

УДК 669.175::669.884

М.В. Григорьев<sup>1</sup>, М.С. Оглодков<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ 1441 И В-1481

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-20-27

*Проведен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по технологиям лазерной и гидроабразивной резки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Выявлены основные тенденции развития в этом направлении и проведена оценка текущего уровня исследований. Исследовано влияние фрезерной, лазерной и гидроабразивной резки плакированных листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1481 на их механические и усталостные свойства. Показана возможность использования лазерной и гидроабразивной резки в качестве альтернативной операции при механической обработке листов из алюминиевых сплавов.*

**Ключевые слова:** алюминий-литиевые сплавы, лазерная резка, гидроабразивная резка, механическая обработка, листы.

М. V. Grigoriev<sup>1</sup>, M. S. Oglochkov<sup>1</sup>

## INFLUENCE OF MACHINING ON MECHANICAL AND FATIGUE PROPERTIES OF SHEETS FROM ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS 1441 AND V-1481

*The state-of-the-art review of domestic and foreign literature on technologies of laser-beam and hydroabrasive cutting of semi-finished products from aluminum alloys is carried out. The main tendencies of development in this direction are revealed and the assessment of the current level of researches is carried out. Influence of milling, laser-beam and hydroabrasive cutting of the plated sheets from aluminum-lithium alloys 1441 and V-1481 on their mechanical and fatigue properties is investigated. Possibility of use of laser-beam and hydroabrasive cutting as alternative operation when machining sheets from aluminum alloys is shown.*

**Keywords:** aluminum-lithium alloys, laser-beam cutting, hydroabrasive cutting, machining, sheets.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Лазерная обработка является одним из наиболее производительных и перспективных технологических процессов, который находит все более широкое применение в промышленности, фактически становится базовым процессом в автомобилестроении, машиностроении, судостроении и других металлообрабатывающих отраслях промышленности ведущих стран мира: США, Японии, Германии, Великобритании, Франции и др. [1].

Фундаментальные исследования в области мощных лазеров, технологии лазерной резки и сварки были выполнены в 70–80-х гг. XX в. в США, Японии и СССР.

Наряду с широко применяемыми традиционными твердотельными АИГ-лазерами и газовыми CO<sub>2</sub>-лазерами, преимущественное развитие получили разработки технологических твердотельных волоконных и диодных дисковых лазеров, щелевых CO<sub>2</sub>-лазеров, а также создание на их базе лазерных технологических установок и комплексов для решения конкретных производственных задач.

В последние 3–5 лет значительно повышены скорости обработки и перемещения лазерных головок – до 300 м/мин (на холостом ходу), с ускорениями до 20 м/с<sup>2</sup>, что снизило соответственно стоимость обработки на 20–40%. Значительно улучшены и оптимизированы технологические параметры головок и оптических элементов для сварки и резки [2].

Внедрение лазерных технологий в авиастроении позволит проводить размерную обработку деталей из алюминиевых, в том числе алюминий-литиевых сплавов, а также уменьшить деформации заготовок и допуски на их обработку, повысить точность, надежность и качество изделий.

При комплексном подходе, на отдельных операциях обеспечивается снижение трудоемкости и повышение производительности – до 2–3 раз и более.

Основой для комплексной модернизации технологических процессов в обрабатывающей промышленности, обеспечения конкурентоспособности и повышения экспортных возможностей становятся лазерные технологии – в первую очередь, лазерная резка.

Лазерная резка полуфабрикатов из алюминиевых сплавов – это технология, которая становится наиболее популярной в промышленности, поскольку алюминиевые детали используются практически повсеместно, – например, в автомобилестроении, где они должны быть правильной аккуратной формы без заусенцев, помятостей и прочих дефектов.

Алюминий и его сплавы отличаются большой теплопроводностью и при нагреве могут окисляться, что может привести к образованию холодных трещин и других дефектов. Лазерная резка позволяет избежать таких проблем [3–5].

