

УДК 621.74.046

## РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ОБЪЕМА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е.А. ШЕСТАКОВА<sup>1</sup>, Р.М. ЯНБАЕВ<sup>2</sup>, В.О. ИЕВЛЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>anburg@mail.ru, <sup>2</sup>ruslan-yanbaev@mail.ru, <sup>3</sup>voievlev@kai.ru

<sup>1-3</sup>ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ» Россия, г. Казань

*Поступила в редакцию 08.12.2023*

**Аннотация.** В статье рассматриваются теоретические исследования по расчету времени формирования элементарного объема алюминиевого сплава в процессе послойного выращивания деталей летательных аппаратов. Проведен анализ влияния конфигурации элементарного объема сплава на кинетику и продолжительность затвердевания. Рассчитаны основные технологические параметры процесса кристаллизации элементарного объема сплава в случае трех технологических вариантов исследуемого процесса.

**Ключевые слова:** детали летательных аппаратов; послойное выращивание из сплава; расчет параметров процесса; элементарный объем сплава; тепловой баланс; выращивание стрингеров на поверхности обшивки.

### ВВЕДЕНИЕ

Авторами статьи был получен патент на «Высокопроизводительный способ изготовления фасонных деталей типа тел вращения из алюминиевых сплавов» RU 2707371 С1 от 26.11.2019. В результате проведения исследований создана технология послойного выращивания деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов, и изготовлен прототип установки для выращивания. Особенность технологии заключается в послойном формировании детали в высокотемпературной камере. Высокотемпературная камера позволяет практически полностью исключить коробление, свести к минимуму количество жидкой фазы, исключить опасные внутренние напряжения в выращиваемых деталях. Технология позволяет как выращивать готовые изделия полностью, так и формировать отдельные части деталей, как пример, вырастить стрингеры на поверхности обшивки летательного аппарата [1–5] (рис. 1).



**Рис. 1.** Внешний вид экспериментального элемента обшивки с выращенными стингерами:  
*а – 3D-модель; б – фотография*

Процесс послойного выращивания авиационных деталей из алюминиевых сплавов, разработанный авторами, стал возможным благодаря появлению перспективных алюминиевых сплавов. Эти сплавы получены в ФГУП ВИАМ и за рубежом. Они обладают высокими прочностными характеристиками, практически сопоставимыми с прочностью сплава Д16 и ему подобных. Одновременно с высокими механическими свойствами новые алюминиевые сплавы хорошо свариваются, что допускает наличие жидкой фазы в процессе формирования сварного шва. Авторам удалось применить подобный алюминиевый сплав 1201 - ГОСТ 4784-2019 для выращивания стрингеров на поверхности элемента обшивки [6, 7].

В статье рассматриваются теоретические исследования по расчету времени формирования элементарного объема алюминиевого сплава в процессе послойного выращивания деталей летательных аппаратов.

Расчет времени формирования элементарного объема сплава необходим для вычисления скорости подачи сплава в рабочую зону выращивания  $V_{под}$ . При этом время формирования численно совпадает со временем кристаллизации.

#### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ОБЪЕМА СПЛАВА НА КИНЕТИКУ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

Зададимся приведенными размерами элементарного объема. Для простоты расчета примем, что элементарный объем представляет из себя куб с ребром  $x$ , который является приведенным размером рассматриваемого элементарного объема, определяющего численное значение половины толщины бесконечной плиты, к которой приводится любое тело сложной конфигурации. Очевидно, что  $x$  имеет такой смысл только при  $Bi \ll 1$  [1]. Критерий Био определяется как:

$$Bi = \frac{\alpha x}{\lambda} \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности элементарного объема в окружающую его среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Критерий Био является отношением коэффициента теплоотдачи от поверхности тела в окружающую среду к термической проводимости этого тела. Если критерий Био много меньше единицы, то термическая проводимость тела много больше термической проводимости окружающей среды – подложки. По этой причине процесс перераспределения теплоты внутри элементарного объема сплава будет происходить интенсивнее, чем отдача теплоты с его поверхности [1]. Следовательно, скорость охлаждения элементарного объема определится значением термической проводимости подложки. Термическая проводимость самой элементарной ячейки не окажет значительного влияния на скорость ее охлаждения. Следовательно, при  $Bi \ll 1$  геометрические свойства конфигурации элементарной ячейки становятся несущественными для анализа хода процесса ее охлаждения на подложке, а температурный перепад намного меньше температурного напора, и им для элементарного объема любой формы и конфигурации допустимо пренебречь и считать, что температура элементарной ячейки является функцией только времени [1, 2].

