

УДК 621.74.046

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ СПОСОБОМ ПРЯМОГО ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Е. А. ШЕСТАКОВА¹, Р. М. ЯНБАЕВ², В. О. ИЕВЛЕВ³

¹anburg@mail.ru, ²ruslan-yanbaev@mail.ru, ³voievlev@kai.ru

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»
Россия, г. Казань

Поступила в редакцию 08.12.2023

Аннотация. Статья посвящена моделированию процесса послойного выращивания деталей из алюминиевого сплава. Синтезирована математическая модель процесса на основе теории подобия и размерностей анализа. Выведено критериальное уравнение, описывающее процесс формирования тела детали в случае трех технологических вариантов выращивания. Проведены теоретические расчеты для трех технологических вариантов выращивания детали.

Ключевые слова: моделирование, математическая модель, авиационные детали, алюминиевый сплав, выращивание из сплава.

ВВЕДЕНИЕ

Разработанный авторами способ формирования деталей летательных аппаратов (ЛА) послойным выращиванием из алюминиевых сплавов применяется для изготовления малонагруженных элементов обшивки выращиванием стрингеров на поверхности листовой оболочки. Возможно формирование неразъемного соединения стрингера с обшивкой путем сращивания. В этом случае вместо сварочного шва лазерной или аргоно-дуговой сварки, имеющих ряд существенных недостатков, неразъемное соединение послойно формируется выращиванием между стрингером и обшивкой [1–5] (рис. 1).

В процессе выращивания возникают случаи, когда в месте неразъемного соединения двух деталей образуются горячие узлы, приводящие к порам и трещинам в металле, что значительно снижает прочностные и ресурсные показатели конструкции в целом. В работе приведены результаты математического моделирования, описывающие процесс формирования неразъемных соединений стрингеров к обшивке. В работе синтезирована теоретико-экспериментальная математическая модель, позволяющая задать технологические режимы выращивания для гарантированного бездефектного формирования неразъемного соединения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Модель синтезирована посредством математического аппарата теории подобия и размерностей анализа. Выбор основных физических величин осуществлен таким образом, чтобы более полно описать процессы, происходящие в элементарной ячейке кристаллизующегося сплава.

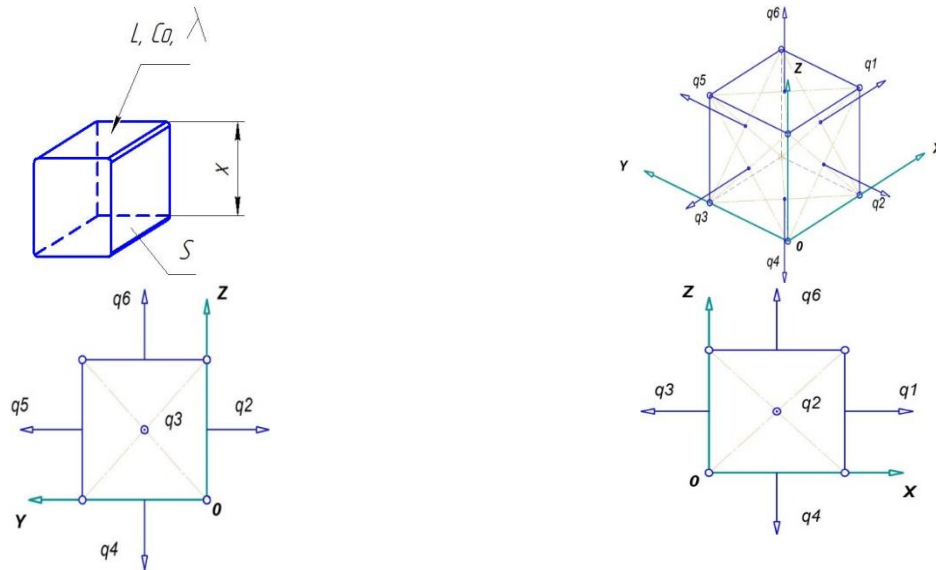


Рис. 1. Расчетная схема элементарной ячейки:

- $q1$ – тепловой поток элементарной ячейки и потоком подаваемого металла в зону кристаллизации;
- $q2$ и $q5$ – тепловой поток между элементарной ячейкой и боковыми роликами;
- $q3$ – тепловой поток между элементарной ячейкой и кристаллизовавшимся телом выращиваемой детали;
- $q4$ – тепловой поток между элементарной ячейкой и жидкой ванной;
- $q6$ – тепловой поток между элементарной ячейкой и верхним рабочим роликом;
- L – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг;
- λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°K);
- S – площадь контакта элементарного объема с выращиваемой деталью, м²;
- C_0 – удельная теплоемкость сплава, Дж/(кг·°K);
- X – ребро элементарной ячейки, мм.