За последние годы работ по лазерной резке алюминиевых сплавов опубликовано немного. Очень актуальной является работа [6], в которой описаны исследования по лазерной резке листов из алюминиевых сплавов марок 1163 и В95, имеющих толщину 1,2; 2,0 и 4,0 мм (для резки применялась установка марки Bystronic Bystar 4020 на основе CO<sub>2</sub>-лазера). Скорость резки варьировалась в диапазоне 1000–9000 мм/мин. Для листов из сплава 1163 толщиной 4 мм характерно наличие мелкозернистой структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) на глубине 10–30 мкм, зона рекристаллизации составляет 70 мкм, зона перестаривания 250 мкм. С увеличением скорости резки (с 2000 до 9000 мм/мин) ЗТВ уменьшается с 210 до 60 мкм. Авторы заключают, что скорость лазерной резки алюминиевых сплавов следует выбирать с учетом двух противоположных условий – минимизации ЗТВ и формирования максимально легко удаляемого графа. В работе [7] описано влияние качества, природы и расхода газа на скорость резки и качество кромок.

Лазерная резка полуфабрикатов из алюминиевых сплавов имеет свои особенности в виду того, что алюминий обладает высокой теплопроводностью, а также благодаря теплофизическим и оптическим характеристикам он плохо поглощает лазерный луч. Для резки алюминиевых сплавов луч настраивается более мощным, чем для резки других материалов. Однако данный показатель, а также скорость резки напрямую зависят от толщины и процентного содержания алюминия в материале.

Лазерная резка осуществляется на аппаратах твердотельного типа и газовых устройствах, которые отличаются друг от друга мощностью и режимами работы. Следует отметить, что более мощным является газовый тип устройства, которое может работать непрерывно или в импульсном режиме; что касается твердотельного аппарата, то он обычно работает в импульсном (точечном) режиме.

Существуют определенные особенности технологического процесса. Обычные инструменты, предназначенные для резки металла, с полуфабрикатами из алюминиевых сплавов справляются хуже, чем лазерный луч, поскольку они имеют непосредственный контакт с материалом, что исключается при использовании лазера. Резка происходит с помощью мощного сфокусированного светового пучка. Лазерная резка алюминиевых сплавов происходит очень быстро благодаря точной фокусировке. К тому месту, где производится процесс резки, подводится газовый поток. Именно он сдувает с краев материала расплавленные кусочки металла, тем самым обеспечивает ровную гладкую поверхность, так как расплавленные частицы не успевают осесть на материале [8–10].

Еще одним интересным видом механической обработки является гидроабразивная резка (ГАР), которая представляет собой вид обработки, где режущим инструментом является струя воды или струя из смеси воды с абразивным материалом. Преимущество технологии заключается в том, что гидроабразивная струя является идеальным режущим инструментом, не имеющим износа.

Технология ГАР появилась в 1950-е годы. Основное внимание на начальном этапе уделялось созданию надежных насосных систем для получения сверхвысоких гидродавлений (300–400 МПа), обеспечивающих формирование высокоэнергетической компактной гидроабразивной струи – специфического режущего инструмента. Параллельно исследовали технологические возможности метода, изучали особенности процесса взаимодействия гидроабразивной струи с обрабатываемым материалом и оценивали его производительность как основной показатель эффективности ГАР [11]. В дальнейшем получили свое развитие математические модели, связывающие исходные физико-энергетические параметры гидроабразивной струи с выходными технологическими показателями процесса формообразования: точностью и качеством обработанной поверхности [12]. Осуществляли также оптимизацию параметров ГАР по критерию производительности и проводили оценку стоимостных показателей процесса формообразования, совершенствовали системы создания сверхвысоких давлений и элементы тракта, формирующего струю [13]. В последние годы значительное внимание уделяется программно-математическому обеспечению и числовому управлению процессом ГАР, созданию баз данных по обрабатываемости различных материалов, развитию элементов систем автоматизированного проектирования технологических операций и их информационно-диагностическому оснащению. В настоящее время технология ГАР по праву относится к числу наиболее динамично развивающихся способов раскроя материалов и составляет серьезную конкуренцию таким технологиям, как лазерная и плазменная резка, а также механическая обработка. При использовании технологии ГАР отсутствует термическое воздействие на металл, что оставляет неизменными исходные механические характеристики материала. Еще одним преимуществом данной технологии является полная пожаро- и взрывобезопасность процесса. Но, как и у любого процесса обработки, у гидроабразивной резки есть свои недостатки. Главный недостаток технологии – высокая стоимость расходного материала, что существенно повышает стоимость обработки одной детали в сравнении с механической обработкой. Очередным недостатком этой технологии следует считать ограниченный ресурс отдельных комплектующих и режущей головки станков. Несомненным плюсом технологии является то, что отходы обрабатываемого материала минимальны, резку можно начинать в любой точке по контуру любой сложности, что выделяет эту технологию среди других способов раскроя материалов.

