) sheets: *a* — strength characteristics of specimens; *b* — values of the power coefficient ($n_{с}$) and spread of the values

равномерно по сечениям. Напряженно-деформированное состояние при смятии представляет собой сочетание разнонаправленных напряжений: сжимающих — под сминающим стержнем, растягивающих — по краям образца и касательных — по границам между ними [18]. Поэтому характеристика материала при смятии представляет собой интегральную величину его механических свойств во всех направлениях.

По результатам испытаний на растяжение образцов, вырезанных в трех направлениях (НП, 45, ПП) из листов толщиной 1 и 3 мм из сплава 1441РТ1, при температурах от -70 до +125 °С (рис. 5) установлено, что повышение температуры испытаний практически не оказывает влияния на прочностные характеристики материала с малой степенью пластической деформации: изменения $\sigma_{0,01}$ составляют менее 6 %, изменения $\sigma_{0,2}$ — менее 2 %. Наиболее значительно температура испытаний сказывается на σ_b — с повышением температуры данная характеристика снизилась на ~10 %.

В отличие от механических свойств полуфабрикатов, определяемых при малой пластической деформации ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,01}$), коэффициент Рамберга – Осгуда понижается с увеличением температуры испытаний от -70 до +125 °С (рис. 6).

Для параметрического описания зависимости коэффициента Рамберга – Осгуда, полученного при растяжении, от направления вырезки образцов относительно проката использовали тригонометрические функции. При этом связь коэффициента Рамберга – Осгуда для каждой температуры и функции косинуса с аргументом в виде угла между направлением проката и направле-

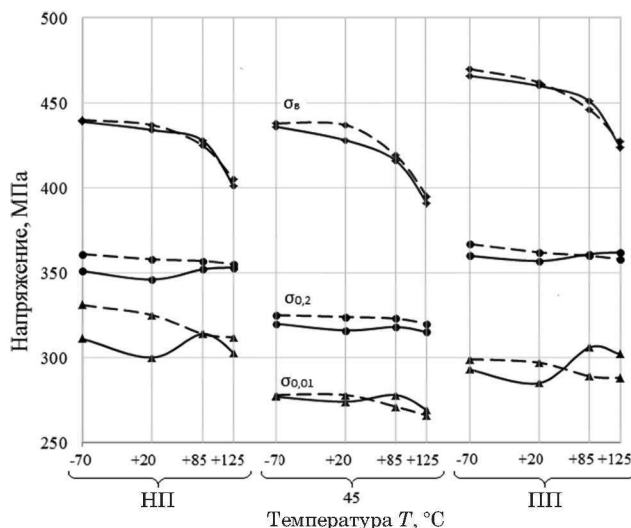


Рис. 5. Средние значения механических характеристик из листов 1 (—) и 3 мм (---) при растяжении при температурах -70, +20, +85, +125 °С

Fig. 5. Average values of the mechanical characteristics of 1 (—) and 3 mm sheets (---) of 1441RT1 alloy under tension at temperatures of -70, +20, +85, +125 °C

нием вырезки характеризуется линейной зависимостью, выраженной формулой

$$n_i = A_i \cos(\theta + \alpha_i) + B_i, \quad (7)$$

где i — индекс полуфабриката (i равно 1 и 2 для листов 1 и 3 мм); θ — угол между направлением проката и направлением вырезки образца (θ равно 0, 45 и 90° для направлений соответственно НП и ПП; α_i — константа смещения ($\alpha_1 = 0$ — для листа 1 мм; $\alpha_2 = \pi/2$ — для листа 3 мм); A_i и B_i — коэффициенты уравнения.

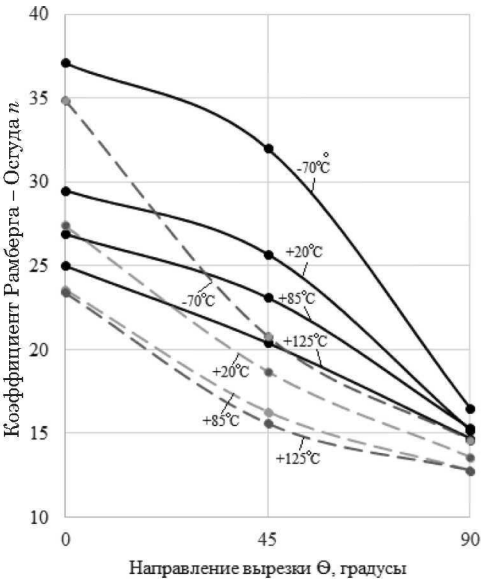


Рис. 6. Средние значения коэффициента Рамберга – Осгуда образцов из листов 1 (—) и 3 мм (---) при растяжении при температурах -70, +20, +85, +125 °C

