

Научная статья  
УДК 629.7.01:658.5  
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188036>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/FUELAS>



## Конструкторско-технологические решения в выборе рациональной заготовки ответственных деталей авиационно-ракетной техники на основе создания цифровых двойников

Любовь Ивановна Миронова<sup>1✉</sup>, Владимир Георгиевич Дмитриев<sup>2</sup>, Станислав Михайлович Коваль<sup>3</sup>, Олег Александрович Колесник<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

<sup>1</sup> [mironova\\_lub@mail.ru](mailto:mironova_lub@mail.ru)<sup>✉</sup>, orcid 0000-0002-0927-4679

<sup>2</sup> [vgd2105@mail.ru](mailto:vgd2105@mail.ru)

<sup>3</sup> [kovalstanislav17@gmail.com](mailto:kovalstanislav17@gmail.com), orcid 0009-0002-7004-8037

<sup>4</sup> [13kola45@gmail.com](mailto:13kola45@gmail.com), orcid 0009-0009-8278-661X

**Аннотация.** Изложена сущность принятия рациональных конструкторско-технологических решений в вопросах выбора вида заготовки и материала на детали изделий авиационно-ракетной техники. В этом аспекте рассмотрены первоочередная роль конструктора и его ответственность на этапе проектирования авиационных конструкций, конечной целью которых является получение продукта высокого качества с требуемыми эксплуатационными характеристиками и заданным ресурсом. Отмечены достоинства применения литых заготовок в авиационной промышленности, изготовленных из высокопрочных алюминиевых сплавов, и выделены вопросы, решение которых непосредственно связаны с выбором и назначением вида заготовки, марки литейного сплава, а также снижением трудоемкости производства изделия в целом. Дан краткий анализ особенностей литейного производства отливок и приведены характеристики применяемых традиционных и перспективных литейных алюминиевых сплавов. Многофакторность взаимных связей литейного заготовительного передела и их вариативность осложняет выбор ключевых параметров заготовки. Отмечено, что перспективным инструментарием здесь является реализация новых технологий цифрового прототипирования производственных процессов на базе создания цифровых двойников. Приведены примеры применения в проектной практике программных продуктов систем компьютерного моделирования литейных процессов. Показаны функциональные возможности отечественного программного комплекса «ПолигонСофт», позволяющие моделировать сложные процессы заполнения и кристаллизации жидкого расплава, теплообмена в литейной форме, а также прогнозировать литейные дефекты усадочного и другого характера. Приведены результаты моделирования формообразования типовых деталей авиационной техники, изготовленных литьем в металлические формы из различных марок алюминиевых сплавов. Отмечено, что тестирование виртуальных прототипов в системах компьютерного моделирования производственных процессов позволяет выявить наиболее критические зоны с точки зрения технологической отработки процессов изготовления и обеспечения требуемых качественных и количественных характеристик разрабатываемого изделия.

**Ключевые слова:** принятие конструкторско-технологических решений, цифровое прототипирование, выбор вида заготовки, виртуальные прототипы, технологическая отработка процессов изготовления, снижение трудоемкости производства

**Для цитирования:** Миронова Л.И., Дмитриев В.Г., Коваль С.М., Колесник О.А. Конструкторско-технологические решения в выборе рациональной заготовки ответственных деталей авиационно-ракетной техники на основе создания цифровых двойников // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 2. С. 52-62. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188036>

© Миронова Л.И., Дмитриев В.Г., Коваль С.М., Колесник О.А., 2026

Original article

## Design-and-Technological Solutions for Rational Blanks Selection of the Aviation-and-Rocket Engineering Critical Parts Based on Digital Twins Creation

Lyubov' I. Mironova<sup>1✉</sup>, Vladimir G. Dmitriev<sup>2</sup>, Stanislav M. Koval<sup>3</sup>, Oleg A. Kolesnik<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