Необходимо также отметить, что для повышения весовой эффективности планера за последнее время конструкторами все большее внимание уделяется применению в конструкции алюминий-литиевых сплавов, которые обладают повышенным модулем упругости и пониженной плотностью в сравнении с традиционными алюминиевыми сплавами [14, 15].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

### Материалы и методы

Отработку режимов лазерной резки листовых заготовок размером 300×300 мм проводили на модуле высокоскоростной лазерной резки с волоконным лазером с максимальной мощностью 6 кВт.

Отработку режимов гидроабразивной резки проводили на установке с насосом высокого давления прямого действия.

Механические свойства при статическом растяжении определяли на поперечных образцах в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84.

Малоцикловую усталость определяли по ГОСТ 25.502–79 на «корсетных образцах» (напряжение  $\sigma_{\max}=196$  МПа; коэффициент асимметрии  $R=0,1$ ;  $K_f=0,1$ ; частота 40 Гц).

### Результаты и обсуждение

#### *Исследование и отработка технологических режимов механической обработки листов из сплава 1441 толщиной 1,5 мм в состоянии Т1*

Рассмотрены три варианта обработки листов, используемые в промышленных условиях авиационных заводов при изготовлении заготовок деталей:

- резка на гильотинных ножницах и фрезерование;
- гидроабразивная резка;
- лазерная резка.

Фрезерование выбрано в качестве базовой операции механической обработки листов из сплава 1441-Т1 со стандартными режимами (скорость подачи фрезы 400 мм/об., скорость ее вращения 1200 об./мин), обеспечивающими гладкую поверхность и отсутствие заусенцев на кромке реза.

Исследовано влияние основных технологических параметров на качество кромок реза при лазерной резке (мощность излучения и скорость резки) и гидроабразивной резки (скорость резки) листов из алюминиевого сплава 1441-Т1 (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Режимы лазерной резки листов из сплава 1441-Т1**

Мощность излучения, Вт	Скорость резки, м/мин	Примечание
1500	5	Непрорез
1500	7,5	Незначительное количество грата
1500	10	То же
2000	5	-«-
2000	7,5	Грат отсутствует
2000	10	То же+наличие заусенцев

Таблица 2

**Режимы гидроабразивной резки листов из сплава 1441-Т1**

Скорость резки, мм/мин	Примечание
3,0	Наличие заусенцев, грубая шероховатость кромки листа
2,0	Шероховатая поверхность кромки листа
1,0	Отсутствие заусенцев и гладкая поверхность кромки листа

По результатам исследований установлено, что отсутствие дефектов (грата, непрорезов) после лазерной резки листов толщиной 1,5 мм обеспечивается при мощности излучения не менее 2 кВт, при этом наилучшее качество кромок реза соответствует скорости 7,5 м/мин.

Выбор оптимального режима гидроабразивной резки осуществляли при визуальном контроле качества поверхности кромки листов по шероховатости, наличию микротрещин и заусенцев, видимых невооруженным глазом. Установлено, что наилучшее качество кромки листа (отсутствие заусенцев, гладкая поверхность) получено при скорости резки 1 мм/мин.

По отработанным режимам лазерного раскроя изготовлены образцы для определения механических свойств при статическом растяжении ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) и долговечности при малоцикловой усталости (МЦУ).

Проведены сравнительные испытания образцов из листов сплава 1441-Т1, изготовленных фрезерованием, гидроабразивной и лазерной резкой (табл. 3).

Таблица 3

**Механические свойства листов толщиной 1,5 мм из сплава 1441-Т1 в зависимости от различных способов механической обработки**

Вид механической обработки	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %	МЦУ: $N^*$ , кцикл (при $\sigma_{max}=235$ МПа, $f=40$ Гц)
	МПа			
Фрезерная обработка	$\geq 430$	$\geq 335$	$\geq 12$	$\frac{125-176}{144}$
Гидроабразивная резка	$\geq 420$	$\geq 330$	$\geq 9,4$	$\frac{123-183}{153}$
Лазерная резка	$\geq 415$	$\geq 330$	$\geq 15$	$\frac{141-242}{181}$

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Результаты испытаний образцов при растяжении показали, что использование лазерной и гидроабразивной резки не оказывает существенного влияния на уровень механических свойств. При этом значения долговечности при МЦУ, определенные на «корсетных» образцах, изготовленных на фрезерном и гидроабразивном станках, сохраняются на одном уровне и варьируются в диапазоне от 125 до 180 кцикл. Уровень значений малоцикловой усталости для таких же образцов, полученных лазерной резкой, несколько выше, но при этом имеется больший разброс значений (от 141 до 242 кцикл), что связано с дополнительным разогревом материала листов при резке и, как следствие, повышением относительного удлинения. В целом полученные данные свидетельствуют о хороших пластических свойствах листов толщиной 1,5 мм из сплава 1441-Т1.

