

УДК 621.771

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1461

© 2019 Я.А. Ерисов<sup>1,2</sup>, Ф.В. Гречников<sup>1</sup>, А.Ф. Гречникова<sup>2</sup><sup>1</sup> Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 23.10.2019

Проведены экспериментальные исследования влияния режимов прокатки и термической обработки листов из сплава В-1461 на структуру и механические свойства. Экспериментальная прокатка проводилась по следующим маршрутам: горячая прокатка – предварительная термообработка (отжиг или закалка) – холодная прокатка – окончательный отжиг. На основании проведенных исследований можно однозначно сказать, что промежуточный отжиг перед холодной прокаткой положительно влияет на механические свойства как холоднокатаных, так и отожженных листов из сплава В-1461.

*Ключевые слова:* прокатка, температура нагрева, обжатие, термообработка, алюминий-литиевый сплав В-1461, структура, механические свойства.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной трудностью, препятствующей широкому распространению алюминий-литиевых сплавов является их низкая технологичность при обработке давлением. Литий образует с алюминием дисперсоиды вида  $Al_3Li$ , которые при термомеханической обработке сдерживают процесс рекристаллизации, что приводит к снижению пластичности и, в целом, существенно осложняет управление структурой и свойствами листов. Во многих работах отмечено, что заготовки из алюминий-литиевых сплавов имеют нерекристаллизованную структуру с сильно вытянутыми, крупными зёрнами [1-2].

Исследования технологической пластичности алюминий-литиевых сплавов производились как на установках физического моделирования типа Gleeble [1, 3-7], так и моделированием конкретных процессов (прокатки или прессования) в лабораторных условиях [1, 8-14].

Изучение поведения сплавов при изотермической осадке или одноосном растяжении показало, что кривые «истинное напряжение

– истинная деформация» принципиально не отличаются от тех, которые можно получить при испытании алюминиевых сплавов [15]. На кривых также наблюдаются стадия упрочнения и стадия динамического равновесия. Преимущественный способ разупрочнения алюминий-литиевых сплавов в условиях горячей деформации – динамический возврат, а при повышении температуры и снижении скорости деформации – динамическая рекристаллизация [3, 4, 6].

В работе [3] показано, что наиболее благоприятные условия деформирования сплава 2099 создаются при температуре 400°C и скорости 0,001 с<sup>-1</sup>. Авторы работы [4], по результатам испытаний сплава состава Al-3.5%Cu-1.5%Li-0.10%Sc-0.12%Zr, предлагают более широкий интервал деформирования: температура 460-500°C и скорости деформации 0,001 – 0,1 с<sup>-1</sup>, что соответствует динамической рекристаллизации исследованного сплава. Аналогичный интервал указывается в работе [6] для сплава состава Al-3.2%Cu-1.6%Li-0.5%Zn-0.4%Mg-0.3%Mn-0.12%Zr.

В целом, все исследования методами физического моделирования проводятся в похожих условиях и дают схожие результаты, из которых следует, что чем выше температура и ниже скорость деформации, тем более склонен сплав к динамической рекристаллизации. Повышение же скорости деформации даже при высоких температурах способствует интенсивному накоплению дислокаций при уменьшении времени для их перераспределения и аннигиляции. В таких условиях единственным способом разупрочнения остается динамический возврат [4].

*Ерисов Ярослав Александрович, кандидат технических наук, доцент; инженер отдела металлофизики авиационных материалов СамНЦ РАН.*

*E-mail: Yaroslav.erisov@mail.ru*

*Гречников Федор Васильевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор; главный научный сотрудник – заместитель директора СамНЦ РАН.*

*E-mail: fgrech@ssc.smr.ru*

*Гречникова Анна Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением.*

*E-mail: anna\_gr17@yahoo.com*

Наиболее востребованным видом алюминиевых полуфабрикатов является плоский прокат. При этом скорость деформации при прокатке промышленным способом превышает  $10 \text{ с}^{-1}$ . В рассмотренных выше работах отмечается нестабильность течения металла при данной скорости, что, в основном, связано с особенностями физического моделирования на установках типа Gleeble.

С этой точки зрения актуальным является исследование конкретных процессов обработки давлением (прокатки, прессования) в лабораторных условиях. Температурно-скоростные условия испытаний в этом случае более приближены к реальным, промышленным условиям. В основном, подобные исследования посвящены изучению текстурообразования, так как острая текстура деформации и, как следствие, сильная анизотропия свойств ограничивают широкое применение алюминий-литиевых сплавов [8-10].

