

Структура и прочность неразъемного соединения стрингера с обшивкой формируемого при прямом последовательном выращивании из алюминиевого сплава

Е.А. ШЕСТАКОВА,

Р.М. ЯНБАЕВ,

канд. техн. наук,

В.О. ИЕВЛЕВ,

канд. техн. наук

(КНИТУ-КАИ, Казань)

ruslan-yanbaev@mail.ru

Исследуются структура и прочность неразъемных соединений стрингера с обшивкой летательных аппаратов, получаемых способом прямого послойного выращивания из алюминиевых сплавов с целью выявления зависимостей механических свойств от особенностей формируемой структуры сплава в полученных соединениях. Исследованы микроструктуры и проведены испытания на предельное растяжение плоских образцов.

Алюминиевый сплав, прямое послойное выращивание из алюминиевых сплавов, соединение стрингера с обшивкой, механические испытания, макро- и микроструктура образцов

В настоящее время известны технологии при производстве обшивки летательных аппаратов, когда классическое клепаное неразъемное соединение заменяют сваркой. Чаще всего применяется лазерная сварка, поскольку при аргонодуговой сварке возникает недопустимое коробление обшивки в целом и образование пористости в сварном шве [1]. Пористость в сварном шве обусловлена разностью толщин стрингера и обшивки. При образовании горячего узла в месте соединения стрингера с обшивкой наблюдаются усадочные явления и пористость, что снижает прочностные характеристики материала и соединения в целом. Кроме того, алюминиевые сплавы типа Д16 не свариваются. Контактная сварка в случае сплава Д16 возможна, но она не применяется при формировании соединения стрингера с обшивкой. Из-за невозможности сварки сплава Д16 применяются сложнолегированные свариваемые алюминиевые сплавы при формировании обшивки летательного аппарата. Однако замена классического сплава Д16 на сложнолегированный аналог не всегда возможна по ряду технологических и прочностных соображений.

В представленной работе применялась технология 3D-выращивания для формирования неразъемного соединения стрингера с обшивкой летательного аппарата вместо клепаного или сварного соединения [2, 3]. Были исследованы макро- и микроструктура, а также прочностные характеристики полученного соединения [4].

В результате проведенного исследования был разработан и изготовлен прототип установки выращивания алюминиевых деталей посредством селективной подачи сплава в жидком состоянии с последующей его кристаллизацией. Прототип установки предназначен для выращивания алюминиевых деталей различной геометрии, формы и массы посредством селективной подачи сплава в жидком состоянии с последующей его кристаллизацией. Разработанная технология может быть применена на предприятиях авиакосмической отрасли.

Элементы обшивки летательного аппарата, полученные в результате эксперимента способом прямого послойного выращивания из алюминиевых сплавов, изготовлены на разработанном прототипе установки. Обшивка представляет собой стандартный алюминиевый лист из материала Д16 (ГОСТ 21631-76) с габаритными размерами 230×130 мм, толщиной 0,8 мм. Стрингеры длиной 130 мм, толщиной 4,5 мм и высотой 27 мм выращены на поверхности наружной обшивки из сплава 1201 (ГОСТ 4784-2019). Расстояние между стрингерами – 100 мм. Толщина стрингера 4,5 мм сформирована с учетом припуска на последующую механическую обработку. Припуск с каждой стороны стрингера – 1,5 мм. После выращивания стрингеров проведена механическая обработка элемента обшивки летательного аппарата. В результате фрезерования стрингеров получен элемент обшивки с толщиной стрингера всего 1,5 мм при толщине наружной обшивки 0,8 мм. Перед фрезерованием элемент обшивки с выращенными стрингерами подвергся термической обработке – закалке – с выдержкой при температуре 495 °С в течение 10 мин с последующим охлаждением в воде, предварительно нагретой до 50–60 °С. После закалки проведено

естественное старение в течение 90 ч. В случае иных режимов закалки возникали трещины и охрупчивание материала в целом, что недопустимо.

3D-модель представлена на рис. 1 [5, 6].

