

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
АВТОКЛАВНОГО МЕТОДА ФОРМОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА СИАЛ НА СТРУКТУРУ  
И СВОЙСТВА ЛИСТОВ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441**

Н.Ю. Серебренникова<sup>1</sup>

serebrennikova-viam@mail.ru

А.Н. Коновалов<sup>1</sup>

konovalov\_job@list.ru

М.А. Сударчикова<sup>1</sup>

org80@viam.ru

С.Д. Карпухин<sup>2</sup>

lab@bmstu.ru

А.Г. Колмаков<sup>2,3</sup>

imetranlab10@mail.ru

<sup>1</sup> ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> ИМЕТ РАН, Москва, Российская Федерация

---

**Аннотация**

Рассмотрены основные этапы разработки гибридных композиционных материалов типа СИАЛ на базе листов из сплава 1441. Технологический процесс изготовления из материала СИАЛ изделий авиационного назначения методом автоклавного формования включает в себя дополнительные нагревы термически обработанных листов из сплава 1441, входящих в структуру гибридного материала. Показано, что изменения в листах из алюминий-литиевого сплава, выявленные при исследовании микроструктуры, числа выделившихся фаз и механических свойств, в целом не оказывают существенного влияния на прочностные свойства композиционного материала СИАЛ

**Ключевые слова**

*Гибридный композиционный материал СИАЛ, алюминий-литиевый сплав 1441, термическая обработка, старение*

Поступила 15.08.2019

Принята 25.09.2019

© Автор(ы), 2020

---

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 6.2 «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»)*

**Введение.** Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. предусматривают развитие 10 перспективных инновационных концептов, которые определяют облик новой гражданской или специальной техники. Разработка гибридных композиционных материалов типа СИАЛ (стеклопластик и алюминий) выполняется в рамках реализации концепта № 3 «Легкие конструкции», предусматривающего развитие материалов с низкой плотностью и стабильными прогно-

зируемыми характеристиками для облегчения конструкций [1]. СИАЛ — это гибридный материал, состоящий из чередующихся тонких листов конструкционных алюминиевых сплавов и прослоек стеклопластика на клею-вом термореактивном высокопрочном связующем с армирующими высокопрочными, высокомодульными стекловолокнами различной структуры армирования, зависящий от назначения деталей [2–4]. Применение иностранного аналога СИАЛ GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy; GL — стеклопластик, A — алюминий, RE — армирование), в целом относящегося к типу ламинатов FML (Fibre Metal Laminate), подтверждает перспективность исследований и применения таких материалов в авиаконструкциях на примере использования в самолете Airbus A380 в качестве верхней обшивки фюзеляжа и других элементов [5]. Замена 3 % (общей массы) традиционных алюминиевых сплавов GLARE позволила добиться увеличения весовой эффективности на 500 кг [3, 6, 7].

В качестве металлических слоев в СИАЛ (GLARE) могут применяться как листы из традиционных алюминиевых сплавов (Д16ч, 1163, В95пч, 2024-Т3, 7475-Т761), так и листы из перспективных алюминий-литиевых сплавов с пониженной плотностью (1441, В-1469) [8, 9]. Гибридные материалы применяют для изготовления деталей планера (обшивки фюзеляжа и панелей крыла, противопожарных перегородок), длительно работающих при температуре до 125 °С во всеклиматических условиях. В качестве преимуществ перед традиционными монолитными сплавами следует отметить снижение (до 15 %) веса конструкции, повышение на 20...30 % прочностных и на 10...15 % усталостных характеристик, высокое (более чем в 10 раз) сопротивление росту усталостных трещин, огнестойкость (увеличение в 7–10 раз времени прогорания материала при действии высоких температур 1100 °С).

При разработке слоистых гибридных материалов СИАЛ проводится анализ условий эксплуатационных требований и условий нагружения детали, по результатам которого выбирают марку материала листов, вид стеклонаполнителя, их число и конфигурацию слоев. Алюминий-литиевые сплавы имеют меньшую плотность и больший модуль упругости по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами (каждый процент лития снижает в среднем до ~ 3 % плотность алюминиевого сплава и увеличивает на ~ 6 % модуль упругости). Применение алюминий-литиевых сплавов обеспечивает повышение весовой эффективности и жесткости конструкций [4, 7–10]. Благодаря высоким пластическим характеристикам сплава 1441 возможно изготовление листовых полуфабрикатов толщиной до 0,3 мм методом рулонной прокатки на серийном оборудовании. В настоящее время

проводятся разработка и паспортизация гибридного материала СИАЛ с применением листов толщиной 1 и 0,35 мм из сплава 1441 в состоянии термической обработки T1 и T11. Использование для формирования внешних поверхностей в структуре СИАЛ листов из алюминий-литиевых сплавов большей (1...2 мм) толщины наряду с тонкими (0,3...0,5 мм) листами в центральной зоне по толщине обеспечивает возможность постановки крепежа, включая заклепки с потайной головкой, располагая их на одном уровне с плоскостью внешнего листа собираемого пакета.