Случай охлаждения элементарного объема сплава на подложке относится к процессам охлаждения с малой интенсивностью [1, 3].

Очевидно, что элементарный объем сплава кристаллизуется по 3 технологическим вариантам.

1-й вариант – Элементарный объем контактирует с остальным телом выращиваемой детали по одной площадке контакта  $S=x^2$ , где  $S$  – площадь контакта элементарного объема с подложкой, м<sup>2</sup> (рис. 2, а).

2-й вариант – Элементарный объем контактирует с остальным телом выращиваемой детали по двум площадкам контакта  $S=2x^2$  (рис. 2, б).

3-й вариант – Элементарный объем контактирует с остальным телом выращиваемой детали по трем площадкам контакта  $S=3x^2$  (рис. 2, в).

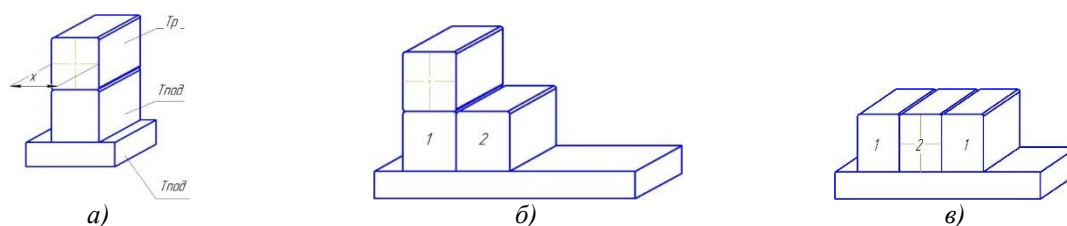


Рис. 2. Варианты кристаллизации элементарного объема сплава

Расчет времени кристаллизации элементарного объема сплава.

Для преодоления расчетных затруднений, связанных с определением температур поверхности и центральной части элементарного объема сплава, воспользовались алгоритмом, который предполагает, что при длительном контакте формируемого слоя с предыдущим (формируемый слой полностью состоит из множества элементарных объемов сплава) средние значения температур формируемого и сформированного слоев стремятся к некоторой средней калориметрической температуре. Формируемый слой охлаждается, отдает теплоту, а сформированный слой нагревается – принимает теплоту. Средняя калориметрическая температура вычисляется из уравнения теплового баланса. На рис. 3 представлена схема к расчету средней калориметрической температуры.

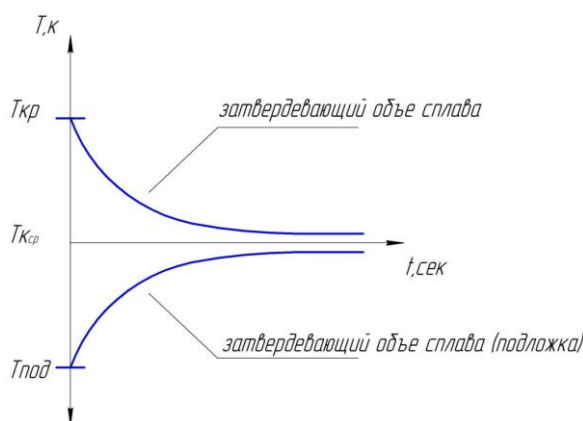


Рис. 3. Схема к расчету средней калориметрической температуры.