<sup>1</sup> mironova\_lub@mail.ru✉, orcid 0000-0002-0927-4679

<sup>2</sup> vgd2105@mail.ru

<sup>3</sup> kovalstanislav17@gmail.com, orcid 0009-0002-7004-8037

<sup>4</sup> 13kola45@gmail.com, orcid 0009-0009-8278-661X

### Abstract

The article adduces the gist of rational design-and-technological decisions making in matters of blank type and material selection for the parts of aviation and rocket engineering. In this regard, the top-priority and responsibility of the designer at the stage of the aviation structures designing, which ultimate goal consists in obtaining the high-quality product with the required performance characteristics and specified service life. Focusing on the advantages of the cast blanks application in aircraft building, particularly on the castings from the aluminum alloys, some problems of foundry, which directly linked with both selecting and assigning of the blank type and casting alloy grade, are adduced. The article provides a brief analysis of casting production features and presents characteristics of both traditional and promising aluminum casting alloys. The multifactor nature of the interrelationships in the casting preparation stage complicates selection of the blank key parameters. It is noted that implementation of new technologies for production process digital prototyping based on the digital twins creation is a prospective tooling. The article provides the examples of the software products applied for the casting processes computer modeling of in the design practice. Functional capabilities of the “PoligonSoft” domestic software product, which allow simulating complex processes of the liquid metal filling and crystallization, heat exchange in the casting mould, as well as predicting casting defects of shrinkable and other character, are adduced. The article presents the results of modeling typical aviation engineering parts manufactured by casting with the metal moulds from various grades of aluminum alloys. It is noted that the virtual prototypes testing with the computer systems for production processes modeling allows detecting the most critical zones from the viewpoint of ensuring specified qualitative and quantitative characteristics of the product being developed. The developer gets the software tools and extensive opportunities for refining the design configuration and technical requirements, as well as managing the production process cycle. Thus, a unified information environment is being formed, in which the design and technological plans of specialists with a wide range of competencies are being realized through the digital maintenance of the twins at the stages of the product life cycle “development – design – manufacturing”.

**Keywords:** design and technological decisions making, digital prototyping, of blank type selection, virtual prototypes, technological try-out of manufacturing processes, reducing labor intensity

**For citation:** Mironova L.I., Dmitriev V.G., Koval S.M., Kolesnik O.A. Design-and-Technological Solutions for Rational Blanks Selection of the Aviation-and-Rocket Engineering Critical Parts Based on Digital Twins Creation. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(2):52-62. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188036>

### List of Figures

Fig. 1. The structure of the system approach to the design-and-technological decisions making while the part material and its blank type assigning

Fig. 2. 3D-models of castings with the gating and feeding system:

*a* – casting for the “disc” part; *b* – casting for the “flange” part; *c* – casting for the ‘torque link’ part

Fig. 3. Fragments of animated frames demonstrating formation and quality characteristics prediction of the “torque link” casting:

*a* – solidification dynamics; *b* – shrinkage porosity prediction; *c* – casting deformation

Fig. 4. The AC4Mg (AL24M) alloy microstructure, die casting: *a* – the alloy grain growth simulation with the program cellular apparatus model; *b* – the sample microstructure in the cast state prior to the heat treatment x200 [10], the dark color inclusions are the eutectic precipitates of the  $\alpha^+$  T(AL2Mg3Zn3); *c* – the sample microstructure in the cast state after the heat treatment x 200 [18]

Fig. 5. The torque link bolted connection: 1 – upper link; 2 – lower link; 3, 4, 5 – bolt, nut, washer

Fig. 6. Dynamics of the heat process forming: *a* – the key animation frames of the heat process simulation in the casting–mould system; *b* – shrinkage porosity prediction of the blank

### List of Tables

Table 1. Casting aluminum alloys employed in various types of casting

Table 2. Cast aluminum alloys mechanical properties

Table 3. Casting types characteristics

## Введение

Проектный цикл разработки изделий авиационной техники (АТ) – это длительный и сложный процесс, состоящий из комплекса промежуточных этапов, начиная, например, с создания концептуальной модели изделия и заканчивая разработкой рабочей конструкторской документации (РКД). Реализация этих этапов наряду с традиционными подходами базируется на современных методах проектирования (концептуального, системного, функционального и др.) [1–6] с применением компьютерных технологий, основными целями которых являются оптимизация процессов разработки перспективных образцов и сокращения материальных затрат.

В настоящее время в проектную практику широко внедряются технологии цифрового моделирования как самих разрабатываемых изделий, так и производственных процессов на всем протяжении их жизненного цикла [7, 8]. Таким образом, успешно реализуется концепция цифровых двойников продукта, которая позволяет на начальном этапе проектного цикла разрабатывать не только технический облик изделия, но и проектировать его стоимость изготовления [9, 12].