Следующим этапом разработки гибридного материала является проведение математического моделирования его структуры. Разработанная методика расчета позволяет оценить несущую способность образцов из СИАЛ при изгибе с учетом влияния остаточных напряжений и эффекта разрушения образцов по механизму межслоевого сдвига, выбрать подходящее под условия эксплуатации детали число слоев и разработать конечно-элементную модель детали планера [8, 11]. При проектировании слоистых конструкций важно подобрать такую схему расположения слоев в пакете, чтобы обеспечить его технологичность, высокую прочность и максимальное сопротивление потере устойчивости при минимальной массе пакета. Для предотвращения изгибных или сдвиговых деформаций в пакете, которые могут быть вызваны осевой деформацией растяжения или сжатия, прибегают к зеркальной укладке монослоев относительно средней плоскости пакета [8]. При проектировании детали планера обязательно учитывают геометрические особенности конструкции (отверстия, острые стыки и т. п.), характеризующиеся повышенными концентрациями напряжений, причем слои стеклопластика имеют меньшую чувствительность к концентрации напряжений, чем листы из алюминиевых сплавов [11]. Слои стеклопластика на основе клеевых препрегов, армированных стекловолокном, входящие в структуру гибридного слоистого материала, значительно тормозят зарождение и развитие усталостных трещин в металлических листах. Высокая прочность гибридной слоистой композиции определяется как суммарный эффект от прочности алюминий-литиевых листов и стеклянных волокон [12–15].

Для производства конструктивно-подобных образцов также необходимо разработать технологию изготовления слоистого гибридного материала и образцов для проведения контрольных испытаний. Метод автоклавного формирования деталей позволяет совместить процессы отверждения клеевого связующего в препреге, склеивание и придание заданной формы сформированному пакету. Сначала проводят подготовку поверхности листов из сплава 1441 путем анодного окисления и покрытия грун-

том, затем выкладку заготовок СИАЛ (чередуют алюминиевые листы и клеевой препрег в соответствии с заданной схемой выкладки), сборку вакуумного мешка и автоклавное формование. Технологические параметры процесса задают исходя из температуры и времени отверждения клеевого связующего и необходимого давления  $P_f$ . Для клеевых связующих с повышенными деформационными и теплопрочностными характеристиками ВСК-14-2м и ВСК-14-2мР, которые используются в клеевых препрегах в гибридном материале СИАЛ, отверждение происходит при температуре процесса  $T_f$  и времени выдержки  $t_f$ .

Отметим, что неверный выбор температурно-временных параметров процесса автоклавного формования может неблагоприятно повлиять на механические свойства листов из сплава 1441, входящих в структуру формируемого гибридного материала СИАЛ. Это связано с тем, что листы используются уже в термообработанном состоянии: они были подвергнуты закалке в воду (температура нагрева 530 °С, 10 мин выдержки) и искусственному старению. Существует два основных режима искусственного старения, которые придают листам из сплава 1441 конечный уровень механических свойств. Для листов толщиной 1 мм применяется одноступенчатое старение по режиму T1, а для листов толщиной 0,35 мм — двухступенчатое по режиму T11.

*Цель настоящей работы* — исследование влияния технологических нагревов при автоклавном формовании деталей из гибридного материала СИАЛ на структуру и свойства листов из алюминий-литиевого сплава 1441.

**Материалы и методы решения задач, принятые допущения.** Для исследований использовались листы из сплава 1441 толщиной 1 мм в состоянии T1 (образцы № 1) и толщиной 0,35 мм в состоянии T11 (образцы № 2), химический состав которых приведен в табл. 1. Образцы подвергали дополнительному нагреву, выдержке и охлаждению по режимам из табл. 2.

Таблица 1

**Химический состав образцов**

Сплав	Массовая доля, %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Ni	Zr	Be	Li
1441-T1	0,02	0,04	1,8	0,04	0,8	0,03	0,06	0,11	0,02	1,9
1441-T11	0,02	0,05	1,7	0,05	0,8	0,04	0,06	0,11	0,04	1,9

*Примечание.* Алюминий — основа, прочие примеси — менее 0,05 % (каждый) и менее 0,15 % (сумма).

Таблица 2

## Режимы дополнительных нагревов образцов

Номер режима	Температура, °С	Выдержка, ч
1	170–180	3
2	170–180	6
3	180–190	3
4	180–190	6
5	185–195	3
6	185–195	6

Изменения структуры и фазового состава образцов исследовались на оптическом микроскопе Olympus GX51 с точностью до 0,01 мм и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA TESCAN. Влияние технологических нагревов на механические свойства оценивалось с помощью машины Zwick/Roell с осевым растяжением плоских образцов (ГОСТ 1497–84). Для испытаний были изготовлены образцы в виде лопаток (рис. 1).