В уравнении теплового баланса количество тепла, теряемого элементарным объемом сплава при охлаждении до средней калориметрической температуры, приравнивается к количеству тепла, приобретаемому сформированным слоем – подложкой, при нагреве от температуры подогрева подложки до средней калориметрической температуры (рис. 4):

$$m \cdot C_0 \cdot (T_p - T_k) + m_0 \cdot L = M_{\text{под}} \cdot C_{\text{под}} \cdot (T_k - T_{\text{под}}) \quad (2)$$

где  $m$  – масса элементарного объема сплава, кг;

$C_0 = 1200$  Дж/кг К – удельная теплоемкость сплава, Дж/кг К;

$T_p$  – рабочая температура сплава в кристаллизаторе, К;

$T_k$  – средняя калориметрическая температура, К;

$T_{\text{под}}$  – температура подогрева подложки, К;

$M_{\text{под}}$  – приведенная масса подложки, кг;

$C_{\text{под}} = 920$  Дж/кг К – удельная теплоемкость подложки, Дж/кг К;

$L$  – удельная теплота кристаллизации сплава, Дж/кг.

После преобразований окончательное выражение для  $T_k$  принимает вид:

$$T_k = \frac{T_p + \frac{L}{C_0} + J \cdot T_{\text{под}}}{1 + J} \quad (3)$$

где  $J = \frac{M_{\text{под}} \cdot C_{\text{под}}}{m \cdot C_0}$  – безразмерный коэффициент.

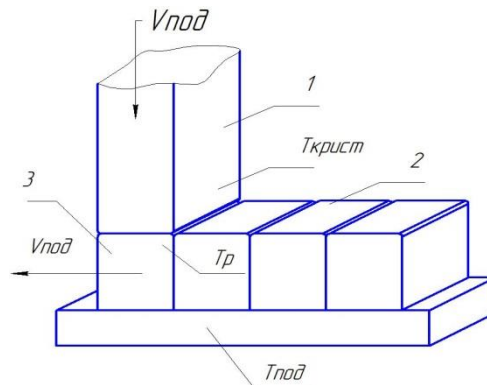


Рис. 4. Общая схема формирования слоев

Применение средней калориметрической температуры позволяет рассматривать процесс затвердевания элементарного объема сплава как процесс при постоянной температуре среды и постоянном коэффициенте теплопередачи от элементарного объема к подложке [8 – 10].

Для расчета времени кристаллизации элементарного объема сплава применено уравнение теплового баланса в дифференциальной форме:

$$\alpha \cdot (T_p - T_k) \cdot S \cdot dt = -m \cdot C_{\text{эф}} \cdot dT_0 \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи, Вт / (м<sup>2</sup>·К).

В левой части уравнения элементарное количество теплоты, передаваемое от элементарного объема сплава подложке со средней калориметрической температурой. В правой части снижение теплосодержания элементарного объема сплава при охлаждении на элементарную температуру  $dT_0$ .

Разделив переменные и проинтегрировав дифференциальное уравнение с пределами интегрирования при  $t = 0 \rightarrow T_0 = T_p$ , а при  $t = t_k \rightarrow T_0 = T_{\text{солидус}}$ , окончательно получили:

$$\frac{dt}{m \cdot C_{\text{эф}}} = \frac{dT_0}{\alpha \cdot (T_0 - T_k) \cdot S} \rightarrow \int_0^{t_k} \frac{dt}{m \cdot C_{\text{эф}}} = \int_{T_p}^{T_{\text{солидус}}} \frac{dT_0}{\alpha \cdot (T_0 - T_k) \cdot S} \rightarrow$$

$$t = \frac{m \cdot C_{\text{эф}}}{\alpha \cdot S} \cdot \ln \left( \frac{T_p - T_k}{T_{\text{солидус}} - T_k} \right) \quad (5)$$

Учитывая, что  $\alpha = \frac{\lambda}{x}$  и  $C_{\text{эф}} = C_0 + \frac{L}{T_p - T_{\text{солидус}}}$  окончательно, уравнение для времени кристал-

лизации элементарного объема сплава принимает вид:

$$t = \frac{m \cdot \left( C_0 + \frac{L}{T_p - T_{\text{солидус}}} \right) \cdot x}{\lambda \cdot S} \cdot \ln \left( \frac{T_p - T_k}{T_{\text{солидус}} - T_k} \right) \quad (6)$$

Время кристаллизации рассчитано по формуле (6),

где

$t$  – время формирования элементарного объема сплава, с;

$L$  – удельная теплота кристаллизации сплава, Дж / кг;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности сплава, Вт / (м·К);

$x$  – ребро элементарного объема сплава в виде куба, м;

$S$  – площадь контакта элементарного объема с телом выращиваемой детали, м<sup>2</sup>.