Fig. 6. Average values of the Ramberg – Osgood coefficient of 1 (—) and 3 mm (---) sheet specimens under tension at a temperature of -70, +20, +85, +125 °C

Параметрическую связь коэффициентов уравнения с направлением вырезки и температурой испытаний определяли следующим образом.

С помощью метода наименьших квадратов при фиксированной температуре находили неизвестные коэффициенты A_i и B_i для каждого полуфабриката. При этом регрессионный анализ

данных с достоверностью аппроксимации $R^2 \geq 0,97$ позволил установить, что изменение коэффициентов A_1 и A_2 от направления вырезки одинаково.

Логарифмы коэффициентов A (среднее между A_1 и A_2), B_1 и B_2 связаны с температурой линейно ($R^2 \geq 0,92$), поэтому дальнейший регрессионный анализ проводили в форме

$$C_i = D_i \exp(E_i T), \tag{8}$$

где T — температура испытаний, °C; C_i — коэффициенты A , B_1 и B_2 из уравнения (7); D_i , E_i — коэффициенты уравнения (при $i = 1$ для A ; i равно 2 и 3 для B_1 и B_2).

С учетом найденных коэффициентов определены параметрические связи коэффициента Рамберга – Осгуда с направлением вырезки образца относительно направления проката и с температурой испытаний для листов сплава 1441РТ1 толщиной 1 и 3 мм соответственно:

$$n(\theta, T) = 16,2e^{-0,0019T}(\cos(\theta) + 1), \tag{9}$$

$$n(\theta, T) = 16,2e^{-0,0019T}(\cos(\theta + \pi/2) + 1,88). \tag{10}$$

Для сравнения в табл. 2 приведены значения коэффициента n , рассчитанные по уравнениям (9) и (10), и полученные по диаграммам деформирования. Повышение температуры оказывает наибольшее влияние на изменение коэффициента Рамберга – Осгуда в направлении НП и практически не влияет на него в направлении ПП. С точки зрения механики кристаллитов [19] ко-

Таблица 2. Значения коэффициента Рамберга – Осгуда для листов 1 и 3 мм, для разных температур и направлений вырезки образцов, полученные при испытаниях и расчетом по формулам (9) и (10) соответственно

Table 2. Values of the Ramberg-Osgood coefficient for 1- and 3-mm sheets for different temperatures and directions of specimen cutting obtained during tests and calculations by formulas (9) and (10), respectively

T, °C	Θ, град.	Лист 1 мм			Лист 3 мм		
		Экспериментальные данные		Расчет по (9)	Экспериментальные данные		Расчет по (10)
		n	S	n	n	S	n
-70	0	37,1	5,16	37,0	34,9	1,32	34,8
-70	45	32,0	3,81	31,6	20,8	0,96	21,7
-70	90	16,5	0,90	18,5	14,6	0,48	16,3
+20	0	29,5	2,54	31,2	27,4	0,61	29,3
+20	45	25,7	1,19	26,6	18,7	0,89	18,3
+20	90	15,2	1,12	15,6	13,6	0,38	13,7
+85	0	26,9	0,61	27,6	23,6	0,59	25,9
+85	45	23,1	0,72	23,5	16,3	0,29	16,2
+85	90	15,3	0,99	13,8	12,8	0,34	12,1
+125	0	25,0	1,48	25,6	23,4	0,74	24,0
+125	45	20,4	0,55	21,8	15,6	0,31	15,0
+125	90	14,7	1,09	12,8	12,8	0,26	11,2

Примечание. S — среднеквадратическое отклонение.

эффицент Рамберга – Осгуда должен описывать скорость включения объемов разноориентированных кристаллов в пластическую деформацию (по механизму сдвига) при заданных условиях деформирования материала. Повышение температуры воздействия на материал изменяет характер начала пластического течения. Полученные результаты свидетельствуют о лучшей стабильности материала в направлении ПП и меньшей устойчивости к температурному воздействию в направлениях НП и 45°.