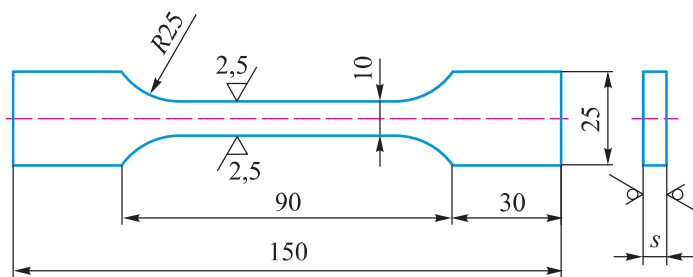
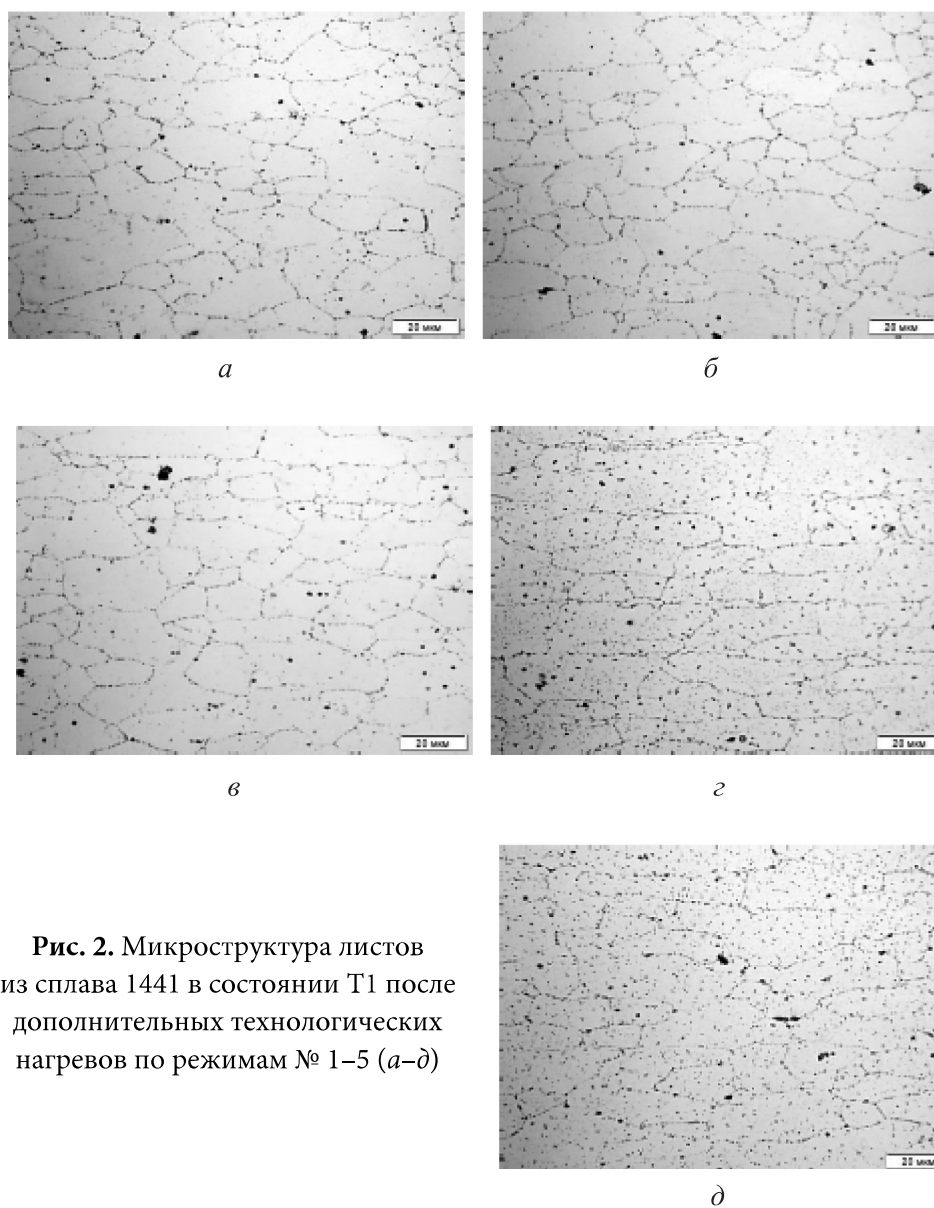


Рис. 1. Вид образца для испытаний на растяжение

**Результаты и их обсуждение.** Микроструктура всех образцов после травления в растворе Келлера в течение 45 с имеет характерный вид структуры после прокатки: преимущественно рекристаллизованные зерна, средний размер которых составляет ~ 10...25 мкм. С увеличением температуры и времени выдержки (рис. 2) наблюдается увеличение числа фаз в образцах из листов толщиной 1 мм сплава 1441-T1.