Экспериментальные выращивания стрингеров на поверхности обшивки проводились из алюминиевого сплава 1201. Для сплава 1201 – ГОСТ 4784-2019 численные значения входящих в формулу (3) величин следующие:

$\lambda = 218$  Вт / (м·К), коэффициент теплопроводности;

$L = 57333$  Дж / кг – для 1-го технологического варианта;

$L = 114666$  Дж / кг – для 2-го технологического варианта;

$L = 172000$  Дж / кг – для 3-го технологического варианта;

$m = 0,0003125$  кг – для 1-го технологического варианта;

$m = 0,0002937$  кг – для 2-го технологического варианта;

$m = 0,000275$  кг – для 3-го технологического варианта;

$x = 0,005$  м;

$T_p = 873$  К – для 1-го технологического варианта;

$T_p = 893$  К – для 2-го технологического варианта;

$T_p = 913$  К – для 3-го технологического варианта;

$T_k = 753$  К – средняя калориметрическая температура рассчитана по формуле (3);

$S = 0,000025$  м<sup>2</sup> – для 1-го технологического варианта;

$S = 0,000066$  м<sup>2</sup> – для 2-го технологического варианта;

$S = 0,0001152$  м<sup>2</sup> – для 3-го технологического варианта.

Время формирования элементарного объема:

Для 1-го технологического варианта

$$t_1 = \frac{m \cdot \left( C_0 + \frac{L}{T_p - T_{\text{солидус}}} \right) \cdot x}{\lambda \cdot S} \cdot \ln \left( \frac{T_p - T_k}{T_{\text{солидус}} - T_k} \right) =$$

$$= \frac{0,0003125 \cdot \left( 1200 + \frac{57333}{873 - 852} \right) \cdot 0,005}{218 \cdot 0,000025} \cdot \ln \left( \frac{873 - 753}{853 - 753} \right) = 0,251 \text{ с.}$$

Для 2-го технологического варианта

$$t_2 = \frac{m \cdot \left( C_0 + \frac{L}{T_p - T_{\text{солидус}}} \right) \cdot x}{\lambda \cdot S} \cdot \ln \left( \frac{T_p - T_k}{T_{\text{солидус}} - T_k} \right) =$$

$$= \frac{0,0002937 \cdot \left( 1200 + \frac{114666}{893 - 852} \right) \cdot 0,005}{218 \cdot 0,000066} \cdot \ln \left( \frac{893 - 753}{853 - 753} \right) = 0,165 \text{ с.}$$

Для 3-го технологического варианта

$$t_2 = \frac{m \cdot \left( C_0 + \frac{L}{T_p - T_{\text{солидус}}} \right) \cdot x}{\lambda \cdot S} \cdot \ln \left( \frac{T_p - T_k}{T_{\text{солидус}} - T_k} \right) =$$

$$= \frac{0,000275 \cdot \left( 1200 + \frac{172000}{913 - 852} \right) \cdot 0,005}{218 \cdot 0,0001152} \cdot \ln \left( \frac{913 - 753}{853 - 753} \right) = 0,125 \text{ с.}$$

Для каждого технологического варианта рассчитана величина скорости подачи  $V_{\text{под}}$  и производительность процесса  $W$ :

Для 1-го технологического варианта

$$V_{\text{под}} = x \cdot \frac{1}{t_i} = 0,005 \cdot \frac{1}{0,251} = 0,02 \text{ м / с}$$

$$W_i = \frac{1}{t_i} \cdot m = \frac{1}{0,251} \cdot 0,000275 = 0,0011 \text{ кг / с}$$

$$W_i = \frac{60}{t_i} \cdot m = \frac{60}{0,251} \cdot 0,000275 = 0,066 \text{ кг / мин}$$

$$W_i = \frac{3600}{t_i} \cdot m = \frac{3600}{0,251} \cdot 0,000275 = 3,94 \text{ кг / час}$$