При этом на уровень коэффициента будет влиять наличие той или иной характерной текстуры, сформированной при различных технологиях получения полуфабрикатов, в нашем случае — при прокатке. Микроструктурный анализ не выявил анизотропию, размер зерна в направлениях НП и ПП одинаковый для обеих толщин: 12,61 и 12,66 мкм — для толщины 1 мм; 12,98 и 13,21 мкм — для толщины 3 мм.

Характеры кристаллографических текстур для листов толщиной 1 и 3 мм схожие и отличие заключается в разном соотношении текстурных компонент (рис. 7). Кристаллографическая тек-

стура позволяет оценить характер анизотропии механических свойств, связанной с анизотропной природой кристаллической решетки отдельных кристаллитов. Предельные случаи — острая текстура, при которой анизотропия максимальна, стремящаяся к состоянию монокристалла, и рассеянная текстура, при которой расположение кристаллитов случайное, позволяющая получить изотропное состояние материала. Соответствие обратных полюсных фигур распределению фактора Тейлора позволяет провести анализ характера анизотропии механических свойств.

Величины интегрального фактора Тейлора для одинаковых направлений вырезки имеют близкие значения для разных листовых полуфабрикатов (рис. 8, а), что закономерно исходит из схожести текстурного состояния. Поперек направления прокатки значения фактора Тейлора для обеих толщин листов самые высокие, а при направлении 45° — наименьшие, что указывает на вероятную связь с характеристиками прочности. По определению интегральный фактор Тейлора характеризует общую величину напряжений, приводящих к пластическому деформирова-