Поведение алюминий-литиевых сплавов при горячей прокатке аналогично поведению алюминиевых сплавов прочных и высокопрочных серий (2xxx и 7xxx), которые также не склонны к спонтанной рекристаллизации после горячей прокатки [1]. В работе [8] основной причиной выраженной анизотропии свойств называется преобладание текстуры латуни в большинстве промышленных алюминий-литиевых сплавов. Для уменьшения текстуры латуни в горячекатаных плитах предлагается снизить температуру прокатки в реверсивной клети и уменьшить обжатия при поперечной прокатке.

Авторы работы [11] исследовали полный цикл производства холоднокатаных листов из сплава, по составу близкого к марке 8090. Установлено, что текстура неоднородна по толщине – на любой стадии производства, включая холодную прокатку, текстура в середине толщины образцов в 2-3 раза более острая, чем текстура поверхности. При горячей прокатке рекристаллизации не происходит, текстура деформационного типа. Термообработка (нагрев до  $535^\circ\text{C}$ , выдержка 30 мин, охлаждение в воду) снижает интенсивность текстуры деформации и приводит к частичной рекристаллизации. В процессе последующей холодной прокатки текстура усиливается, а после промежуточной закалки, соответственно, ослабляется.

Во всех рассмотренных случаях, в алюминий-литиевых сплавах формируются типичные ориентировки текстуры деформации (S и Bs), объемная доля которых зависит от степени накопленной деформации. При повышении температуры обработки преобладающей становится текстура латуни, которая остается стабильной даже при последующем отжиге [16].

В большинстве случаев в лабораторных условиях алюминий-литиевые сплавы успешно де-

формируются в диапазоне температур  $300-500^\circ\text{C}$ , что связано с равномерностью распределения температуры по объему образца и реализацией одной конкретной схемы деформации (как правило, плосконапряженное состояние). В реальных производственных условиях это практически не достижимо. В работе [17] предлагается температурный интервал горячей прокатки сплава В-1469 –  $380-420^\circ\text{C}$ , схожий с интервалом горячей прокатки сплавов серий 2xxx и 7xxx. При исследовании сплава В-1461 [18] показано, что горячая прокатка при температуре  $420-440^\circ\text{C}$  приводит к неравномерному распределению деформации по толщине заготовки. В результате формируется тонковолокнистая нерекристаллизованная зеренная структура и острая текстура деформации, неоднородная по толщине. В работе [18] предлагается горячую прокатку производить в 2 этапа, причем температура второго этапа выше температуры первого этапа на  $40-60^\circ\text{C}$ .

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что режимы обработки алюминий-литиевых сплавов могут различаться довольно сильно, поэтому для уточнения режимов горячей и холодной прокатки сплава В-1461 проведены экспериментальные исследования.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на горячекатаных плитах толщиной 10 мм из алюминий-литиевого сплава В-1461 системы Al-Cu-Li-Mg-Zn, произведенных промышленным способом (степень суммарного обжатия – 96%).

Перед прокаткой карточки нагревались до температуры  $500-510^\circ\text{C}$  в воздушной печи. Температура карточек контролировалась по термопаре, зачеканенной с торца на глубину 10 мм. После достижения температуры  $500^\circ\text{C}$  по термопаре карточки выдерживались 10 минут для выравнивания температуры по объему металла. Разогретая карточка подавалась на стан, остывала до температуры прокатки  $460^\circ\text{C}$  и прокатывалась с абсолютным обжатием за проход 1-2 мм (табл. 1). На каждом проходе фиксировалось усилие и температура прокатки. Так как в процессе прокатки температура карточки значительно снижалась, то после каждого прохода ее нагревали до исходной температуры. Горячую прокатку проводили до толщины 5 мм (степень суммарного обжатия – 49,5%).

После горячей прокатки карточки подвергли термообработке по следующим режимам: 1) отжиг при температуре  $450^\circ\text{C}$  с выдержкой 30 минут, охлаждение на воздухе; 2) нагрев до  $530^\circ\text{C}$ , выдержка 30 минут, закалка в воду.