Для 2-го технологического варианта

$$V_{\text{под}} = x \cdot \frac{1}{t_i} = 0,005 \cdot \frac{1}{0,165} = 0,03 \text{ м / с}$$

$$W_i = \frac{1}{t_i} \cdot m = \frac{1}{0,165} \cdot 0,000275 = 0,0016 \text{ кг / с}$$

$$W_i = \frac{60}{t_i} \cdot m = \frac{60}{0,165} \cdot 0,000275 = 0,1 \text{ кг / мин}$$

$$W_i = \frac{3600}{t_i} \cdot m = \frac{3600}{0,165} \cdot 0,000275 = 6 \text{ кг / час}$$

Для 3-го технологического варианта

$$V_{\text{под}} = x \cdot \frac{1}{t_i} = 0,005 \cdot \frac{1}{0,5} = 0,01 \text{ м / с}$$

$$W_i = \frac{1}{t_i} \cdot m = \frac{1}{0,125} \cdot 0,000275 = 0,0022 \text{ кг / с}$$

$$W_i = \frac{60}{t_i} \cdot m = \frac{60}{0,125} \cdot 0,000275 = 0,132 \text{ кг / мин}$$

$$W_i = \frac{3600}{t_i} \cdot m = \frac{3600}{0,125} \cdot 0,000275 = 7,92 \text{ кг / час}$$

Результаты расчета скорости подачи и производительности процесса выращивания использованы для синтеза значений показателей степеней при симплексах в критериальных уравнениях, описывающих процесс формирования плотного, бездефектного тела детали. В результате синтезирована математическая модель, описывающая процесс кристаллизации элементарного объема сплава при трех технологических вариантах исследуемого процесса, отличающихся количеством поверхностей теплообмена.

$$\left( \frac{L}{V_{\text{под}}^2} \right)^a \cdot \left( \frac{\Delta T \cdot \lambda}{\Delta P \cdot V_{\text{под}} \cdot V^{1/3}} \right)^b \cdot \left( \frac{r}{V^{1/3}} \right)^c \cdot \left( \frac{V_{\text{под}}^2 \cdot \rho}{\Delta P} \right)^d \cdot A = \langle \rho \rangle \cdot \langle r \rangle \rightarrow 1$$

где  $\langle \rho \rangle$  – приведенный удельный вес металла;

$\langle r \rangle$  – среднестатистический размер металлического зерна;

$A$  – безразмерный коэффициент.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе рассмотрены различные варианты кристаллизации элементарного объема сплава в процессе послойного выращивания деталей летательных аппаратов.

2. На основе понятия средней калориметрической температуры получена зависимость времени формирования элементарного объема сплава в случае трех технологических вариантов исследуемого процесса.

3. Рассчитаны время охлаждения, скорость подачи и производительность исследуемого процесса формирования элементарного объема сплава.

4. Полученные скалярные значения времени охлаждения, скорости подачи и производительности позволили синтезировать математическую модель процесса выращивания.

5. Расчет времени охлаждения элементарного объема металла показал, что процесс выращивания предпочтительнее проводить по 1-му и 2-му технологическим вариантам. Выращивание по 3-му технологическому варианту сопряжено с опасностью перемерзания сплава или