Так, например, этап формирования технической концепции проекта нового изделия АТ включает интеграцию инновационных конструкторско-технологических решений, направленных на получение продукта высокого качества с требуемыми эксплуатационными характеристиками и заданным ресурсом. Слабым звеном при этом является реализация технологических возможностей производства новых изделий, связанных с техническим оснащением производственных площадок современными оборудованием, инструментальным и контрольно-измерительным комплексами.

Частичное решение такой проблемы может быть обеспечено за счет внедрения в отрасли системной интеграции технологий, заключающейся в накоплении полезных технологий и применении их на практике в наиболее эффективном сочетании [13]. Под

термином «полезные технологии» подразумевается высокопроизводительный инструментальный комплекс, развитый, или который следует развивать в каждом технологическом переделе производства, например, заготовительном, механообрабатывающем и сборочном сегментах.

Коснемся такого важного звена в производственной цепочке, как изготовление заготовки на деталь. Материал и выбор заготовки назначает конструктор, указывая в рабочем чертеже детали способ ее получения, а также технические требования к выполнению нормированных показателей качества (точность заготовки, наличие технологических дефектов и т. д.). В большинстве случаев детали со сложной конструктивной формой (например, картеры, корпуса и крышки редукторов, фланцы и пр.) изготавливаются из проката или поковок, что приводит к значительному увеличению трудоемкости механообрабатывающих работ и большому объему переработки снимаемого металла в стружку. Наиболее рациональным решением в назначении видов таких заготовок является применение штампованных или литых заготовок. В число полезных технологий для их производства входят технологии литейного производства и обработки металлов давлением.

Если раньше указанный выбор способа изготовления заготовки требовал многократные согласования разработчиков с технологическими службами специализированных предприятий и проработку конструкции на технологичность в каждом заготовительном переделе, то в настоящее время эти растянутые во времени мероприятия успешно заменяются виртуальным моделированием цифровых двойников в CAD/CAPP/CAE-системах компьютерного моделирования технологических процессов (СКМ ТП). Отсюда появляется необходимость пересмотра базовых принципов в реализации основной задачи разработчиков нового изделия АТ от конструкторского замысла до создания конструкторской документации на изделие. Весьма важным здесь является учитывать эффективность

изготовления, а также особенности организации производства качественной продукции на основе разработки цифровых двойников и проведения моделирования технологических процессов.

Целью статьи является обоснование и масштабирование инструментария проработки конструкторско-технологических решений в проектной практике, реализуемых программными средствами CAD/CAPP/CAE-систем с применением современных цифровых технологий, внедрение которых значительно расширяет компетенции разработчиков.

### Анализ особенностей литейного производства отливок из литейных алюминиевых сплавов

Отметим, что в настоящее время номенклатура используемых литых заготовок в авиастроении незначительная. К числу сдерживающих факторов ее расширения, помимо существующих системных проблем литейного производства [14], следует также отнести выполнение повышенных требований, предъявляемых к прочности изделия, обеспечение которых во многом определяются качеством литья: отсутствием технологических дефектов, формированием плотной структуры материала с минимальным уровнем остаточных напряжений, товарным видом заготовки и прочими ее свойствами. Это в свою очередь существенно зависит от выбора способа литья и марки литейного сплава [15, 16]. Тем не менее, в конструкциях авиационных двигателей ПД-8, ПД-14, а также других силовых установках имеются литые детали из легких алюминиевых сплавов (силуминов), изготовленные в России, в числе которых: сложные по геометрической форме тонкостенные корпусные

детали, картеры, блоки цилиндров, крышки редукторов, насосов, фланцы и пр.

Отметим также, что каждая технология литья характеризуется набором индивидуальных технологических факторов, определяющих, в конечном счете, структуру и уровень свойств готовых отливок. Таким образом, принятие конструкторско-технологического решения в проектном цикле разработки РКД можно проиллюстрировать некоторой замкнутой системой взаимоотношений связи значимых ее компонентов и факторов их влияния (рис. 1), которые необходимо проанализировать проектировщику при назначении материала детали и вида ее заготовки.