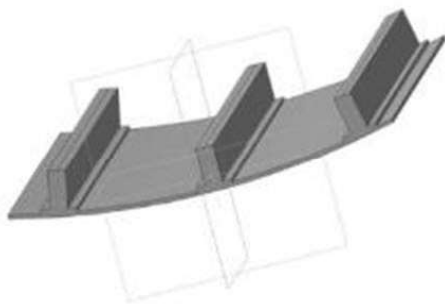


Рис. 1

Таким образом, были сформированы прочные неразъемные соединения стрингеров с обшивкой без применения технологии клепки и сварки. Исследовались зоны непосредственного срачивания стрингера с обшивкой. Для этого изготовлены шлифы на макро- и микроструктурный анализ в зонах формирования неразъемного соединения стрингера с обшивкой.

Продemonстрируем макроструктуру (рис. 2, а) и микроструктуру (рис. 2, б) образцов в зонах формирования неразъемного соединения стрингера с обшивкой.

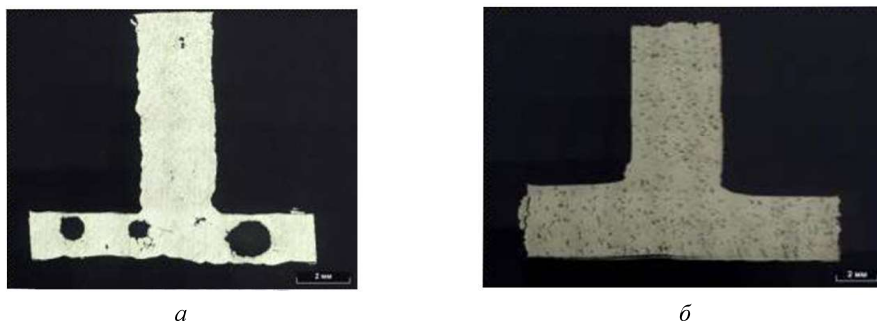


Рис. 2

Как видим (см. рис. 2), неразъемное соединение сформировано без трещин, но с пористостью. Фиксируется концентрированная и распределенная пористость. Вид пористости зависит от режимов выращивания стрингера и общей продолжительности выдержки обшивки летательного аппарата в высокотемпературной камере. Кроме того, зона термического влияния не визуализируется. Это объясняется тем, что процесс выращивания проходит в высокотемпературной камере при температуре, близкой к температуре солидус сплава Д16, что исключает коробление, образование трещин, опасных внутренних напряжений и практически исключает зону термического влияния [7].

Поскольку зона термического влияния не визуализируется, дополнительно исследовано соединение выращенного силуминового стрингера на поверхности листового сплава Д16 толщиной 8 мм. В связи с этим для выращивания стрингеров в случае режимов 1–3 применен сплав АК9 (ГОСТ 1583-93) с целью исследования процесса диффузии двух разнородных алюминиевых сплавов в зоне формирования неразъемного соединения, а в случае режимов 4–7 сплав 1201 (ГОСТ 4784–97) для последующего изготовления экспериментального элемента обшивки летательного аппарата.

Силумин для изготовления обшивки летательного аппарата в производстве не применяется, но, поскольку микроструктура силумина и Д16 различна, возможно исследовать плавный переход и внедрение силуминового стрингера в листовую сплав Д16 без фактического образования зоны термического влияния. Приведем пример макроструктуры (рис. 3, а) и микроструктуры (рис. 3, б) образцов в зонах формирования неразъемного соединения силуминового стрингера с обшивкой.

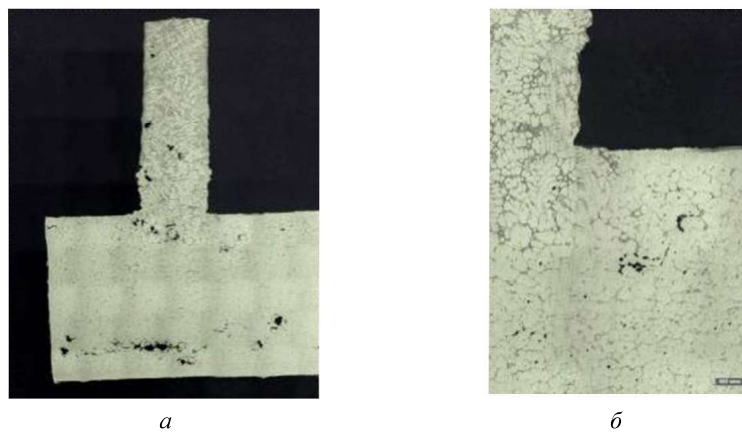


Рис. 3

Детально исследованные микроструктуры образцов на прототипе установки на разных режимах выращивания приведены на рис. 4: *а* – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3; *г* – режим 4; *д* – режим 5; *е* – режим 6; *ж* – режим 7.