После термообработки проводилась холодная прокатка до толщины 1,4 мм с суммарным обжатием 70,8%. После прокатки часть образцов

Таблица 1. Параметры горячей прокатки на лабораторном стане

№ прохода	Толщина, мм		Степень обжатия, %	Скорость прокатки, м/мин	Скорость деформации, с <sup>-1</sup>	Температура, °С		Усилие прокатки, кН
	Начальная	Конечная				Начальная	Конечная	
1	9,5	7,8	18,0	24,5	5,3	460	397	276
2	7,8	5,5	29,5		7,6		440	371
3	5,5	4,8	12,7		5,9		385	209

отжигали при 450°С, выдержка 30 минут. Охлаждение после отжига производилось с печью для исключения частичной закалки металла.

Горячую и холодную прокатку проводили на комбинированном стане немецкой фирмы «DIMA Maschinen GmbH», который может быть переналажен в двух- (дуо) или четырех- (кварто) валковый стан. В данной работе прокатку осуществляли на стане в исполнении «дуо» (диаметр валков 240 мм).

Для анализа микроструктуры изготавливались шлифы продольного сечения образцов, которые подвергались последующему травлению в хлорном железе. Исследование проводилось на оптическом микроскопе Axiovert-40MAT.

Для изучения механических свойств (временного сопротивления  $\sigma_b$ , предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительного удлинения  $\delta$ ) вырезалось по три образца в направлении прокатки. Размеры образцов выбирались по ГОСТ 11701-84 и ГОСТ 1497-84 в зависимости от толщины листа. Испытания проводились на электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z005; скорость растяжения – 1 мм/мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура исходной горячекатаной плиты – нерекристаллизованная (рис. 1). В процессе дальнейшей горячей прокатки структура не изменяется. Термическая обработка после горячей

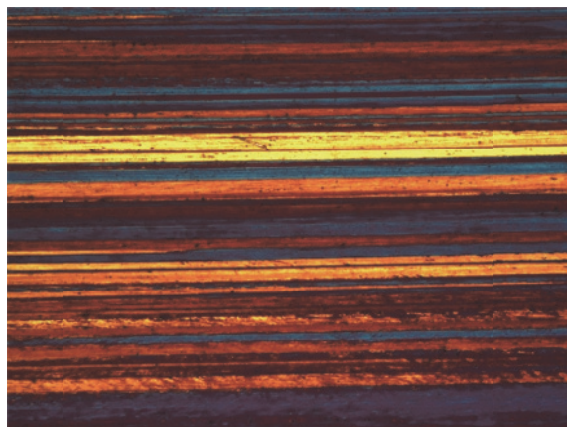


Рис. 1. Микроструктура исходной горячекатаной плиты из сплава В-1461 (масштаб 50:1)

прокатки также не позволяет получить рекристаллизованное состояние. Как после термообработки по режиму отжига, так и закалки наблюдается однородная по толщине волокнистую структуру без признаков начала рекристаллизации (рис. 2).

Влияние предварительной термообработки проявляется только после холодной прокатки листов из сплава В-1461. Так после холодной прокатки предварительно отожженных листов наблюдается равномерная волокнистая структура, типичная для сильнодеформированного металла (рис. 3). При холодной прокатке предварительно закаленных листов формируются полосы сдвига (рис. 4).

Холоднокатаные листы, подвергнутые предварительному отжигу, обладают большим запасом пластичности (табл. 2): относительное удлинение 2,0% по сравнению с практически нулевым относительным удлинением закаленных листов после холодной прокатки.

Предварительная термообработка оказывает влияние и на структуру и свойства холоднокатаных листов после окончательного отжига. Отжиг листов, полученных по маршруту: горячая прокатка – отжиг – холодная прокатка, приводит к полностью рекристаллизованной структуре с очень мелким равноосным зерном (рис. 5). Рекристаллизация в листах, полученных по маршруту: горячая прокатка – закалка – холодная прокатка, при окончательном отжиге не