Вариативный ряд литейных алюминиевых сплавов ограничивается способом получения литья, который в свою очередь формирует качественные свойства отливки. В табл. 1 приведены характеристики традиционных и некоторых перспективных алюминиевых сплавов, применяемых в различных видах литья [17].



Рис. 1. Структура системного подхода в принятии конструкторско-технологических решений при назначении материала детали и вида ее заготовки

Таблица 1. Литейные алюминиевые сплавы, применяемые в различных видах литья

Сплавы на основе системы	Сплав	Обозначение вида литья	Технологические и механические свойства сплавов. Качественные показатели отливки
Al-Si-Mg	AK12 (AL12)	ЛПФ, ЛВМ, ЛД	Хорошие технологические литейные свойства, отсутствие горячих трещин. Термически не упрочняется. Недостаточная механическая прочность. Склонен к образованию газовой пористости и усадочных раковин. Хорошая свариваемость и коррозионная стойкость
	AK7ч (AL9)	ЛПФ, К, ЛНД	Хорошие технологические литейные и механические свойства. Минимальная литейная усадка. Не склонен к трещинообразованию. Хорошая коррозионная стойкость и герметичность
Al-Si-Cu	AK5M (AL15)	ЛПФ, ЛВМ, ЛД	Удовлетворительные технологические литейные свойства, свариваемость и коррозионная стойкость. Пониженная склонность к образованию газовой пористости. Хорошая теплопроводность. Высокая механическая прочность. Повышенная жаропрочность. Пониженная пластичность
Al-Mg	AMг6л (AL 23) AMг10л (AL 27)	ЛПФ, К	Высокопрочные и коррозионно-стойкие сплавы. Хорошие технологические литейные свойства и высокие механические свойства. Хорошая свариваемость и пластичность
Al-Zn-Mg	AC4Mг (AL24M)	ЛПФ, К	Высокопрочный и коррозионно-стойкий сплав. Высокие технологические литейные и механические свойства. Ограниченная свариваемость. Высокая жаропрочность. Хорошие герметические свойства.
Обозначения видов литья: ЛПФ – литье в песчаные формы; ЛВМ – литье по выплавляемым моделям; ЛД – литье под давлением; К – литье в кокиль; ЛНД – литье под низким давлением			

Сплавы АМгбл (АЛ 23), АМг10л (АЛ 27), АЦ4Мг (АЛ24М) относятся к высокопрочным литейным сплавам. Причем наиболее высокие показатели механических свойств, плотности и герметичности отливок достигаются при литье в металлические формы. Однако применение высокопрочных литейных алюминиевых сплавов ограничено. Это связано, прежде всего, с отработкой технологии полного литейного цикла, включая приготовление сплава, поскольку готовые чушки с соответствующим химическим составом металлургическая промышленность не выпускает.

В табл. 2 приведены сравнительные параметры механических свойств литейных алюминиевых сплавов в различных видах литья [17, 18].

В процессе выбора вида литой заготовки и способа литья проектировщик должен ориентироваться не только на возможности литейного производства в обеспечении требуемых качес-

ственных показателей, но и оценивать стоимость изготовления литой детали. Сочетание таких важных конструктивно-технологических требований как обеспечение заданных механических и эксплуатационных свойств, минимальных припусков на механическую обработку, допускаемых технологических дефектов, формирование качественного состояния поверхностного слоя и хорошего внешнего вида не всегда удается выполнить при назначении того или иного метода литья, при котором необходимо учитывать также номенклатуру и программу выпуска отливок. В результате разработчики должны ориентироваться на экономические параметры, включая стоимость производства и эксплуатации, что особенно актуально для создания сложных систем авиационной техники.

Многофакторность выбора способа литья иллюстрируется табл. 3.