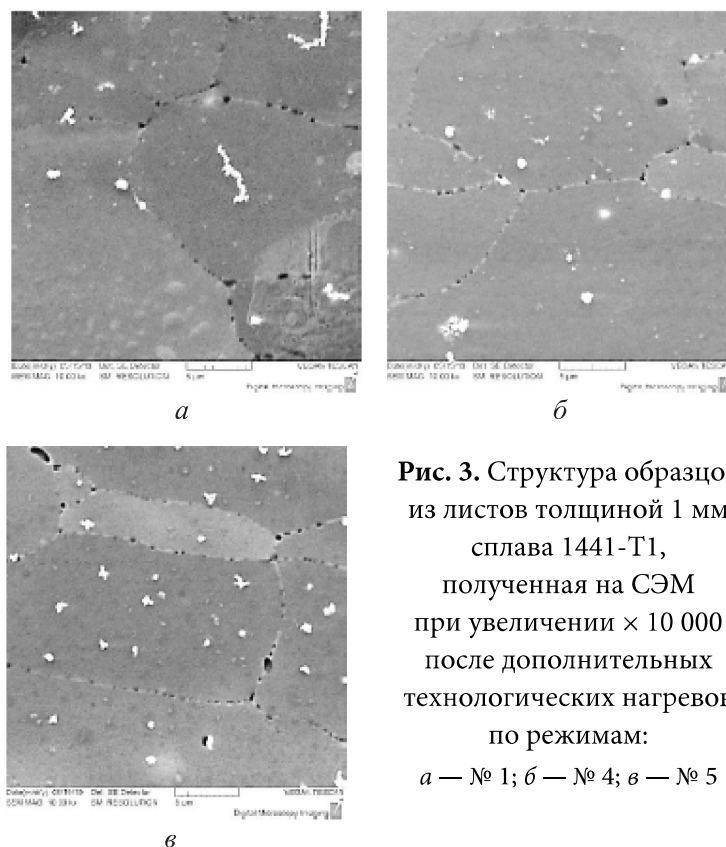
После нагревов по режимам № 1–3 число упрочняющих фаз приблизительно одинаковое и составляет ~ 5,5 % площади. Значительное увеличение числа упрочняющих фаз произошло после нагрева по режиму № 4 и составило ~ 13 %. Методом СЭМ при большом увеличении получены изображения микроструктуры образцов из листов толщиной 1 мм сплава 1441-T1 (рис. 3). Отметим увеличение размеров сферических  $\delta'$ -фаз ( $Al_3Li$ )



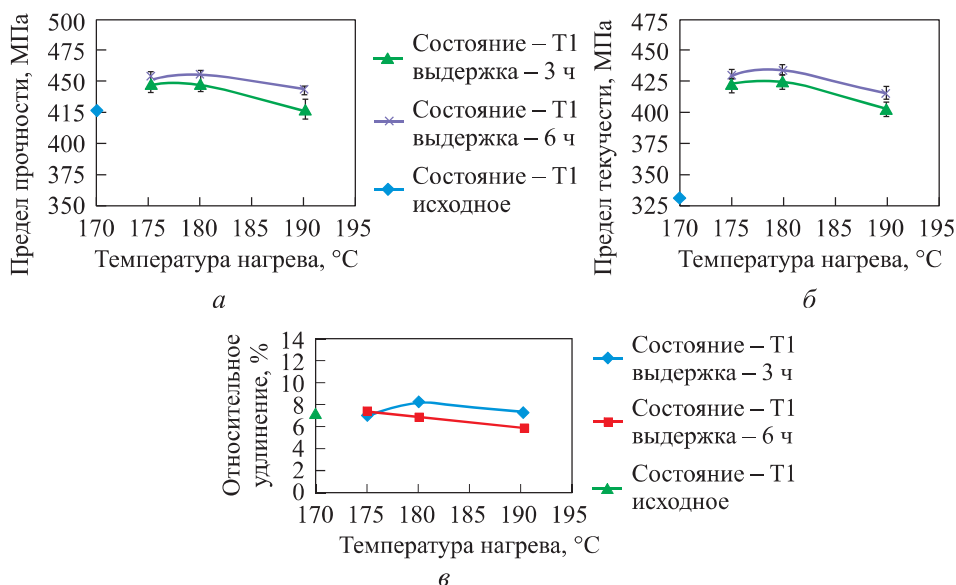
**Рис. 2.** Микроструктура листов из сплава 1441 в состоянии T1 после дополнительных технологических нагревов по режимам № 1–5 (а–д)

и увеличение числа  $S'$ -фазы ( $Al_2CuMg$ ), выпадающих в теле и на границах зерна [16].