ВЫВОД КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СПЛОШНОГО БЕЗДЕФКТНОГО ТЕЛА

Предложены критерии, описывающие качество выращенного металла. Ими являются $\langle \rho \rangle$ – приведенный удельный вес металла и $\langle r \rangle$ – среднестатистический размер металлического зерна. $\langle \rho \rangle$ и $\langle r \rangle$ – безразмерные величины, характеризующие отклонение соответствующих параметров наплавляемого металла от эталонного сплава по соответствующему ГОСТ в долях или в процентах.

Произведение $\langle \rho \rangle$ и $\langle r \rangle$ показывает полное отклонение по механическим свойствам наплавляемого металла от аналогичных свойств эталонного сплава. На практике стремятся, чтобы произведение $\langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 1$.

Например, для сплава АК8 по ГОСТ 1583-93 – твердость по шкале Бриннеля НВ=135, относительное удлинение $\delta = 8\%$, предел прочности на растяжение $\sigma_p = 430-450$ МПа при термической обработке сплава посредством закалки и старения. Перечисленные показатели механических свойств достигаются при условии:

$$\langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 1 \text{ или } \langle \rho \rangle \langle r \rangle \geq 1 = 100\% \tag{1}$$

Если внешние физико-механические условия формирования элементарного объема металла таковы, что:

$$\langle \rho \rangle \geq 0,98, \langle r \rangle \geq 1 = 0,9 \tag{2}$$

Полное отклонение по механическим свойствам наплавляемого металла от аналогичных свойств эталонного сплава при этих условиях:

$$\langle \rho \rangle \langle r \rangle = 0,98 \cdot 0,9 = 0,882 \tag{3}$$

Это соответствует твердости по шкале Бринеля $HВ=135 \cdot 0,882=119,07$, относительному удлинению $\delta =8 \cdot 0,882=7,056\%$, пределу прочности на растяжение $\sigma_p =430 \cdot 0,882=379,26$ МПа. Спрогнозированные предложенным способом значения механических свойств сплава говорят о недопустимости формирования элементарного объема металла при внешних физико-механических условиях, при которых $\langle \rho \rangle =0,98$, а $\langle r \rangle =0,9$. В этом и заключается предложенный способ оценки и прогнозирования качества металла выращиваемой детали в зависимости от внешних физико-механических условий процесса.

Для построения модели зависимости значений $\langle \rho \rangle$ и $\langle r \rangle$ от внешних физико-механических условий формирования элементарного объема металла детали рассмотрим физику происходящих процессов.

Физическое описание процессов сводится к системе уравнений:

$$\begin{cases} t = \frac{m \left(C_0 + \frac{L}{T_p - T_{\text{сoлидус}}} \right) x}{\lambda S} \ln \frac{(T_p - T_{\text{нод}})}{T_{\text{сoлидус}} - T_{\text{нод}}} \\ \tau = \tau_0 + \left[\frac{\tau^* G b}{\pi \alpha} \right]^{\frac{1}{2}} r^{-\frac{1}{2}} \\ k \frac{x}{2} \rho g \geq \Delta P \\ V_{\text{нод}} = x \frac{1}{t_i} \end{cases} \quad (4)$$

где L – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T_p – рабочая температура сплава, °К; $T_{\text{нод}}$ – температура подложки, °К; ΔP – перепад давления инертной среды, Па; t – время кристаллизации элементарного объема сплава, с; S – площадь контакта элементарного объема с выращиваемой деталью, м²; x – ребро элементарной ячейки, м; ρ – плотность сплава, кг/м³; k – безразмерный коэффициент, характеризующий металлостатический напор внутри формируемой ячейки; g – ускорение свободного падения тела, м/с²; $V_{\text{нод}}$ – скорость подачи, м/с.