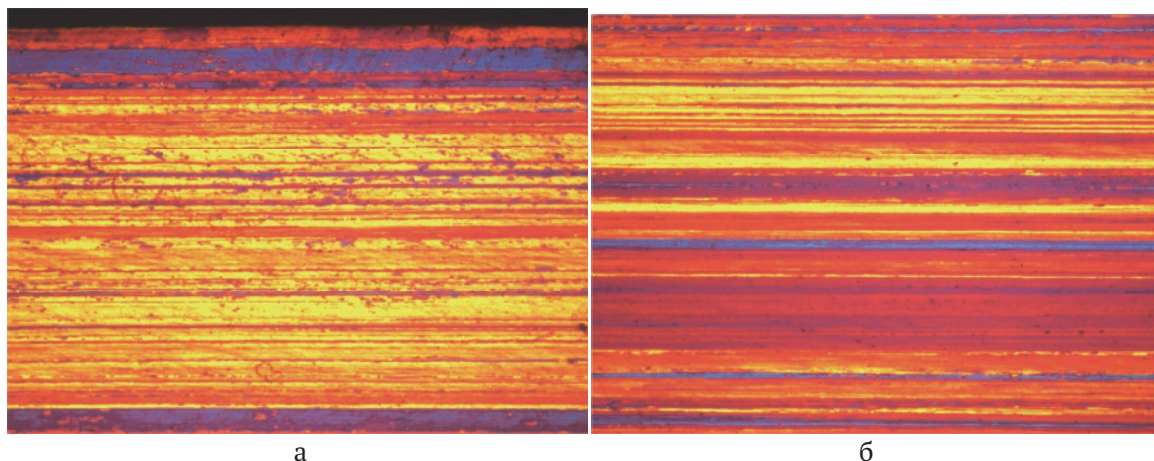


Рис. 2. Микроструктура листа из сплава В-1461 после горячей прокатки и закалки (масштаб 100:1): а – поверхность; б – середина толщины

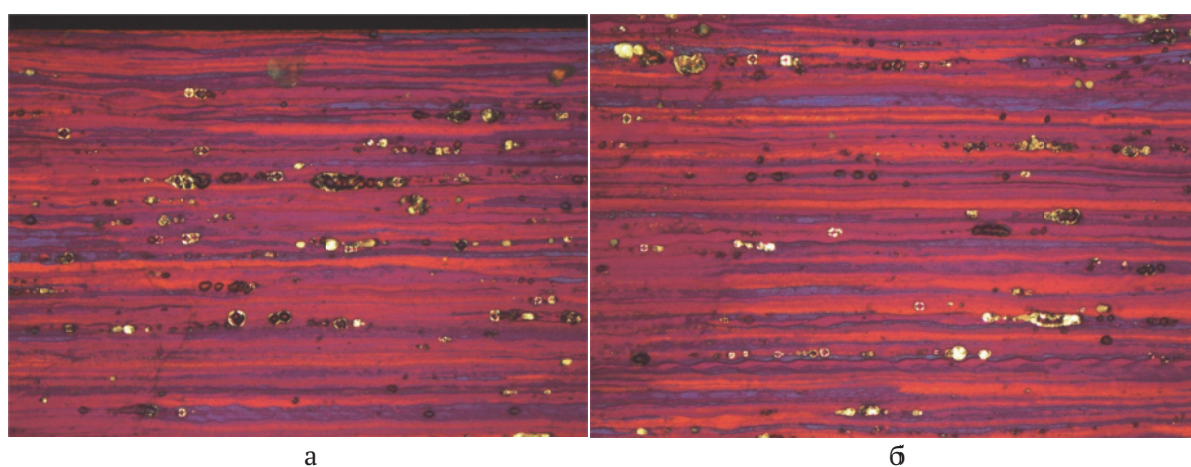


Рис. 3. Микроструктура отожженных листов из сплава В-1461 после холодной прокатки (масштаб 200:1): а – поверхность; б – середина толщины