С повышением температуры нагрева более  $180\text{ }^{\circ}C$  и выдержкой до 6 ч наблюдается дальнейший распад твердого раствора и увеличиваются число и размер выделений  $S'$ -фазы ( $Al_2CuMg$ ) [16], что вызывает незначительное снижение механических свойств. Результаты механических испытаний образцов приведены в виде диаграмм на рис. 4.



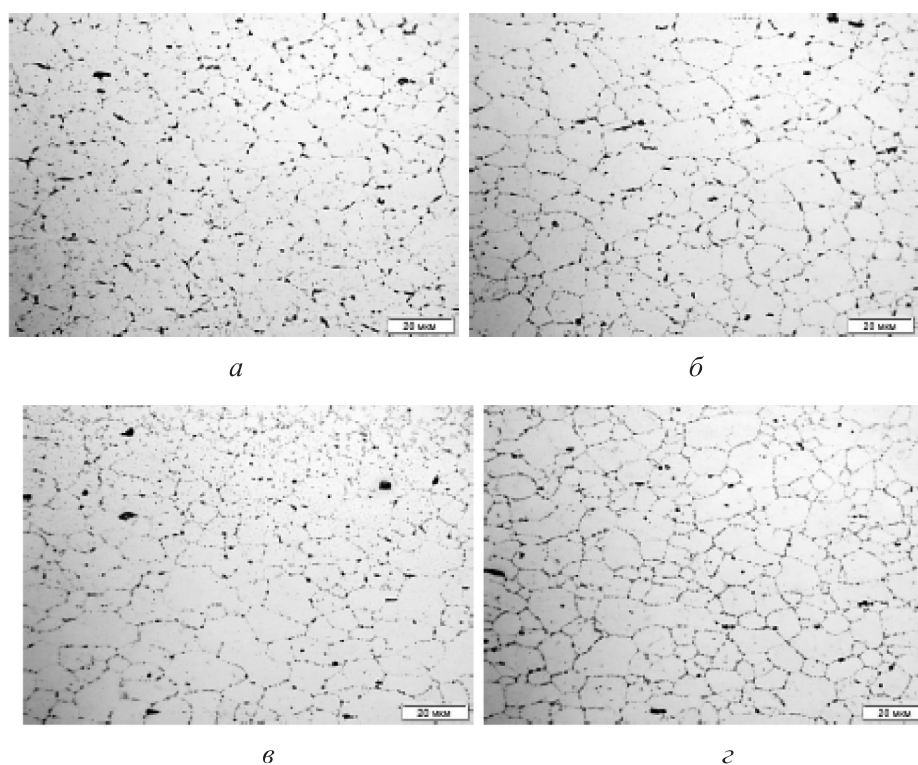
**Рис. 3.** Структура образцов из листов толщиной 1 мм сплава 1441-T1, полученная на СЭМ при увеличении  $\times 10\,000$  после дополнительных технологических нагревов по режимам:  
 а — № 1; б — № 4; в — № 5



**Рис. 4.** Диаграммы механических свойств образцов из листов толщиной 1 мм сплава 1441-T1 в зависимости от температуры и времени выдержки:  
 а — предел прочности; б — предел текучести; в — относительное удлинение

При дополнительных технологических нагревах до температуры 180 °С наблюдается повышение значений пределов прочности и текучести по сравнению с исходными значениями, а относительное удлинение образцов, подвергнутых обработке по режиму № 4, в среднем такое же, как у исходных. С увеличением температуры нагрева указанные механические свойства образцов снижаются, что связано с наличием большого числа фаз  $S'$  на границе зерен и растворением  $\delta'$ -фаз [16].

Микроструктура образцов из листов толщиной 0,35 мм из сплава 1441-T11, приведенная на рис. 5, после различных режимов нагревов не претерпевала видимых изменений, подобных изменениям в образцах из листов толщиной 1 мм сплава 1441-T1.

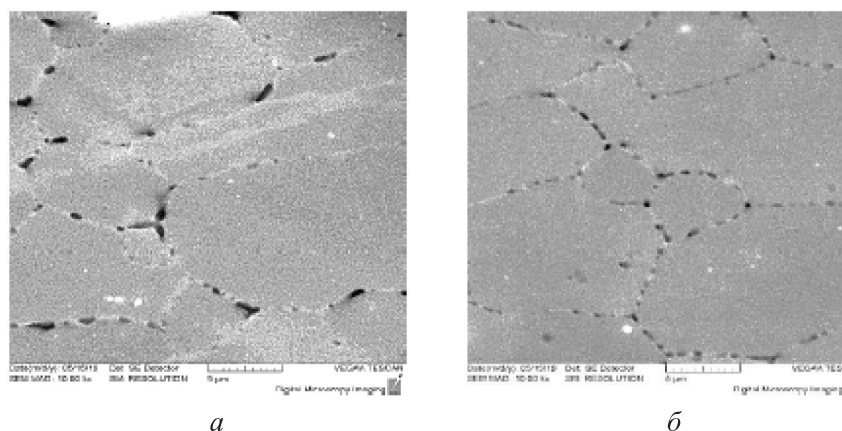


**Рис. 5.** Микроструктура листов толщиной 0,35 мм из сплава 1441-T11 после дополнительных технологических нагревов по режимам:

*а* — № 2; *б* — № 4; *в* — № 5; *г* — № 6

С увеличением температуры и времени выдержки фазы равномернее рассредоточиваются по границе и общее их число также составляет 8,5 %. После обработки по режимам № 5 и № 6 число выделившихся фаз ~ 13,5 %. Данное изменение подтверждается и результатами исследований структуры на СЭМ (рис. 6). На границе зерен заметно уменьшение скоплений





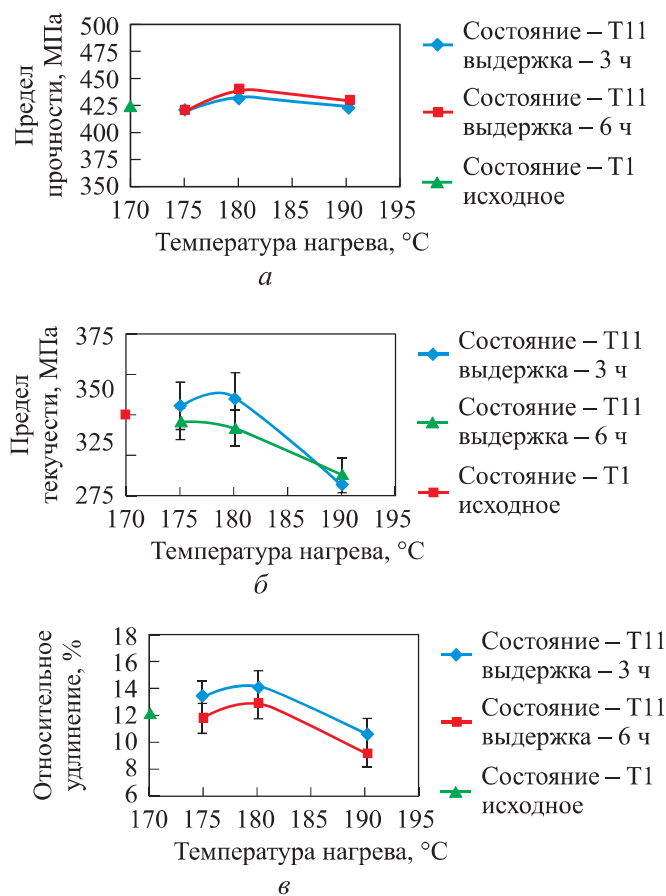
**Рис. 6.** Структура образцов листов толщиной 0,35 мм из сплава 1441-T11, полученная на СЭМ при увеличении  $\times 10\ 000$  после дополнительных технологических нагревов:  
*a* — № 2; *б* — № 6

фазы и ее равномерное распределение. После нагрева по режиму № 2 в объеме зерен видны коагуляции фаз, которые идентифицируются как  $\delta'$ -фаза ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) и крупные скопления фаз на высокоугловых границах зерен ( $S'$ -фазы ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ )) [16, 17]. Результаты испытаний на растяжение образцов из листов толщиной 0,35 мм сплава 1441-T11 приведены на рис. 7.

Пределы прочности и текучести увеличиваются при нагреве до температуры 180 °С, а затем уменьшаются, причем значение предела текучести оказывается меньше почти на 10 % относительно исходного. Подобная тенденция изменения заметна в поведении и относительного удлинения, значения которого после дополнительного нагрева по режиму № 6 снижаются до 10 %.

**Заключение.** Проведенные металлографические исследования структуры и количественный анализ фаз показали, что в листах из сплава 1441 толщиной 1 мм в состоянии Т1 с увеличением температуры и времени выдержки, а в случае с образцами листов толщиной 0,35 мм в состоянии Т11 значительных изменений относительно исходного состояния не происходит.

Механические свойства листов из сплава 1441-T1 при нагреве до температуры 180 °С имеют тенденцию к улучшению, а затем при дальнейшем увеличении температуры и времени выдержки снижаются. В случае дополнительных нагревов листов из сплава 1441-T11 заметно увеличивается пластичность при 180 °С, а при 190 °С все значения механических свойств незначительно меньше исходных.