Зависимость прочности металла от размера зерна [6]:

$$\tau = \tau_0 + \left[\frac{\tau^* G b}{\pi \alpha} \right]^{\frac{1}{2}} r^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

где τ , τ_0 , τ^* – расчетное, начальное и текущее напряжения сдвига, МПа; G – модуль сдвига, МПа; b – вектор Бюргера, м; α – угол между вектором Бюргера и линией дислокации, характеризующий вид дислокации, град; r – среднестатистический размер металлического зерна, м.

Обозначим существенные величины процесса:

ΔT , $V_{\text{нод}}$, ΔP , V , L , λ , r , ρ , t .

Рассмотрим все переменные, входящие в (4–5) вместе с размерностями:

L – скрытая теплота кристаллизации, [Дж/кг=м²/с²]; λ – коэффициент теплопроводности, [Вт/(м·К)=(кг·м)/(с³·°К)]; T_p и $T_{\text{нод}}$ – рабочая температура сплава и температура подложки, [°К]; ΔT – разность между рабочей температурой и температурой подложки, [°К]; $V_{\text{нод}}$ – скорость подачи, [м/с]; τ – напряжение сдвига, [МПа]=[кг/(с²·м)]; r – среднестатистический размер металлического зерна, [м]; G – модуль сдвига, [кг/(м·с²)]; b – вектор Бюргера, [м]; ΔP – перепад давления инертной среды, [Па]; t – время кристаллизации элементарного объема сплава, [с]; ρ – плотность сплава, [кг/м³]; V – объем элементарной ячейки, [м³].

Окончательно исследуемый процесс формирования сплошного здорового элементарного объема металла можно записать как функциональную зависимость от следующих параметров:

$$\langle \rho \rangle \langle r \rangle = f(L, \lambda, T_p, T_{nod}, \Delta T, V_{nod}, \tau, G, b, \Delta P, t, \rho, V, r) \tag{6}$$

Задача рассмотрена в первичной системе единиц [M], [L], [T], [K]. Матрица размерностей существенных величин представлена в табл. 1.

Основными величинами выбраны $\Delta T, \Delta P, V, V_{nod}$. Определитель $\Delta_{осн.вел.}$ показателей первичных единиц выглядит следующим образом и не должен быть равен 0:

$$\Delta_{осн.вел.} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 3 \\ 0 & -2 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -3 \neq 0$$

Условие выполняется.

Согласно π -теореме число критериев в критериальном уравнении равно разности общего числа существенных величин и числа основных величин, т. е. функциональная зависимость (6) может быть записана в виде:

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_5) = 0 \tag{7}$$

Выразим каждое из π_i через основные величины:

Таблица 1

Матрица размерностей существенных величин

	L	λ	T_p	T_{nod}	ΔT	V_{nod}	τ	G	b	ΔP	t	ρ	V	r
[M], кг	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0
[L], м	2	1	0	0	0	1	-1	-1	1	-1	0	-3	3	1
[T], °C	-2	-3	0	0	0	-1	-2	-2	0	-2	1	0	0	0
[K], К	0	-1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1. Симплекс отношения энергоемкости процесса кристаллизации к силам инерции жидкого металла в элементарном объеме:

$$\pi_1 = \frac{L}{V_{nod}^2}$$

2. Симплекс отношения теплового потока к силам инерции жидкого металла в элементарном объеме, обдуваемого газовой фазой [7]:

$$\pi_2 = \frac{\Delta T \lambda}{\Delta P V_{nod} V^{\frac{1}{3}}}$$

3. Симплекс, характеризующий геометрические характеристики элементарного объема металла. Оценочный безразмерный коэффициент статической устойчивости элементарного объема.

$$\pi_3 = \frac{r}{V^{\frac{1}{3}}}$$

4. Симплекс отношения сил инерции к силам давления со стороны защитной газовой фазы:

$$\pi_4 = \frac{V_{nod} \rho}{\Delta P}$$

5. Симплекс отношения сил инерции к геометрическим размерам элементарного объема. Оценочный безразмерный коэффициент динамической устойчивости элементарного объема

$$\pi_5 = \frac{V_{nod} t}{V^{\frac{1}{3}}}$$

В результате выражение для общего критериального уравнения примет вид:

$$\Delta T = T_p - T_{nod}$$

Рассмотрим последний симплекс π_5 . Очевидно, объем элементарной ячейки сплава неразрывно связан с величиной подачи и временем кристаллизации. Если изменяется скорость подачи, то это приводит к обязательному пропорциональному изменению времени кристаллизации. Это позволяет утверждать, что

$$\pi_5 = \frac{V_{nod}t}{V^{\frac{1}{3}}} \rightarrow 1.$$

Учитывая, что значение симплекса $\pi_5 \rightarrow 1$, критериальное уравнение приобретает окончательный вид:

$$\left(\frac{L}{V_{nod}^2}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{\Delta T \lambda}{\Delta P V_{nod} V^{\frac{1}{3}}}\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{r}{V^{\frac{1}{3}}}\right)^{a_3} \cdot \left(\frac{V_{nod}^2 \rho}{\Delta P}\right)^{a_4} \cdot A = \langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 1.$$