невозможностью образования необходимого количества жидкой фазы в пограничной зоне сплавления, что может привести к образованию трещин, пор, неслитин и спаев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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. [High-efficiency method for manufacturing formed components of the solid of revolution type from aluminum alloys. Russian Federation Patent no. 2018129030 (2013).]
2. **Открытое** загрузочное окно высокотемпературной печи или камеры с активной тепловой воздушной завесой / Заявка RU 2020 140 313 U. [Opened charging door of high-temperature furnace or active hot-air curtain compartment. Application RU 2020 140 313 U.]
3. **Шестакова Е.А., Иевлев В.О., Ямбаев Р.М., Курyleв Д.В.** Синтез слабонагруженной обшивки летательных аппаратов// Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. №4. С. 63–66. [Shestakova E. A., Ievlev V.O., Yanbaev R.M., Kurylev D.V. Synthesis of low loaded aircraft skin. Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. 2020. No. 4. P. 63–66 (in Russian).]
4. **Шестакова Е.А.** Повышение качества авиационных деталей, получаемых методом послойного формирования из алюминиевых сплавов// Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. №2. С. 87–91. [Shestakova E.A. Improving the quality of aircraft parts produced by the method of layer-by-layer formation from aluminum alloys. Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. 2020. No. 2. P. 87–91. (in Russian).]
5. **Шестакова Е.А. и др.** Исследование процесса формообразования деталей и заготовок методом послойного наплавления сплавов// Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х томах. Том 1. 2016. С. 526–533 [Shestakova E.A. et al. Studying the process of the shape forming of parts and workpieces through layer-by-layer building of alloys. In: New technologies, materials and equipment for the Russian aerospace industry, Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, in 2 volumes. Vol. 1. 2016. P. 526–533 (in Russian).]
6. **Антипов В.В.** Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов// Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167. [Antipov V.V. Strategies of developing titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys. Aviation Materials and Technologies. 2012. No. 5. P. 157–167 (in Russian).]
7. **Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О.** Алюминиевые деформируемые сплавы// Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 167–182. [Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vakhromov P.O. Wrought aluminum alloys. Aviation Materials and Technologies. 2012. No. 5. P. 167–182 (in Russian).]
8. **Карташов Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: Учеб. пос. 2-е изд., доп. М.: Высш. шк., 1985. 480 с. [Kartashov E.M. Analytical techniques in heat transfer of solid objects theory: study guide. 2nd rev. ed. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 1985. 480 p. (in Russian).]
9. **Тимофеев Г.И.** Механика сплавов при кристаллизации слитков и отливок. М.: Metallurgiya, 1976. 160 с. [Timofeev G.I. Alloy mechanics during the crystallization of ingots and castings. Moscow: Metallurgiya Publ. 1976. 160 p. (in Russian).]
10. **Баладин Г.Ф.** Основы теории формирования отливки: в 2 ч. Ч. 1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки: Учеб. пос. для машиностроительных вузов по специальности «Машины и технология литейного производства». М.: Машиностроение, 1976. 328 с. [Baladin G.F. Foundations of the theory of casting formation: in 2 parts. Part 1. Thermal foundations of the theory. Solidification and cooling of castings: study guide for mechanical engineering universities. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1976. 328 p. (in Russian).]

#### ОБ АВТОРАХ

**ШЕСТАКОВА Екатерина Александровна**, старший преподаватель кафедры технологии машиностроительных производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ».

**ЯМБАЕВ Руслан Мискадесович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроительных производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ».

**ИЕВЛЕВ Валерий Олегович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроительных производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ».

#### METADATA

**Title:** Calculation of the formation time of the elementary volume of aluminum alloy in the process of layer-by-layer growth of aircraft parts

**Authors:** E.A. Shestakova<sup>1</sup>, R.M. Yanbaev<sup>2</sup>, V.O. Ievlev<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>anburg@mail.ru, <sup>2</sup>ruslan-yanbaev@mail.ru, <sup>3</sup>voievlev@kai.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no. 1(103), pp. 32-39, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article discusses theoretical studies on the calculation of the formation time of an elementary volume of aluminum alloy in the process of layer-by-layer growth of aircraft parts. The influence of the configuration of the elementary volume of the

alloy on the kinetics and duration of solidification is analyzed. The main technological parameters of the crystallization process of the elementary volume of the alloy are calculated in the case of three technological variants of the process under study.

**Key words:** aircraft parts, layer-by-layer cultivation of alloy, calculation of process parameters, elementary volume of alloy, thermal balance, cultivation of stringers on the surface of the skin

**About authors:**

**SHESTAKOVA, Ekaterina Aleksandrovna**, Senior Lecturer of the Department of Machine-Building Production Technology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

**YANBAEV, Ruslan Miskadesovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Machine-Building Production Technology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

**IEVLEV, Valeriy Olegovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine-Building Production Technology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.