Оценка поверхности образцов после различных способов механической обработки листов, используемых в промышленных условиях авиационных заводов при изготовлении заготовок деталей, свидетельствует о том, что наилучшее качество поверхности достигается в случае фрезерной обработки.

Использование лазерного раскроя или гидроабразивной резки в качестве технологической операции при изготовлении деталей возможно в качестве черновой операции и предполагает наличие дополнительного припуска, величину которого определяет конструктор при проектировании.

*Исследование и отработка технологических режимов механической обработки листов из сплава В-1481 толщиной 1,5 и 3,0 мм в состоянии Т1*

Рассмотрены те же три варианта обработки листов, используемые в промышленных условиях авиационных заводов при изготовлении заготовок деталей.

Исследовано влияние основных технологических параметров на качество кромок реза при лазерной резке (мощность излучения и скорость резки) и гидроабразивной резки (скорость резки) листов из алюминиевого сплава В-1481-Т1 (табл. 4 и 5).

Таблица 4

**Режимы лазерной резки листов из сплава В-1481**

Толщина листа, мм	Мощность излучения, Вт	Скорость резки, м/мин	Примечание
1,5	3000	5	Наличие грата
	3000	7,5	Незначительное количество грата
	3000	10	Грат отсутствует
3,0	3000	10	Непрорез
	4000	5	Незначительное количество грата
	4000	7,5	То же
	4000	10	Грат отсутствует

Таблица 5

**Режимы гидроабразивной резки листов из сплава В-1481**

Толщина листа, мм	Скорость резки, мм/мин	Примечание
1,5–3,0	3,0	Наличие заусенцев, грубая шероховатость кромки листа
	2,0	Шероховатая поверхность кромки листа
	1,0	Отсутствие заусенцев и гладкая поверхность кромки листа

По результатам исследований установлено, что отсутствие дефектов (грата, непрорезов) после лазерной сварки листов толщиной 1,5 и 3 мм обеспечивается при мощности излучения не менее 3 и 4 кВт соответственно, при этом наилучшее качество кромок реза соответствует скорости 10 м/мин для обеих толщин.

Выбор оптимального режима гидроабразивной резки осуществляли при визуальном контроле качества поверхности кромки листов по шероховатости, наличию микротрещин и заусенцев, видимых невооруженным глазом. Установлено, что наилучшее качество кромки листа (отсутствие заусенцев, гладкая поверхность) получено при скорости резки 1 мм/мин.

По отработанным режимам лазерного раскроя изготовлены образцы для определения механических свойств при статическом растяжении ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) и долговечности при малоциклового усталости (МЦУ).

Проведены сравнительные испытания образцов из листов сплава В-1481-Т1, изготовленных фрезерованием, гидроабразивной и лазерной резкой (табл. 6).

Таблица 6

**Механические свойства листов толщиной 1,5–3,0 мм из сплава В-1481-Т1 в зависимости от различных способов механической обработки**

Вид механической обработки	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %	МЦУ: N, цикл (при $\sigma_{max}=235$ МПа, $f=40$ Гц)
	МПа			
Фрезерная обработка	$\geq 495$	$\geq 470$	$\geq 13$	310
Гидроабразивная резка	$\geq 495$	$\geq 470$	$\geq 11$	80
Лазерная резка	$\geq 490$	$\geq 465$	$\geq 12$	123

Результаты испытаний образцов при растяжении показали, что использование лазерной и гидроабразивной резки не влияет на уровень прочностных характеристик.

При этом значения долговечности при МЦУ, определенные на «корсетных» образцах, вырезанных гидроабразивной резкой, снижаются в 4 раза, а на образцах, вырезанных лазерной резкой, – в 2,5 раза.