Таблица 2. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Способ литья	Режим термической обработки	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение, %
АК12 (АЛ2)	ЛД	–	150	2
АК7ч (АЛ9)	ЛПФ	T4	177	4
	К, ЛНД	T6	294	3
АМгбл (АЛ 23)	ЛПФ	–	186	4
	К, Д	–	216	6
АМг10л (АЛ 27)	ЛПФ, К, Д	T4	314	12
АЦ4Мг (АЛ24М)	ЛПФ	–	216	2
	К, ЛНД	–	460	9,5

Таблица 3. Характеристики видов литья

Вид литья	Конфигурация деталей	КИМ	Rz, Ra, мкм	Описание структуры	Тип производства	Примечание
ЛПФ	Любая по сложности	0,35	Rz 320	Газовая пористость, раковины, шлаковые включения, недоливы	Е, МС, СС, М	Длительный технологический цикл получения готовой отливки (в среднем 5 рабочих дней)
ЛВМ	Мелкие и средние по габаритам; средние по сложности	0,5–0,8	От Rz 80 до Ra 6,3	Усадочные раковины, несплошности, инородные включения	МС, СС, М	Длительный технологический цикл получения готовой отливки (не менее 5 рабочих дней)
ЛД	Тонкостенные и фасонные детали, толщина стенки от 2 до 6 мм	0,7–0,95	Ra 6,3, 3,2	Пористая структура с твердой литой коркой	МС, СС, М	Высокая автоматизация и производительность процесса, большой выход годного
К, ЛНД	Детали средней сложности, толщина стенки от 4 мм и выше	0,6–0,8	Ra 6,3, 3,2	Плотная структура	МС, СС, М	Высокая автоматизация процесса, большой выход годного

Обозначения: КИМ – коэффициент использования материала; Rz, Ra – параметры шероховатости литых поверхностей; тип производства: Е – единичный; МС – мелкосерийный; СС – среднесерийный; М – массовый

## **Конструкторско-технологические решения в назначении вида заготовки на детали изделий АТ. Подходы и методы**

Вышеприведенные данные иллюстрируют многовариантность возможных решений при назначении вида заготовки и выбора материала конструкции. Отсюда следует выделить ответственность разработчика в принятии данного решения, поскольку назначение марки материала и его заменителя в чертеже детали устанавливает требования на ее изготовление в производстве, при выполнении которых должны быть обеспечены эксплуатационные характеристики изделия в целом. Перспективным инструментарием при рассмотрении данного аспекта является реализация новых технологий цифрового прототипирования производственных процессов на базе создания цифровых двойников.

В качестве примера приведем преимущества применения в проектной практике программных продуктов систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), например ProCAST (ESI Group, Франция), ПолигонСофт (PolygonSoft, АО «СиСофт Девелопмент», Москва), LVMFlow (НПО МКМ, Ижевск) [19]. Данные комплексы позволяют решать ряд важных вопросов, касаемых широких возможностей применения литейного производства деталей в авиастроении из легких алюминиевых, медных и других литейных сплавов, а также получения деталей с функционально изменяемым составом (армированное литье).

Среди отечественных разработок выберем СКМ ЛП ПолигонСофт. Данная система адаптирована к российским стандартам и материалам, обладает большими функциональными возможностями, способная моделировать сложные процессы заполнения и кристаллизации жидкого расплава, теплообмена в литейной форме и прогнозировать литейные дефекты усадочного и другого характера. Встроенные расчетные модули позволяют получить информацию о скорости затвердевания жидкой фазы, росте зерен в структуре расплава, ее плотности и т. д.

Процесс моделирования в СКМ ЛП ПолигонСофт начинается с разработки 3D-модели отливки для конкретного вида литья в САД-системе, интегрирования ее в сеточный генератор программы для построения конечно-элементной (КЭ) сетки высокой точности и подготовки КЭ-модели к расчету. Таким образом, мы используем цифровой двойник, который в отличие от традиционных подходов компьютерного инженерного анализа включает информацию не только о количественных свойствах заготовки (материал, геометрические

параметры, припуски на механическую обработку, шероховатость поверхности и пр.), но и определяет конструктивное исполнение литнико-питающей системы (ЛПС), конструкцию литейной формы и ее формообразующих элементов. Покажем это на примере выбора вида литья для реальных конструкций авиационного назначения, в числе которых: крышка армированная, фланец, звено шлиц-шарнира.

Рассматриваются следующие виды литья: литье под давлением, литье под низким давлением, литье в кокиль. Они относятся к высокопроизводительному способу изготовления заготовки, а именно, к машинному виду литья сплавов в металлические формы. Отливки, полученные данным способом, характеризуются высокими показателями механических свойств, плотностью и герметичностью структуры, хорошим внешним видом с наибольшим выходом годного.