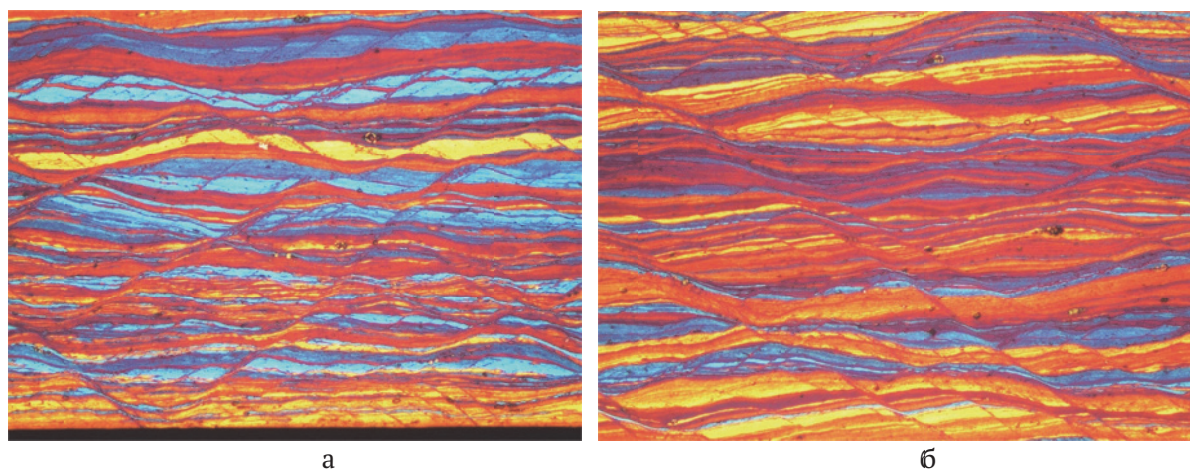


Рис. 4. Микроструктура закаленных листов из сплава В-1461 после холодной прокатки (масштаб 200:1): а – поверхность; б – середина толщины

протекает (рис. 6). Нечеткая, плохо выявившаяся структура этих листов свидетельствует о высоком уровне внутренней энергии в металле, т.е. высокой плотности дислокаций.

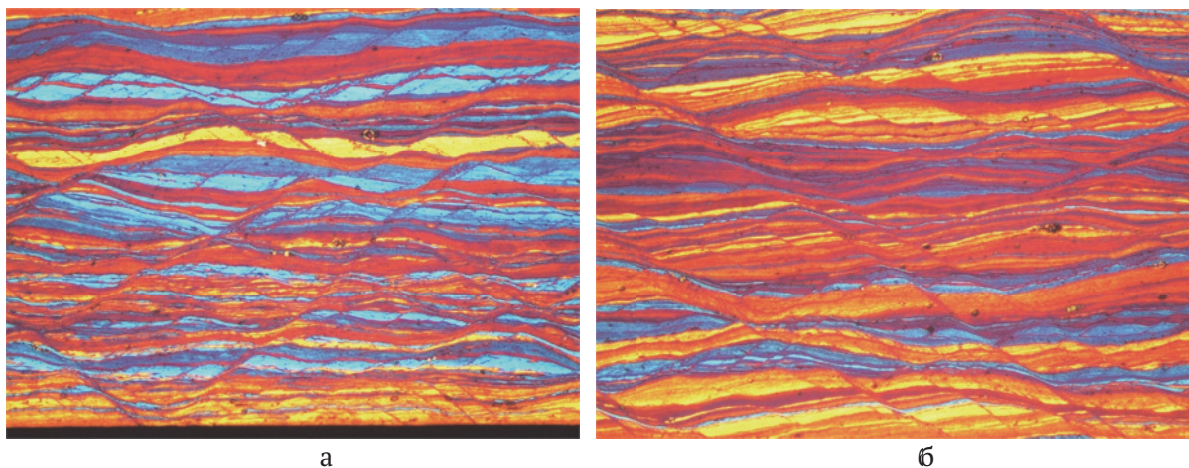
Относительное удлинение листов из сплава В-1461, подвергнутых предварительному отжигу и холодной прокатке, в отожженном состоянии в два

раза выше, чем у отожженных листов, подвергнутых закалке и холодной прокатке (табл. 2). Повышение пластичности у последних очевидно связано с тем, что, не смотря на отсутствие протекания процесса рекристаллизации, окончательный отжиг активизирует процесс полигонизации, за счет которого и достигается некоторое разупрочнение.