Полученное уравнение позволяет связать основные технологические режимы и параметры процесса с качеством металла выращиваемых изделий [8, 9, 11].

К основным технологическим параметрам и режимам отнесены V_{nod} , T_p , T_{nod} , ΔP .

Синтез значений показателей степеней при симплексах в критериальном уравнении.

Очевидно, что $\Delta T = T_p - T_{nod}$, или для 1-го технологического варианта $\Delta T = 873^\circ\text{K} - 733^\circ\text{K} = 140^\circ\text{K}$, для 2-го технологического варианта $\Delta T = 893^\circ\text{K} - 733^\circ\text{K} = 160^\circ\text{K}$, для 3-го технологического варианта $\Delta T = 913^\circ\text{K} - 733^\circ\text{K} = 180^\circ\text{K}$.

Экспериментально установлено, что значение перепада давлений инертной среды $\Delta P = 54$ Па для $x = 0,005$ мм. При пониженном перепаде давления инертной среды 54 Па наблюдается интенсивное образование окисных пленок в алюминиевом сплаве, и процесс выращивания становится невозможным. При увеличении перепада давления инертной среды более 54 Па наблюдается значительное снижение производительности процесса выращивания, что также недопустимо.

В расчетах принят среднестатистический размер металлического зерна $r = 10^{-5}$ м, поскольку, по данным [10], такой размер металлического зерна гарантированно обеспечивает высокие механические и эксплуатационные свойства алюминиевого сплава.

Кристаллизация элементарного объема сплава при трех технологических вариантах исследуемого процесса отличается количеством поверхностей теплообмена: одна, две и три поверхности соответственно. Каждая поверхность теплообмена формирует зоны первостепенной кристаллизации и зоны с остаточной жидкой фазой. Очевидно, что кристаллизованные зоны на процесс формирования элементарного объема не оказывают никакого влияния. Необходимо вычислить долю или часть остаточной жидкой фазы в общем объеме элементарной ячейки. Доля остаточной жидкой фазы учитывается в знаменателе симплекса π_4 . Доля остаточной жидкой фазы представлена на рис. 2 а, б, в, г.

Значения коэффициента остаточной жидкой фазы в знаменателе симплекса π_4 : для 1-го технологического варианта – 1, для 2-го технологического варианта – 2, для 3-го технологического варианта – 4.

Рассчитаны значения симплексов $\pi_1 - \pi_4$ для каждого из технологических вариантов.

Для 1 технологического варианта:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{L}{V_{nod}^2} = \frac{57333}{0,02^2} = 143 \cdot 10^6, \\ \pi_2 &= \frac{\Delta T \lambda}{\Delta P V_{nod} V^{\frac{1}{3}}} = \frac{140 \cdot 218}{54 \cdot 0,02 \cdot 0,005} = 5,61 \cdot 10^6, \\ \pi_3 &= \frac{r}{V^{\frac{1}{3}}} = \frac{0,00001}{0,005} = 0,002 \\ \pi_4 &= \frac{V_{nod}^2 \rho}{\Delta P} = \frac{0,02^2 \cdot 2500}{54} = 0,0185 \end{aligned}$$

При условии, что $\langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 1$, синтезированы значения показателей степеней при каждом симплексе. Рассчитано значение коэффициента $A = 0,25$.

$a_1=0,245$; $a_2=0,322$; $a_3=2$; $a_4=-1,055$.