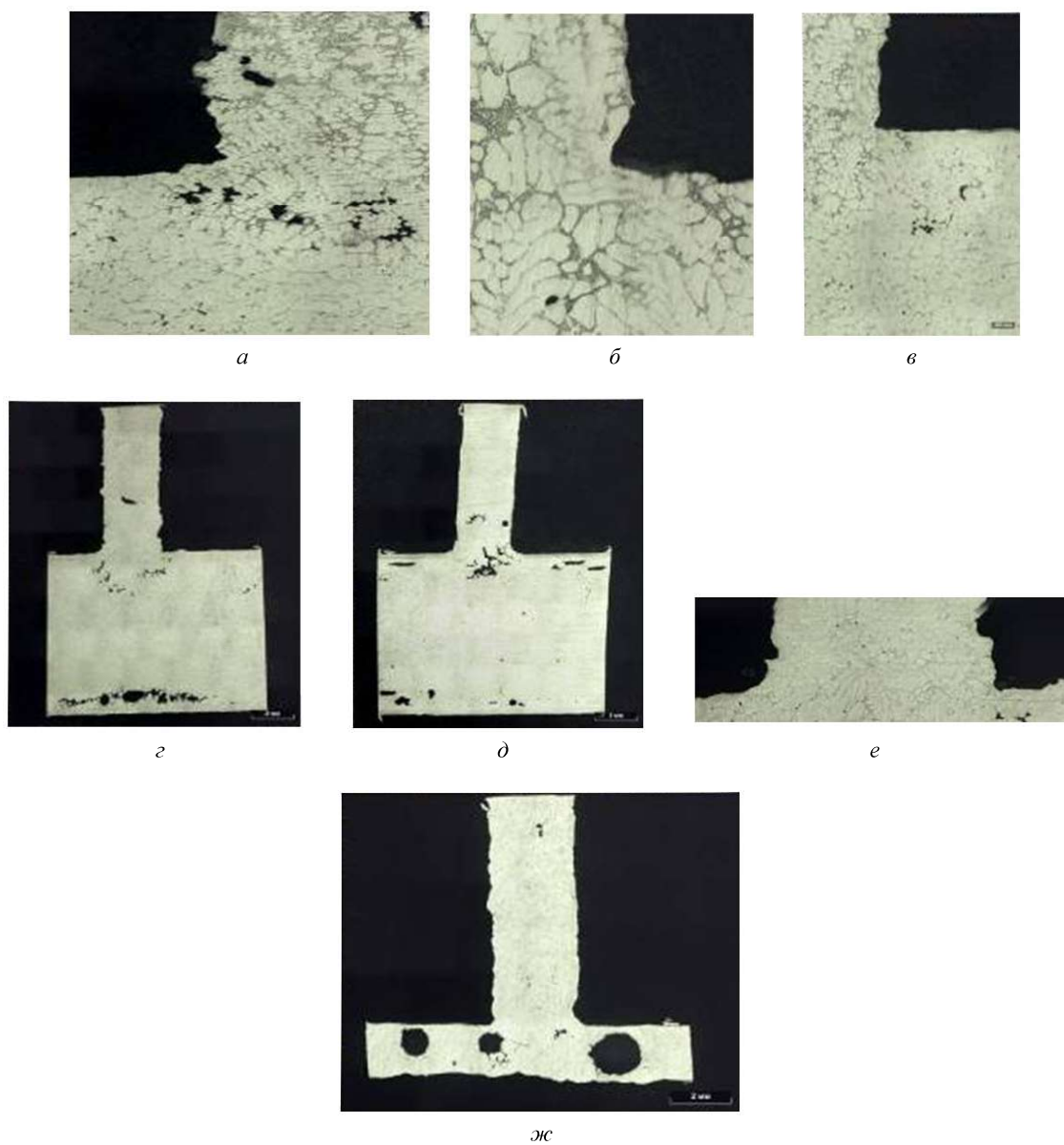


Рис. 4

Приведем исходные данные режима 1.