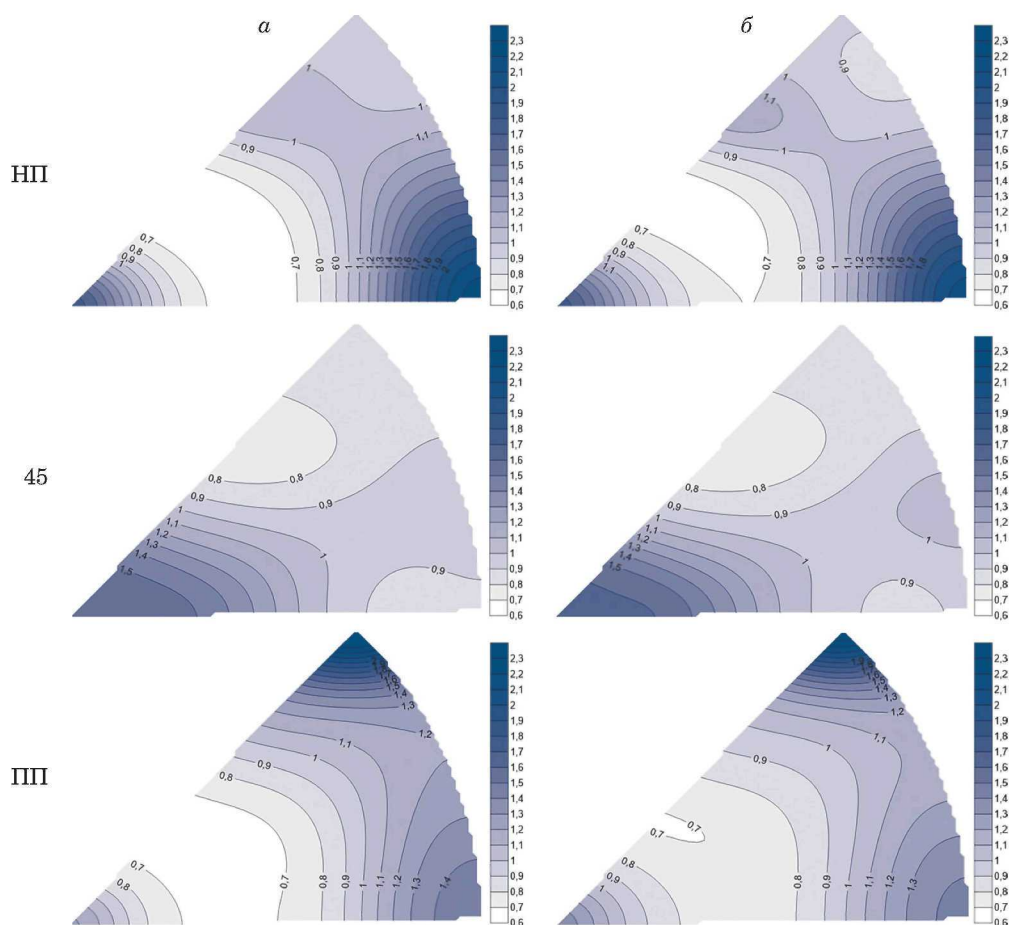


Рис. 7. Обратные полюсные фигуры для листов 1 (а) и 3 мм (б) для внешних направлений НП, 45°, ПП

Fig. 7. Inverse pole figures for 1 (a) and 3 mm (b) sheets for external directions L, 45°, LT

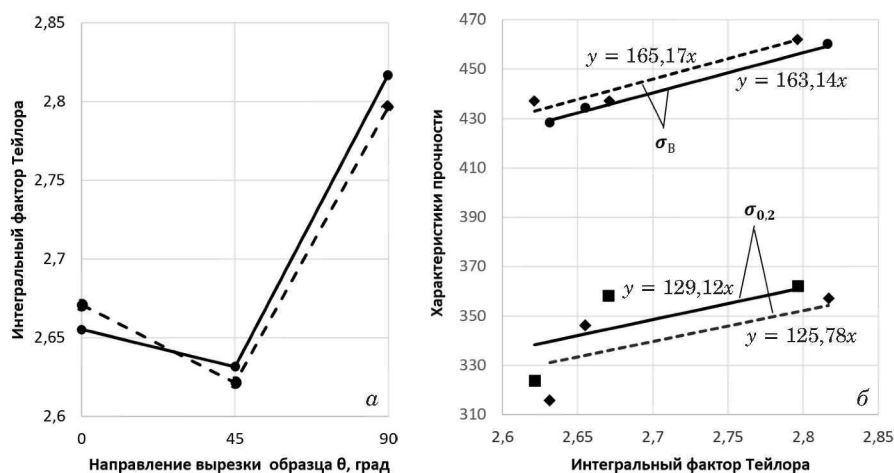


Рис. 8. Связь интегрального фактора Тейлора для листов толщиной 1 (—) и 3 мм (---) с направлением вырезки образцов (а) и характеристиками прочности $\sigma_{0.2}$ и σ_B (б), где линии — аппроксимации по формуле (5)

Fig. 8. Correlation of the integral Taylor factor for 1 (—) and 3-mm (---) sheets with the: а — direction of specimen cutting; б — strength characteristics $\sigma_{0.2}$ and σ_B (lines mark approximations by formula (5))

нию всего объема разноориентированных кристаллитов. Поэтому связь с характеристиками начала пластического течения (в частности, с $\sigma_{0.01}$ и $\sigma_{0.2}$), когда необратимые деформации наблюдаются во всем макрообъеме материала, должна быть более выражена, чем для случая окончательного этапа равномерного пластического деформирования (в области напряжений временного сопротивления σ_B), когда текстурное состояние материала максимально отличается от первоначального. Однако наблюдается обратная зависимость (рис. 8, б), где постоянство напряжения сдвига, вычисленное по интегральному фактору Тейлора в соответствии с формулой (5), наиболее выражено для временного сопротивления; достоверность аппроксимации R^2 по нелинейному методу наименьших квадратов для $\sigma_{0.2}$ равна 0,56 – 0,58, а для σ_B — 0,92 – 0,99). Другой подход [13, 15], связывающий текстуру с начальными этапами пластического течения и заключающийся в нормировании пределов текучести и интегральных факторов Тейлора на соответствующие величины по направлению 45, также не подтвердил наличие корреляции для исследованных листовых полуфабрикатов.

Заключение

Прочностные характеристики при растяжении, сжатии, смятии листов толщиной 1 и 3 мм алюминий-литиевого сплава 1441PT1 системы Al – Cu – Mg – Li изменяются по-разному в зависимости от направления вырезки образцов (НП, 45, ПП) относительно направления проката. Поэтому пересчет недостающих характеристик через единый коэффициент пропорциональности, а также распространение закономерностей изме-

нения диаграмм растяжения, сжатия и смятия для конкретного направления вырезки образцов на остальные направления могут вносить ошибку в последующие прочностные расчеты. Выявлена зависимость между кристаллографической текстурой и временным сопротивлением при растяжении образцов, вырезанных в различных направлениях проката.