Общее критериальное уравнение для 1-го технологического варианта примет вид:

$$\left(\frac{L}{V_{\text{под}}^2}\right)^{0,245} \cdot \left(\frac{\Delta T \lambda}{\Delta P V_{\text{под}} V^{\frac{1}{3}}}\right)^{0,322} \cdot \left(\frac{r}{V^{\frac{1}{3}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{V_{\text{под}}^2 \rho}{\Delta P}\right)^{-1,055} \cdot 0,25 = \langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 1$$

Для 2-го технологического варианта:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{L}{V_{\text{под}}^2} = \frac{114666}{0,03^2} = 127 \cdot 10^6, \\ \pi_2 &= \frac{\Delta T \lambda}{\Delta P V_{\text{под}} V^{\frac{1}{3}}} = \frac{160 \cdot 218}{54 \cdot 0,03 \cdot 0,005} = 4,306 \cdot 10^6, \\ \pi_3 &= \frac{r}{V^{\frac{1}{3}}} = \frac{0,00001}{0,005} = 0,002 \\ \pi_4 &= \frac{V_{\text{под}}^2 \rho}{\Delta P} = \frac{0,03^2 \cdot 2350}{108} = 0,0185 \end{aligned}$$

В случае 2-го и 3-го технологических вариантов условие $\langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 1$ сохранено. Очевидно, что уравнение, описывающее исследуемый процесс, должно гарантировать адекватные результаты при изменениях значений, составляющих это уравнение величин. По этой причине для технологических вариантов 2 и 3 пересчет значений показателей степеней и значений коэффициента A не проводился. Другими словами, значения для a_1 - a_4 и коэффициента A остаются неизменными для всех трех технологических вариантов. Различия в критериальных уравнениях для 1-го, 2-го и 3-го технологических вариантов заключаются только в абсолютном отклонении от 100%. Иначе, условие $\langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 1$ выполняется только для 1-го технологического случая, а для 2-го и 3-го имеет место погрешность, которая для 2-го технологического варианта составляет 13%:

$$\left(\frac{L}{V_{\text{под}}^2}\right)^{0,245} \cdot \left(\frac{\Delta T \lambda}{\Delta P V_{\text{под}} V^{\frac{1}{3}}}\right)^{0,322} \cdot \left(\frac{r}{V^{\frac{1}{3}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{V_{\text{под}}^2 \rho}{\Delta P}\right)^{-1,055} \cdot 0,25 = \langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 0,96$$

Для 3-го технологического варианта:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{L}{V_{\text{под}}^2} = \frac{172000}{0,04^2} = 107 \cdot 10^6, \\ \pi_2 &= \frac{\Delta T \lambda}{\Delta P V_{\text{под}} V^{\frac{1}{3}}} = \frac{180 \cdot 218}{54 \cdot 0,04 \cdot 0,005} = 3,633 \cdot 10^6, \\ \pi_3 &= \frac{r}{V^{\frac{1}{3}}} = \frac{0,00001}{0,005} = 0,002 \\ \pi_4 &= \frac{V_{\text{под}}^2 \rho}{\Delta P} = \frac{0,04^2 \cdot 2200}{216} = 0,016 \end{aligned}$$

Общее критериальное уравнение для 3-го технологического варианта гарантирует погрешность в вычислениях 16%, поскольку условие $\langle \rho \rangle \langle r \rangle \rightarrow 0,84$.

Теоретические и практические данные указаны в табл. 2.

Технологические параметры: теоретические и практические данные

Технологический параметр	Теоретические данные			Среднее отклонение, %	Практические данные		
	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант		1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
$V_{\text{под}}$, м/с	0,02	0,03	0,04	17,8	0,025	0,036	0,046
T_p , К	873	893	913	5	880	900	920
$T_{\text{под}}$, К	833	833	833	8/33	840	850	860
X , мм	0,005			-			

ВЫВОДЫ

1. Математическая модель описывает с высокой вероятностью возникновение дефектов в формирующейся элементарной ячейке в зависимости от скорости подачи жидкого металла в зону выращивания, температуры сплава, металлостатического давления и объема элементарной ячейки.

2. Предложены критерии, описывающие качество выращенного металла: $\langle \rho \rangle$ – приведенный удельный вес металла и $\langle r \rangle$ – среднестатистический размер металлического зерна – безразмерные величины, характеризующие отклонение соответствующих параметров наплавленного металла от эталонного сплава по соответствующему ГОСТ в долях или в процентах.

3. В работе рассмотрены три технологических варианта формирования элементарного объема: выращивание тонкой стенки имеет две плоскости теплообмена, формирование массивной стенки имеет три плоскости теплообмена, формирование внутренних объемов массивного тела имеет 4 плоскости теплообмена.