Деталь – стрингер на металлической подложке из сплава АК9 (ГОСТ 1583-93); подложка – материал Д16 (ГОСТ 4784-97). Геометрические размеры подложки: диаметр – 38 мм, высота – 8 мм. Геометрические размеры стрингера: толщина – 3 мм, ширина – 26 мм, высота – 36 мм. Температура в рабочей камере – 56 °С; температура кристаллизатора – 540 °С; температура сплава АК9 – 75 °С. Подача по оси OX – 240 мм/мин, по оси OY – 0 мм/мин. Время выращивания одного слоя – 6 с; полное время выращивания – 78 с. Полная масса выращенного стрингера – 0,012 кг. Производительность выращивания – 0,554 кг/ч. Глубина диффузии – 2–2,5 мм.

Процесс выращивания стабилен. Металл детали имеет незначительную концентрированную пористость без трещин. Структура сплава полностью соответствует ГОСТ 1583-93. Предел прочности – 70–80 % от значений прочности по ГОСТ 1583-93. Снижение прочностных характеристик объясняется наличием пористости.

Приведем исходные данные режима 2.

Деталь – стрингер на металлической подложке из сплава АК9 ГОСТ 1583-93. Подложка – материал Д16 ГОСТ 4784-97. Геометрические размеры подложки: диаметр – 38 мм, высота – 8 мм. Геометрические размеры стрингера: толщина – 3 мм, ширина – 26 мм, высота – 36 мм. Температура в рабочей камере – 580 °С; температура кристаллизатора – 560 °С; температура сплава АК9 – 750 °С. Подача по оси OX – 200 мм/мин, по оси OY – 0 мм/мин. Время выращивания одного слоя – 8 с; полное время выращивания – 96 с. Полная масса выращенного стрингера – 0,013 кг. Производительность выращивания – 0,487 кг/ч. Глубина диффузии – 4–4,5 мм.

Процесс выращивания стабилен. Металл детали имеет незначительную распределенную пористость без трещин. Структура сплава полностью соответствует ГОСТ 1583-93. Предел прочности составляет 80–85 % от значений прочности по ГОСТ 1583-93. Снижение прочностных характеристик объясняется наличием пористости.

Приведем исходные данные режима 3.

Деталь – стрингер на металлической подложке из сплава АК9 ГОСТ 1583-93. Подложка – материал Д16 (ГОСТ 4784-97). Геометрические размеры подложки: диаметр – 38 мм, высота – 8 мм. Геометрические размеры стрингера: толщина – 3 мм, ширина – 26 мм, высота – 36 мм. Температура в рабочей камере – 600 °С; температура кристаллизатора – 580 °С; температура сплава АК9 – 750 °С. Подача по оси OX – 240 мм/мин, по оси OY – 0 мм/мин. Время выращивания одного слоя – 6 с; полное время выращивания – 112 с. Полная масса выращенного стрингера – 0,013 кг. Производительность выращивания – 0,442 кг/ч. Глубина диффузии – 3,5–4 мм.

Процесс выращивания стабилен. Металл детали имеет значительную распределенную пористость без трещин. Структура сплава полностью соответствует ГОСТ 1583-93. Предел прочности – 75 – 80 % от значений прочности по ГОСТ 1583-93. Снижение прочностных характеристик объясняется наличием пористости и увеличенным временем кристаллизации.

Приведем исходные данные режима 4.

Деталь – стрингер на металлической подложке из сплава 1201 ГОСТ 4784-2019. Подложка – материал Д16 ГОСТ 4784-97. Геометрические размеры подложки: диаметр – 38 мм, высота – 8 мм. Геометрические размеры стрингера: толщина – 3 мм, ширина – 26 мм, высота – 36 мм. Температура в рабочей камере – 560 °С; температура кристаллизатора – 540 °С; температура сплава 1201 – 700 °С. Подача по оси OX – 120 мм/мин, по оси OY – 0 мм/мин; время выращивания одного слоя – 9 с; полное время выращивания – 82 с. Полная масса выращенного стрингера – 0,014 кг. Производительность выращивания – 0,512 кг/ч.

Процесс выращивания стабилен. Металл детали имеет значительную концентрированную пористость без трещин. Структура сплава полностью соответствует ГОСТ 4784-97. Предел прочности – 75–80 % от значений прочности по ГОСТ 4784-97. Снижение прочностных характеристик объясняется наличием пористости.

Приведем исходные данные режима 5.