Для получения коэффициента Рамберга – Осгуда по результатам механических испытаний предложен оптимальный алгоритм расчета, который включает регрессионный анализ диаграмм деформирования по трем неизвестным. Это позволяет исключить из расчетов влияние нелинейности, возникающей при начальном нагружении образца или при переходе к его упругопластическому деформированию.

С ростом температуры воздействия механические свойства полуфабрикатов в области малых пластических деформаций ($\sigma_{0.01}$, $\sigma_{0.2}$) остаются практически неизменными, а коэффициент Рамберга – Осгуда понижается. При этом характер снижения коэффициента для каждого направления вырезки образцов и толщины листа индивидуален. Наименьшее влияние температуры на значения и разброс коэффициента Рамберга – Осгуда установлено в направлении поперек проката. Показано, что для полного описания механических свойств материала в области малых пластических деформаций, помимо традиционных характеристик, необходимо определять указанный коэффициент.

Предложено уравнение, связывающее коэффициент Рамберга – Осгуда для двух полуфабрикатов сплава 1441PT1 (листов толщиной 1 и 3 мм) с направлением вырезки образцов и с температурой испытаний. Расчет по уравнениям по-

зволит прогнозировать динамику пластического деформирования полуфабриката до предела текучести для всех направлений нагружения относительно направления проката в диапазоне температур от -70 до $+125$ °C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Антипов В. В., Ключкова Ю. Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмо-стеклопластики на их основе / Цветные металлы. 2016. № 8(884). С. 86 – 91.
2. Авиационный справочник. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов. Вып. 4. — М.: ОАК, 2012. С. 302.
3. Коновалов В. В. Методология аттестации конструкционных металлических материалов планера самолета / Труды ЦАГИ. 2013. Вып. 2725. С. 214.
4. Гриневич А. В., Лаптев А. Б., Скрипачев С. Ю., Нужный Г. А. Матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов / Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2(51). С. 67 – 74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74
5. Kulak G. L., Fischer J. W., Struik J. H. A. Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints. — John Wiley & Sons Inc., 2001. — 352 p.
6. Александрова О. В., Маркочев В. М. Математическое описание диаграмм деформирования / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 4. С. 49 – 53.
7. Avtaev V. V., Yakovlev N. O. Digital Image Correlation Method Study of the Static Fracture Toughness and the Fracture Strength of a Thin-Sheet Aluminum Alloy / Russian Metallurgy. 2020. N 10. P. 1207 – 1212. DOI: 10.1134/S0036029520100043
8. Ерасов В. С., Яковлев Н. О., Нужный Г. А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 3. С. 440 – 448.
9. Ramberg W., Osgood W. R. Description of stress-strain curves by three parameters. NACA Technical Note, 902 (1943).
10. Atlas of stress-strain curves. 2nd ed. — USA: ASM International, 2002. P. 816.
11. Metallic materials properties development and standardization (MMPDS-02). 2005. P. 1826.
12. Nieslony A., Dsoki C., Kaufmann H., Krug P. New method for evaluation of the Manson – Coffin – Basquin and Ramberg – Osgood equations with respect to compatibility / International Journal of Fatigue. 2008. N 30. P. 1967 – 1977.
13. Фридляндер И. Н., Шамрай В. Ф., Бабарэко А. А. и др. Текстура листа из сплава 1430 системы Al – Li-Mg – Cu и анизотропия его предела текучести / Металлы. 1999. № 2. С. 79 – 84.
14. Ключкова Ю. Ю., Ключков Г. Г., Романенко В. А., Попов В. И. Структура и свойства листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 / Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4. С. 3 – 8. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-3-8
15. Бетофен С. Я., Антипов В. В., Князев М. И., Оглодков М. С. Исследование влияния термической обработки на фазовый состав, текстуру и механические свойства сплава В-1461 системы Al – Cu – Li / Металлы. 2015. № 6. С. 77 – 84.
16. Сулимина Я. В., Яковлев Н. О., Ерасов В. С. и др. Современные методики испытаний металлических материалов на смятие / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 7. С. 41 – 49. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-7-41-49
17. Guo X., Zhang S., Ma Y., et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al – Li alloys: A review / Journal Of Advanced Research. 2018. Vol. 10. P. 49 – 67.
18. Ерасов В. С., Нужный Г. А. Определение характеристик смятия при механических испытаниях / Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 1. С. 14 – 21.
19. Штремель М. А. Прочность сплавов. Часть II. Деформация: учебник для вузов. — М.: МИСиС, 1997. — 527 с.