Многопараметричность расчетной области комплекса и реализация сложной математической модели, вычислительный аппарат которой базируется на решении фундаментальных дифференциальных уравнений теплопроводности, тепломассопереноса, гидродинамики, механики сплошных сред, кинетических уравнений фазовых превращений и т.д., позволяет получить покадровую анимацию процесса формирования качественных характеристик отливок в вариативном исполнении. На рис. 2 приведены модели отливок с литниково-питающей системой.

На рис. 3 представлены результаты моделирования формообразования детали «звено шлиц-шарнира» при литье в кокиль из сплава АК7ч ГОСТ 1583-93.

Данная деталь является конструктивным элементом амортизационной стойки шасси самолета. Деталь имеет вильчатую конструкцию с одинарными и двойными проушинами. Поэтому выбор способа получения литой заготовки и марки высокопрочного алюминиевого сплава весьма важен в обосновании принятия конструкторско-технологического решения по обеспечению прочностной надежности и заданного ресурса механизма. В комплексе СКМ ЛП ПолигонСофт проведена симуляция строения микроструктуры сплава в зависимости от режима охлаждения отливки.

При вариации литейных сплавов, обладающих различными теплофизическими характеристиками и технологическими литейными свойствами, а также учете выбора способа литья были получены наилучшие показатели по пористости структуры заготовки из сплава АЦ4Мг (АЛ24М), отлитой в кокиль. Проведенные исследования применения данного высокопрочного сплава при литье в кокиль отражены в работе [18].

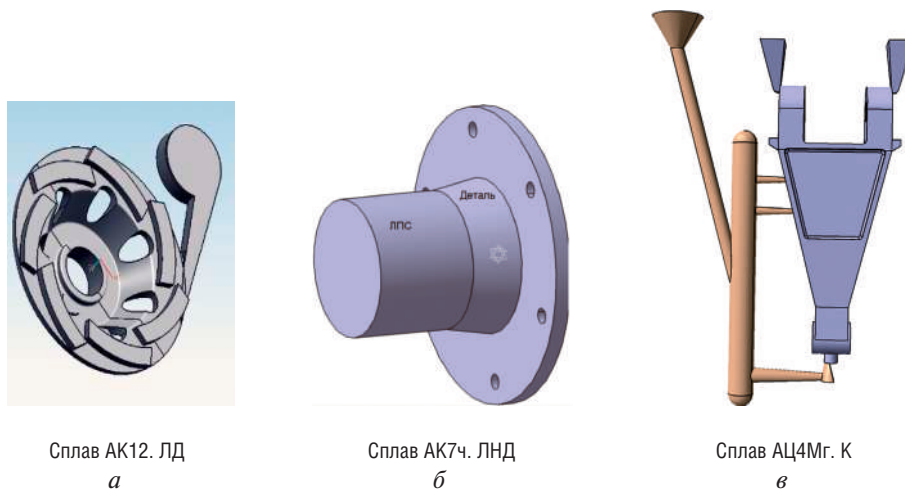


Рис. 2. 3D-модели отливок с ЛПС:

*a* – отливка на деталь «диск»; *b* – отливка на деталь «фланец»;  
*в* – отливка на деталь «звено шлиц-шарнира»