**Рис. 7.** Диаграммы механических свойств образцов из листов толщиной 0,35 мм сплава 1441-T11 в зависимости от температуры и времени выдержки: а — предел прочности; б — предел текучести; в — относительное удлинение

Необходимо отметить, что некоторое снижение механических свойств листов сплава 1441 (~ 10...15 МПа) не оказывает существенного влияния на прочностные свойства гибридного слоистого материала СИАЛ, поскольку прочность таких материалов определяется прежде всего прочностью стекловолокна в прослойках стеклопластика и составляет не менее 650 МПа для равнопрочных и более 1000 МПа для однонаправленных структур гибридных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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, с. 3–33.

- [2] Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В. и др. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 5, с. 212–224.
- [3] Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмостеклопластики СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и TU Delft. *Цветные металлы*, 2013, № 9, с. 50–53.
- [4] Каблов Е.Н. Материалы нового поколения — основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России. *Интеллект & Технологии*, 2016, № 2, с. 16–21.
- [5] Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. и др. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета. *Авиационные материалы и технологии*, 2016, № 3, с. 3–8.
- [6] Benedictus F.R., Schijve J., Alderliesten R.C., et al. Hybrid wing structures for aging USAF transports. *Int. Conf. on Damage Tolerance of Aircraft Structures*, 2009, no. 31, p. 997.
- [7] Jensen B.J., Cano R.J., Hales S.J., et al. Fiber metal laminates made by the VARTM process. *ICCM-17*, 2009, pp. 575–584.
- [8] Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 5, с. 195–211.
- [9] Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Выбор схемы расположения высокомодульных слоев в многослойной гибридной пластине для ее наибольшего сопротивления потере устойчивости. *Авиационные материалы и технологии*, 2014, № 54, с. 109–117.
- [10] Фридляндер И.Н., Колобнев Н.И., Сандлер В.С. Алюминий-литиевые сплавы. Т. II-3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. М., Машиностроение, 2001.
- [11] Beumler Th. Flying GLARE: a contribution to aircraft certification issues on strength properties in non-damaged and fatigue damaged GLARE structures. Ios Pr. Inc., 2004.
- [12] Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. и др. Расчет на прочность гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмостеклопластика. *Авиационные материалы и технологии*, 2016, № 1, с. 53–61.
- [13] Qi C., Zhidong G., Zengshan L., et al. Experimental investigation on impact performances of GLARE laminates. *CJA*, 2015, vol. 28, no. 6, pp. 1784–1792.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.07.002>
- [14] Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., et al. GLARE technology development 1997–2000. *Appl. Compos. Mater.*, 2002, vol. 9, no. 4, pp. 201–219.  
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016006314630>

[15] Fredell R.S., Gunnink J.W., Bussi R.G., et al. «Carefree» hybrid wing structures for aging USAF transports. *1st Int. Conf. on Damage Tolerance of Aircraft Structures*. TU Delft, 2007.

[16] Лукина Е.А., Алексеев А.А., Антипов В.В. и др. Применение диаграмм фазовых превращений при старении для оптимизации режимов старения в Al-Li сплавах В-1469, 1441. *Металлы*, 2009, № 6, с. 60–67.

[17] Rioja R.J., Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications. *Metall. and Mat. Trans. A*, 2012, vol. 43, no. 9, pp. 3325–3337.

**Серебрянникова Наталья Юрьевна** — канд. техн. наук, начальник сектора лаборатории № 634 ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Коновалов Алексей Николаевич** — канд. техн. наук, ведущий инженер лаборатории № 634 ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Сударчикова Мария Андреевна** — техник лаборатории № 634 ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Карпухин Сергей Дмитриевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Колмаков Алексей Георгиевич** — чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), заведующий лабораторией ИМЕТ РАН (Российская Федерация, 119334, Москва, Ленинский пр-т, д. 49).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Серебрянникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Сударчикова М.А. и др. Влияние технологических параметров автоклавного метода формования деталей из гибридного материала СИАЛ на структуру и свойства листов алюминий-литиевого сплава 1441. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 70–84. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-70-84>

**EFFECT OF AUTOCLAVE PROCESSING PARAMETERS  
USED TO FORM HYBRID SIAL PARTS ON THE STRUCTURE  
AND PROPERTIES OF Al-Li ALLOY 1441 SHEETS**

**N.Yu. Serebrennikova<sup>1</sup>**

serebrennikova-viam@mail.ru

**A.N. Konovalov<sup>1</sup>**

konovalov\_job@list.ru

**M.A. Sudarchikova<sup>1</sup>**

org80@viam.ru

**S.D. Karpukhin<sup>2</sup>**

lab@bmstu.ru

**A.G. Kolmakov<sup>2,3</sup>**

imetranlab10@mail.ru

**<sup>1</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research  
Center of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation**

**<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**<sup>3</sup>IMET RAS, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper considers the main stages of developing hybrid composite materials similar to GLARE, such as SIAL, on the basis of alloy 1441 sheets. The technology of manufacturing aviation products via autoclave forming of such materials includes additional episodes of heating the thermally processed alloy 1441 sheets that form part of the hybrid material structure. Studying the microstructure of the Al-Li alloy sheets, the number of emergent phases and their mechanical properties shows that there is no considerable variation to be found in the properties of the SIAL hybrid composite material as a result of the alteration taking place