Деталь – стрингер на металлической подложке из сплава 1201 ГОСТ 4784-2019. Подложка – материал Д16 ГОСТ 4784–97. Геометрические размеры подложки: диаметр – 38 мм, высота – 8 мм. Геометрические размеры стрингера: толщина – 3 мм, ширина – 26 мм, высота – 36 мм. Температура в рабочей камере – 580 °С; температура кристаллизатора – 560 °С; температура сплава 1201 – 700 °С. Подача по оси OX – 200 мм/мин, по оси OY – 0 мм/мин. Время выращивания одного слоя – 11 с, полное время выращивания – 116 с. Полная масса выращенного стрингера – 0,014 кг. Производительность выращивания – 0,480 кг/ч.

Процесс выращивания стабилен. Металл детали имеет значительную концентрированную пористость без трещин. Структура сплава полностью соответствует ГОСТ 4784–97. Предел прочности составляет 75 % от значений прочности по ГОСТ 4784–97. Снижение прочностных характеристик объясняется наличием пористости.

Приведем исходные данные режима 6.

Деталь – стрингер на металлической подложке из сплава 1201 ГОСТ 4784–2019. Подложка – материал Д16 ГОСТ 4784–97. Геометрические размеры подложки: диаметр – 38 мм, высота – 8 мм. Геометрические размеры стрингера: толщина – 3 мм, ширина – 26 мм, высота – 36 мм. Температура в рабочей камере – 600 °С; температура кристаллизатора – 580 °С; температура сплава 1201 – 700 °С. Подача по оси OX – 240 мм/мин, по оси OY – 0 мм/мин. Время выращивания одного слоя – 14 с; полное время выращивания – 140 с. Полная масса выращенного стрингера – 0,014 кг. Производительность выращивания – 0,386 кг/ч.

Процесс выращивания стабилен. Металл детали имеет незначительную пористость без трещин. Структура сплава полностью соответствует ГОСТ 4784–97. Предел прочности – 65–70 % от значений прочности по ГОСТ 4784–97. Снижение прочностных характеристик объясняется наличием пористости.

Приведем исходные данные режима 7.

Деталь – стрингер на металлической подложке из сплава 1201 ГОСТ 4784–2019. Подложка – материал Д16 ГОСТ 4784–97. Геометрические размеры подложки: диаметр – 38 мм, высота – 8 мм. Геометрические размеры стрингера: толщина – 3 мм, ширина – 26 мм, высота – 36 мм. Температура в рабочей камере – 580 °С; температура кристаллизатора – 560 °С; температура сплава 1201 – 700 °С. Подача по оси OX – 1200 мм/мин, по оси OY – 0 мм/мин. Время выращивания одного слоя – 6,5 с; полное время выращивания – 78 с. Полная масса выращенного стрингера – 0,038 кг. Производительность выращивания – 2,15 кг/ч.

Процесс выращивания стабилен. Металл детали имеет значительную концентрированную пористость без трещин. Структура сплава полностью соответствует ГОСТ 4784–97. Предел прочности составляет 45–50 % от значений прочности по ГОСТ 4784–97. Снижение прочностных характеристик объясняется наличием пористости.

После получения положительных результатов (отсутствие трещин и зоны термического влияния в месте формирования неразъемного соединения стрингера с обшивкой) макро- и микроструктурного анализа неразъемных соединений – выращенных стрингеров с обшивкой – были проведены прочностные испытания. Цель этих испытаний – определение прочности соединений выращенных стрингеров с обшивкой.

Исследования механических свойств проведены на выращенном образце с размерами 138×26×4 мм. Режимы и условия выращивания аналогичны выращиванию стрингера. После выращивания внешний периметр и поверхности образца фрезеровались. Конечные размеры образца – 135×24×1,5 мм. Проведена термическая обработка – закалка. Нагрев до 495 °С, выдержка – 10 мин с последующим охлаждением в воде, нагретой до 70 °С, с последующим искусственным старением в течение 90 ч.

Продемонстрируем макроструктуру (рис. 5, а) и микроструктуру (рис. 5, б) образцов в зонах формирования неразъемного соединения стрингера с обшивкой.



Рис. 5

Результаты исследований механических свойств образцов представлены в таблице [8, 9].

Режим	σ_b , МПа	δ , %	Прочность по сравнению с металлом-основой, %
1	112	0,7	28
2	162	1,0	40,5
3	184	1,2	46
4	236	2,1	59
5	252	2,2	63
6	326	6,0	81,5
7	295	4,0	73,75

Таким образом, разработан способ прямого послойного выращивания из алюминиевых сплавов стрингеров на поверхности обшивки, с помощью которого возможно получить прочное неразъемное соединение стрингера с обшивкой.