4. В первом случае погрешность отсутствует, а для 2-го и 3-го технологических вариантов математическая модель показала погрешность в 13 и 16% соответственно.

5. С помощью математической модели, полученной в работе, можно описать процесс при различных температурах металла, производительностях установок выращивания и при различной толщине формируемой стенки за один технологический проход.

6. Экспериментальные значения скорости подачи, температуры металла и температуры подложки различаются на 5 – 17,8% от аналогичных значений, рассчитанных по синтезированной математической модели. Отклонение практических значений от теоретических объясняется тем, что математическая модель не учитывает скачкообразные изменения значений теплофизических свойств алюминиевого сплава при фазовом переходе первого рода. С другой стороны, в алюминиевом сплаве, находящемся при температуре $T_{\text{сол}}$ и ниже, газовая пористость и поры образоваться не могут, а среднестатистический размер зерна формируется исключительно при температурах выше $T_{\text{сол}}$. По этой причине полученные отклонения практических и теоретических параметров не оказывают значимого влияния на адекватное описание вероятности возникновения дефектов в металле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестакова Е.А., Ямбаев Р.М., Галдина А.Ю. Высокопроизводительный способ изготовления фасонных деталей типа тел вращения из алюминиевых сплавов// Пат. № 2707371 Рос. Федерация, заявка № 2018129030, заявл. 06.08.2018, опубл. 26.11.2019, бюл. № 33. [*High-efficiency method of making shaped parts of rotation bodies from aluminum alloys*. Russian Federation Patent No. 2707371.]
2. Шестакова Е.А., Ямбаев Р.М. Открытое загрузочное окно высокотемпературной печи или камеры с активной тепловой воздушной завесой// Пат. № 203472 Рос. Федерация, заявка № 2020140313, заявл. 07.12.2020, опубл. 06.04.2021, бюл. №10. [*Open charging door of a high-temperature furnace or chamber with an active hot-air curtain*. Russian Federation patent No. 203472.]
3. Шестакова Е.А., Иевлев В.О., Ямбаев Р.М., Курьев 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. **Мак Лин Д.** Механические свойства металлов. М.: Metallurgiya, 1965. 242 с. [McLean D. *Mechanical properties of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1965. 242 p. (in Russian).]

7. **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).]

8. **Чистяков В.В.** Методы подобия и размерностей в литейной гидравлике. М.: Машиностроение, 1990. 224 с. [Chistyakov V.V. *Methods of similarity and dimensions in foundry hydraulics*. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 224 p.]

9. **Чуркин Б.С.** Численные методы расчета кинетики затвердевания отливок. Свердловск: Изд-во УПИ, 1985. 70 с. [Churkin B.S. *Numerical methods for calculating the kinetics of solidification of castings*. Sverdlovsk: UPI Publ., 1985. 70 p. (in Russian).]

10. **Тимофеев Г.И.** Механика сплавов при кристаллизации слитков и отливок. М.: Metallurgiya, 1976. 160 с. [Timofeev G.I. *Mechanics of alloys during the crystallization of ingots and castings*. Moscow: Metallurgiya, 1976. 160 p. (in Russian).]

11. **Иванов Н.И., Гольденберг И.Б., Торопов Е.В.** Теория подобия и моделирование: учеб. пос. Магнитогорск: МГМИ, 1974. 58 с. [Ivanov N.I., Goldenberg I.B., Toropov E.V. *Similarity theory and modeling: study guide*. Magnitogorsk: MGMI, 1974. 58 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».

ЯНБАЕВ 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: Modeling of the process of forming of aircraft parts by direct layer-by-layer growth of aluminum alloys.

Authors: E.A. Shestakova¹, R.M. Yanbaev², V.O. Ievlev³

Affiliation:

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

Email: ¹anburg@mail.ru, ²ruslan-yanbaev@mail.ru, ³voievlev@kai.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no. 1 (103), pp. 40-47, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article is devoted to modeling the process of layer-by-layer growth of aluminum alloy parts. A mathematical model of the process is synthesized based on the theory of similarity and dimensions of analysis. A criterion equation describing the process of forming the body of a part in the case of three technological variants of cultivation is derived. Theoretical calculations have been carried out for three technological variants of part growing.

Key words: modeling, mathematical model, aviation parts, aluminum alloy, growing from alloy

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.