В связи с этим использование лазерной и гидроабразивной резки листов из алюминиевого сплава В-1481-Т1 толщиной 1,5–3,0 мм в качестве технологической операции при изготовлении деталей возможно с обязательной последующей механической доработкой поверхности реза с обеспечением чистоты поверхности кромки деталей, соответствующей требованиям чертежей. Величина технологического припуска определяется конструктором.

### Заключения

Проведен аналитический обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы по технологиям лазерной и гидроабразивной резки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Выявлены основные тенденции развития в этом направлении и проведена оценка текущего уровня исследований.

Исследованы и отработаны технологические режимы механической обработки листов из сплава В-1481-Т1 толщиной 1,5 и 3,0 мм и листов из сплава 1441-Т1 толщиной 1,5 мм. Рассмотрены три варианта механической обработки листов, используемые в промышленных условиях при изготовлении заготовок деталей: фрезерование, гидроабразивная и лазерная резка.

Установлено, что для листов из сплава 1481-Т1 отсутствие дефектов (грата, непрорезов) обеспечивается при мощности излучения не менее 3 и 4 кВт соответственно, при этом наилучшее качество кромок реза соответствует скорости 10 м/мин для обеих толщин, а для листов из сплава 1441-Т1 – при мощности излучения не менее 2 кВт, при этом наилучшее качество кромок реза соответствует скорости 7,5 м/мин.

Наилучшее качество кромки листа после гидроабразивной резки (отсутствие заусенцев, гладкая поверхность) для обоих сплавов получено при скорости резки 1 мм/мин.

Результаты испытаний образцов при растяжении для обоих сплавов показали, что использование лазерной и гидроабразивной резки не влияет на уровень прочностных характеристик. При этом значения долговечности при МЦУ, определенные на «корсетных» образцах из сплава В-1481-Т1, вырезанных гидроабразивной резкой, снижаются в 4 раза, а на образцах, вырезанных лазерной резкой, – в 2,5 раза. Это связано с образованием при гидроабразивной и лазерной резке на поверхности кромки дополнительных концентраторов напряжений при испытаниях на усталость. При этом для сплава 1441-Т1 значения долговечности при МЦУ на «корсетных» образцах, изготовленных на фрезерном и гидроабразивном станках, сохраняются на одном уровне. Уровень значений МЦУ для таких же образцов, полученных лазерной резкой, несколько выше, но при этом имеется больший разброс значений, что связано с дополнительным разогревом материала листов при резке и, как следствие, с повышенным относительным удлинением. В целом полученные данные свидетельствуют о хороших пластических свойствах листов толщиной 1,5 мм из сплава 1441-Т1.

Использование лазерного раскроя листов из алюминий-литиевых сплавов марок В-1481-Т1 и 1441-Т1 мм в качестве технологической операции при изготовлении деталей возможно с обязательной последующей механической доработкой поверхности реза на глубину ЗТВ с обеспечением чистоты поверхности кромки деталей, соответствующей требованиям чертежей. Применение лазерной и гидроабразивной резки при проектировании деталей предполагает технологические припуски, величину которых определяет конструктор.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
5. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3. С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
6. Фомина М.А., Кутырев А.Е., Клочкова Ю.Ю., Сбитнева С.В. Исследование коррозионных характеристик высокопрочного сплава системы Al–Cu–Li в зависимости от различных режимов термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S2. С. 39–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-39-48.
7. Степанова М.А. Выбор газа для лазерной резки металлов // РИТМ Машиностроения. 2017. №4. С. 102–104.
8. Гайдачук В.Е., Костенко А.И. Анализ эффективности технологии лазерной обрезки листовых деталей из алюминиевых сплавов в авиационном производстве // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». 2010. Вып. 2 (62). С. 85–97.
9. Гайдачук В.Е., Костенко А.И. Экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов из алюминиевых сплавов по критерию максимальной долговечности // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». 2010. Вып. 48. С. 53–61.
10. Блинков В.В. Анализ моделей лазерной резки металлов в среде неактивного газа // Тр. ин-та теор. и прикладной механики СО РАН. 1999. Т. 7 (24). №2. С. 133–150.
11. Панченко В.Я., Голубев В.С., Васильцов В.В. и др. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
12. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1995. 350 с.
13. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей. М.: Машиностроение, 2004. 239 с.
14. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 318 с.
15. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминий-литиевые сплавы для самолетных конструкций // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 35–38.
16. 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.