Максимальная прочность неразъемного соединения стрингера с обшивкой получена по режиму 6 и составляет 80–85 % от прочности исходного материала. При этом температура сплава 1201 в кристаллизаторе должна быть 690–710 °С, рабочая температура в высокотемпературной камере 3D-принтера – 460–470 °С. Закалку следует проводить при температуре 490 °С с выдержкой 10 мин с последующим охлаждением в воде при температуре 50–60 °С и старением в течение 90 ч.

При нарушении представленных режимов выращивания даже на 10–20 °С наблюдается резкое снижение прочности соединений стрингера с обшивкой ввиду образования значительной пористости в обшивке из сплава Д16. При изменении режимов термообработки, увеличении температуры и выдержки наблюдается образование многочисленных трещин и охрупчивание сплава в целом, что снижает прочность неразъемных соединений на 40–50 % по сравнению с исходным материалом.

Выращены стрингеры на поверхности обшивки из сплава 1201.

Компенсация снижения прочности выращенного соединения стрингера с обшивкой возможна формированием галтелей с радиусом не менее 2 мм, что позволяет рассматривать представленную технологию формирования неразъемных соединений стрингеров с обшивкой как альтернативную классическому клепаному и ограниченному сварному соединениям при производстве летательных аппаратов.

Технология выращивания стрингеров на поверхности обшивки в высокотемпературной камере позволяет выбрать иные формы и сечения стрингеров при проектировании и производстве летательных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреннер Б. и др. Применение технологий лазерной сварки при изготовлении интегральных конструкций обшивки фюзеляжа гражданских крупногабаритных самолетов // Авиационная про-

- мышленность [Электронный журнал]. 2011. № 2. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_20306853_37399575.pdf (дата обращения: 8.10.2023).
2. Высокопроизводительный способ изготовления фасонных деталей типа тел вращения из алюминиевых сплавов: пат. 2707371 Рос. Федерация, № 2018129030; заявл. 6.08.2018; опубл. 26.11.2019, Бюл. № 33.
 3. Открытое загрузочное окно высокотемпературной печи или камеры с активной тепловой воздушной завесой: пат. на полезную модель Рос. Федерация, № 2020140313; заявл. 7.12.2020; опубл. 6.04.2021, Бюл. № 10.
 4. Муратаев Ф.И., Шабалин Е.А. Согласование характеристик конструкционной прочности и структуры для обоснования технологии штамповки титановых сплавов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 4. С. 171–179.
 5. Шестакова Е.А. и др. Синтез слабонагруженной обшивки летательных аппаратов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 4. С. 63–66.
 6. Шестакова Е.А. и др. Повышение качества авиационных деталей, получаемых методом послойного формирования из алюминиевых сплавов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 2. С. 87–91.
 7. Шестакова Е.А. и др. Исследование процесса формообразования деталей и заготовок методом послойного наплавления сплавов // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: в 2 т., г. Казань, 10–12 авг. 2016. Казань: Академия наук РТ, 2016. Т. 1. С. 526–533.
 8. Сидоров И.Н. и др. Методика расчета остаточных технологических деформаций и перемещений композитной оболочки одинарной кривизны, подкрепленной стрингерами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 4. С. 169–179.
 9. Демидов А.С., Каиелкин В.В., Капустин Е.А. Оценка напряженного состояния коробчатой оболочки из материала с различными свойствами на растяжение и сжатие // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 2. С. 154–157.

Поступила в редакцию 8.11.23

После доработки 15.12.23

Принята к публикации 20.12.23

Structure and Strength of a Permanent Connection between Stringer and Skin Formed by Direct Sequential Growth from Aluminum Alloy

E.A. SHESTAKOVA, R.M. YANBAEV, AND V.O. IEVLEV

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

The structure and strength of permanent joints of stringer with aircraft skin obtained by direct layer-by-layer growth from aluminum alloys are studied in order to reveal the dependences of mechanical properties on the peculiarities of the formed alloy structure in the joints obtained. The microstructures and ultimate tensile tests of flat specimens were investigated.

Aluminum alloy, direct layer-by-layer growth of aluminum alloys, stringer-skin attachment, mechanical tests, macro- and microstructure of specimens