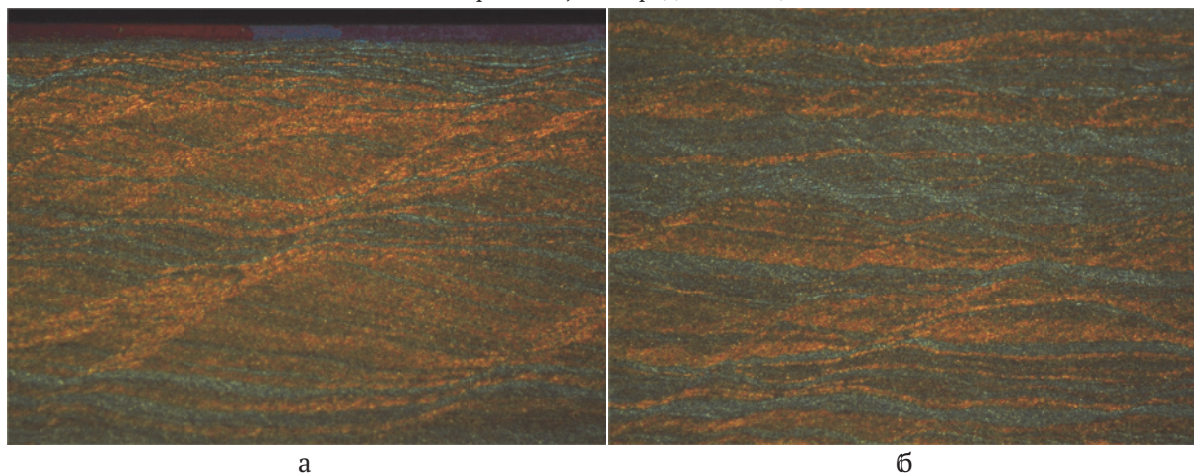


**Таблица 2.** Механические свойства холоднокатаных (числитель) и отожженных (знаменатель) листов из сплава В-1461

Термообработка перед холодной прокаткой	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b}$	$\delta$ , %
Отжиг (450°C, 30 минут, охлаждение на воздухе)	<u>468</u> 324	<u>456</u> 162	<u>0,97</u> 0,50	<u>2,0</u> 22,9
Закалка (530°C, 30 минут, охлаждение в воде)	<u>474</u> 227	<u>474</u> 165	<u>1,0</u> 0,72	<u>0,1</u> 10,1



**Рис. 5.** Микроструктура отожженных листов из сплава В-1461 после холодной прокатки и окончательного отжига (масштаб 200:1):  
а – поверхность; б – середина толщины



**Рис. 6.** Микроструктура закаленных листов из сплава В-1461 после холодной прокатки и окончательного отжига (масштаб 200:1):  
а – поверхность; б – середина толщины

Интересно отметить, что прочность в отожженном состоянии у листов, подвергнутых промежуточному отжигу, оказалась на 30% выше, чем у листов, подвергнутых промежуточной закалке. Видимо, это связано с неравномерностью выделения упрочняющих фаз при деформации закаленного образца. Для уточнения необходимы дальнейшие микроструктурные исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований режимов прокатки и термической обработки листов