REFERENCES

1. Kablov E. N., Antipov V. V., Klochkova Yu. Yu. Aluminum-lithium alloys of a new generation and laminated aluminum-fiberglass based on them / Tsvet. Met. 2016. N 8(884). P. 86 – 91 [in Russian].
2. Aviation directory. Calculated values of characteristics of aviation metal structural materials. Issue 4. — Moscow: OAK, 2012. P. 302 [in Russian].
3. Kononov V. V. Certification methodology of the airframe structural metal materials / Tr. TsAGI. 2013. Issue 2725. P. 214 [in Russian].
4. Grinevich A. V., Laptev A. B., Skripachev S. Y., Nuzhnyi G. A. A matrix of strength characteristics for assessing the limiting states of structural metal materials / Aviats. Mater. Tekhnol. 2018. N 2(51). P. 67 – 74 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74
5. Kulak G. L., Fischer J. W., Struik J. H. A. Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints. — John Wiley & Sons Inc., 2001. — 352 p.
6. Aleksandrova O. V., Markochev V. M. Mathematical description of deformation diagrams / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2003. Vol. 69. N 4 [in Russian].
7. Avtaev V. V., Yakovlev N. O. Digital Image Correlation Method Study of the Static Fracture Toughness and the Fracture Strength of a Thin-Sheet Aluminum Alloy / Russian Metallurgy. 2020. N 10. P. 1207 – 1212. DOI: 10.1134/S0036029520100043
8. Erasov V. S., Yakovlev N. O., Nuzhnyi G. A. Qualification tests and the study of aviation materials strength / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N 3. P. 440 – 448 [in Russian].
9. Ramberg W., Osgood W. R. Description of stress-strain curves by three parameters. NACA Technical Note, 902 (1943).
10. Atlas of stress-strain curves. 2nd ed. — USA: ASM International, 2002. P. 816.
11. Metallic materials properties development and standardization (MMPDS-02). 2005. P. 1826.
12. Nieslony A., Dsoki C., Kaufmann H., Krug P. New method for evaluation of the Manson – Coffin – Basquin and Ramberg – Osgood equations with respect to compatibility / International Journal of Fatigue. 2008. N 30. P. 1967 – 1977.
13. Fridlyander I. N., Shamrai V. F., Babareko A. A., et al. The sheet of alloy 1430 of the Al – Li – Mg – Cu system texture and the anisotropy of its yield strength / Metally. 1999. N 2. P. 79 – 84 [in Russian].
14. Klochkova Yu. Yu., Klochkov G. G., Romanenko V. A., Popov V. I. Structure and properties of sheets from high-strength aluminum-lithium alloy V-1469 / Aviats. Mater. Tekhnol. 2015. N 4. P. 3 – 8 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-3-8
15. Betsofen S. Ya., Antipov V. V., Knyazev M. I., Oglodkov M. S. Influence research of heat treatment on the alloy V-1461 of the Al – Cu – Li system phase composition, texture and mechanical properties / Metally. 2015. N 6. P. 77 – 84 [in Russian].
16. Sulimina Ya. V., Yakovlev N. O., Erasov V. S., et al. The modern methods of pin-type bearing test of metallic materials / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 7. P. 41 – 49 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-7-41-49
17. Guo X., Zhang S., Ma Y., et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al – Li alloys: A review / Journal Of Advanced Research. 2018. Vol. 10. P. 49 – 67.
18. Erasov V. S., Nuzhnyi G. A. Determination of the pin-type bearing characteristics at mechanical tests / Vse Mater. Éntsikloped. Sprav. 2012. N 1. P. 14 – 21 [in Russian].
19. Shtremel M. A. The alloys strength. Part 2. Deformation. — Moscow: MISiS, 1997. — 527 p. [in Russian].