**Keywords**

*SIAL hybrid composite material,  
Al-Li alloy 1441, heat treatment,  
aging*

Received 15.08.2019

Accepted 25.09.2019

© Author(s), 2020

---

*The work is performed as part of actualising a comprehensive field of research 6.2 “Laminate fracture-resistant, high-strength metal-polymer materials” (“Strategic areas of developing materials and material processing technology for the period up to 2030”)*

**REFERENCES**

- [1] 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”. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1, pp. 3–33 (in Russ.).
- [2] Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Shestov V.V., et al. Laminated hybrid materials on basis of Al-Li alloy sheets. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. S, pp. 212–224 (in Russ.).

- [3] Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G. Aluminium fiberglass SIAL-1441 laminates and cooperation with “Airbus” and “TU Delft”. *Tsvetnye metally*, 2013, no. 9, pp. 50–53 (in Russ.).
- [4] Kablov E.N. Materials of new generation — foundation for innovation, technology leadership and national safety of Russia. *Intellekt & Tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 16–21 (in Russ.).
- [5] Serebrennikova N.Yu., Antipov V.V., Senatorova O.G., et al. Hybrid multilayer materials based on aluminum-lithium alloys applied to panels of plane wing. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2016, no. 3, pp. 3–8 (in Russ.).
- [6] Benedictus F.R., Schijve J., Alderliesten R.C., et al. Hybrid wing structures for aging USAF transports. *Int. Conf. on Damage Tolerance of Aircraft Structures*, 2009, no. 31, p. 997.
- [7] Jensen B.J., Cano R.J., Hales S.J., et al. Fiber metal laminates made by the VARTM process. *ICCM-17*, 2009, pp. 575–584.
- [8] Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu., Romanenko V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. S, pp. 195–211 (in Russ.).
- [9] Oreshko E.I., Erasov V.S., Podzhivotov N.Yu. Arrangement of high-modular layers in a multilayer hybrid plate for its greatest resistance to stability loss. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. S4, pp. 109–117 (in Russ.).
- [10] Fridlyander I.N., Kolobnev N.I., Sandler V.S. Alyuminiy-litievye splavy. T. II-3. Tsvetnye metally i splavy. Kompozitsionnye metallicheskie materialy [Aluminum-lithium alloys. Vol. II-3. Nonferrous materials and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001.
- [11] Beumler Th. Flying GLARE: a contribution to aircraft certification issues on strength properties in non-damaged and fatigue damaged GLARE structures. Ios Pr. Inc., 2004.
- [12] Oreshko E.I., Erasov V.S., Podzhivotov N.Yu., et al. Strength calculation of hybrid wing panel on the basis of sheets and profiles from high-strength aluminum lithium alloy and laminated aluminum fiberglass. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2016, no. 1, pp. 53–61 (in Russ.).
- [13] Qi C., Zhidong G., Zengshan L., et al. Experimental investigation on impact performances of GLARE laminates. *CJA*, 2015, vol. 28, no. 6, pp. 1784–1792.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.07.002>
- [14] Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., et al. GLARE technology development 1997–2000. *Appl. Compos. Mater.*, 2002, vol. 9, no. 4, pp. 201–219.  
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016006314630>
- [15] Fredell R.S., Gunnink J.W., Bussi R.G., et al. “Carefree” hybrid wing structures for aging USAF transports. *1st Int. Conf. on Damage Tolerance of Aircraft Structures*. TU Delft, 2007.

[16] Lukina E.A., Alekseev A.A., Antipov V.V., et al. Application of the diagrams of phase transformations during aging for optimizing the aging conditions for V1469 and 1441 Al-Li alloys. *Russ. Metall.*, 2009, vol. 2009, no. 6, pp. 505–511.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029509060081>

[17] Rioja R.J., Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications. *Metall. and Mat. Trans. A*, 2012, vol. 43, no. 9, pp. 3325–3337.

**Serebrennikova N.Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Sector, Laboratory no. 634, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Konovalev A.N.** — Cand. Sc. (Eng.), Leading Engineer, Laboratory no. 634, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Sudarchikova M.A.** — Technician, Laboratory no. 634, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials State Research Center of the Russian Federation (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Karpukhin S.D.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kolmakov A.G.** — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation), Head of Laboratory, IMET RAS (Leninskiy prospekt 49, Moscow, 119334 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Serebrennikova N.Yu., Konovalev A.N., Sudarchikova M.A., et al. Effect of autoclave processing parameters used to form hybrid SIAL parts on the structure and properties of Al-Li alloy 1441 sheets. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 70–84 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-70-84>