из сплава В-1461 можно однозначно сказать, что промежуточный отжиг перед холодной прокаткой положительно влияет на механические свойства как холоднокатаных, так и отожженных листов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа подготовлена при поддержке Программы Президиума РАН №37П «Фундаментальные основы создания металлических, керамических и композиционных конструкционных материалов с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Contrepois, Q.* Hot rolling textures of Al–Cu–Li and Al–Zn–Mg–Cu aeronautical alloys: Experiments and simulations to high strains / Q. Contrepois, C. Maurice, J.H. Driver // *Mater. Sci. Eng. A.* 527 (2010) 7305–7312.
2. *Jiang, N.* Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial production / N. Jiang, X. Gao, Z. Zheng // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 20 (2010) 740–745.
3. *Chen, B.* Hot Deformation Behavior and Processing Maps of 2099 Al–Li Alloy / B. Chen, X. Tian, X. Li, C. Lu // *J. Mater. Eng. Perform.* 23 (2014) 1929–1935.
4. *Li, B.* Characterization of hot deformation behavior of as-homogenized Al–Cu–Li–Sc–Zr alloy using processing maps / B. Li, Q. Pan, Z. Yin // *Mater. Sci. Eng. A.* 614 (2014) 199–206.
5. *Fei, Zh.* Constitutive Analysis to Predict High-Temperature Flow Stress in 2099 Al–Li Alloy / Z. Fei, S. Jian, Y. Xiaodong, S. Jianlin // *Rare Met. Mater. Eng.* 43(6) (2014) 1312–1318.
6. *Yin, H.* Processing maps and microstructural evolution of isothermal compressed Al–Cu–Li alloy / H. Yin, H. Li, X. Su, D. Huang // *Mater. Sci. Eng. A.* 586 (2013) 115–122.
7. *Avramovic-Cingara, G.* Hot deformation mechanisms of a solution-treated Al–Li–Cu–Mg–Zr alloy / G. Avramovic-Cingara, D.D. Perovic, H.J. McQueen // *Metall. Mater. Trans. A.* 27 (1996) 3478–3490.
8. *Rioja, R.J.* Fabrication methods to manufacture isotropic Al–Li alloys and products for space and aerospace applications / R.J. Rioja // *Mater. Sci. Eng. A* 257 (1998) 100–107.
9. *Yu-xuan, D.* Evolution of grain structure in AA2195 Al–Li alloy plate during recrystallization / D. Yu-xuan, X. Zhang, L. Ye, S. Liu // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 16(2) (2006) 321–326.
10. *Lin, Y.* Microstructures and properties of 2099 Al–Li alloy / Y. Lin, Z. Zheng, S. Li, X. Kong, Y. Han // *Mater. Character.* 84 (2013) 88–99.
11. *Singh, A.K.* Evolution of Texture and Microstructure in a Thermomechanically Processed Al–Li–Cu–Mg Alloy / A.K. Singh, G.G. Saha, A.A. Gokhale, R.K. Ray // *Metall. Mater. Trans. A.* 29A (1998) 665–675.
12. *Михеев, В.А.* Моделирование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов, Д.В. Савин, С.В. Сурудин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2014. Т. 16. № 6. С. 172–179.
13. *Grechnikov, F.V.* Influence of material structure crystallography on its formability in sheet metal forming processes / F.V. Grechnikov, S.V. Surudin, Ya.A. Erisov, A.O. Kuzin, I.N. Bobrovskiy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. «International Conference «Modern Technologies and Materials of New Generations».* 2018. С. 012021.
14. *Михеев, В.А.* Изометрические условия при формообразовании обтяжкой оболочки двойной кривизны минимальной разнотолщинности / В.А. Михеев, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов, Д.В. Савин, С.В. Сурудин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2013. Т. 15. № 6. С. 161–166.
15. *Милевская, Т.В.* Деформационное поведение высокопрочных алюминиевых сплавов в условиях горячей деформации / Т.В. Милевская, С.В. Рушци, Е.А. Ткаченко, С.М. Антонов // *Авиационные материалы и технологии.* №2 (2015) 3–9.
16. *Jata, K.V.* Evolution of texture, micro structure and mechanical property anisotropy in an Al–Li–Cu alloy / K.V. Jata, S. Panchanadeeswaran, A.K. Vasudevan // *Mater. Sci. Eng. A* 257 (1998) 37–46.
17. *Клочкова, Ю.Ю.* Формирование структуры и свойств холоднокатаных листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469: Дисс. канд. техн. наук. / Ю.Ю. Клочкова. – М., 2014. – 148 с.
18. *Оглодков, М.С.* Закономерности изменения структуры и свойств катаных полуфабрикатов из сплава в-1461 в зависимости от технологических параметров производства и термической обработки: Автореф. дисс. канд. техн. наук / М.С. Оглодков. – М., 2013. – 26 с.

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF ROLLING AND HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF SHEETS FROM ALUMINUM-LITHIUM ALLOY V-1461

Ya.A. Erisov<sup>1,2</sup>, F.V. Grechnikov<sup>1</sup>, A.F. Grechnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara Federal Research Center of Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

Experimental research of the influence of the rolling and heat treatment routes of sheets from V-1461 alloy on the structure and mechanical properties are carried out. Experimental rolling routes were: hot rolling – preliminary heat treatment (annealing or quenching) – cold rolling – final annealing. Based on the studies, it was conducted that intermediate annealing before cold rolling positively affects the mechanical properties of both cold-rolled and annealed sheets of V-1461 alloy.

**Keywords:** rolling, heating temperature, reduction, heat treatment, aluminum-lithium alloy V-1461, structure, mechanical properties.

Yaroslav Erisov, *Cand. Sci. (Eng.), Engineer at the Physics of Aviation Materials Department Samara Federal Research Center of Russian Academy of Sciences.*

E-mail: Yaroslav.erisov@mail.ru

Fedor Grechnikov, *Full Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor; Chief Research Fellow – Deputy Director, Samara Federal Research Center of Russian Academy of Sciences.* E-mail: fgrech@ssc.smr.ru

Anna Grechnikova, *Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Metal Forming Department, Samara National Research University.* E-mail: anna\_gr17@yahoo.com