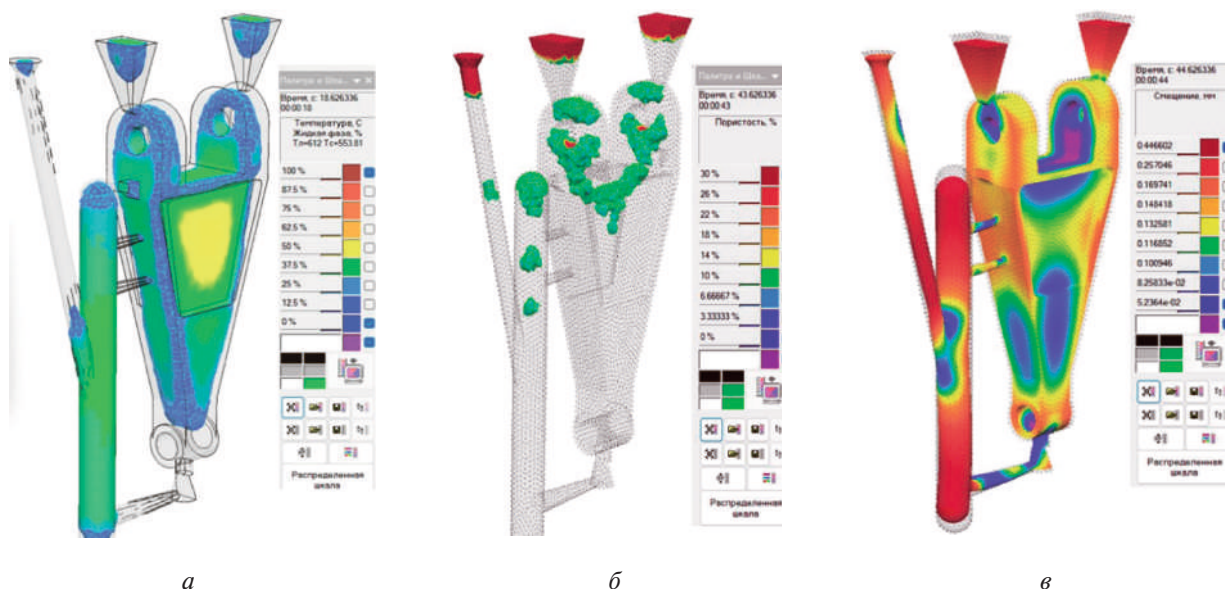


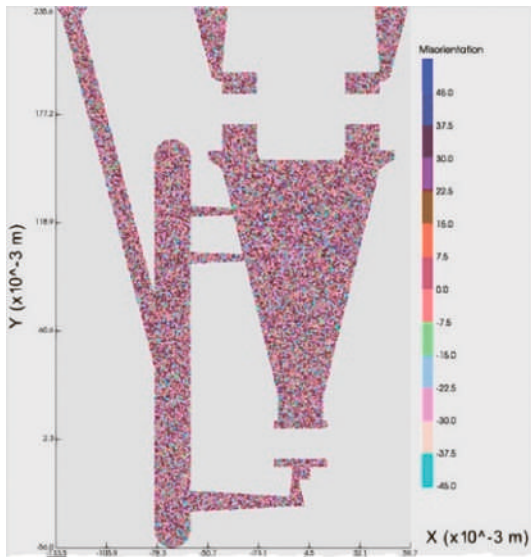
Рис. 3. Фрагменты анимационных кадров формообразования и прогнозирования качественных характеристик отливки «звено шлиц-шарнира»:

*a* – динамика затвердевания; *b* – прогнозирование усадочной пористости; *в* – деформация отливки

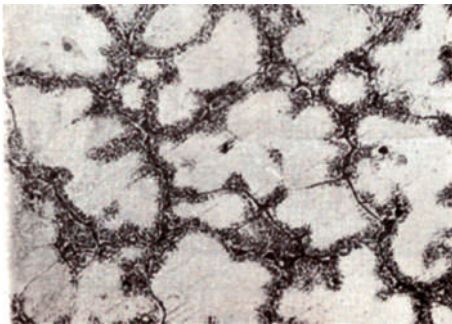
По характеристикам, приведенных в литературе [17, 18], повышенная прочность сплава АЦ4Мг (АЛ24М) системы Al-Zn-Mg обусловлена выделением в эвтектике упрочняющей фазы  $T(Al_2Mg_3Zn_3)$ . Высокая устойчивость твердых растворов цинка, магния и алюминия обеспечивают самозакалку сплава в процессе охлаждения. Размеры и распределения твердых растворов в микроструктуре зависят от условий охлаждения сплава в процессе кристаллизации.

Сравнение полученных результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, опубликованных в работе [18], показывают высокую степень их совпадений (рис. 4).

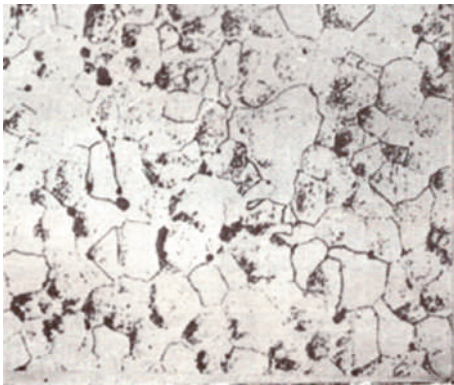
Выделим проблему, связанную с применением в авиационной технике облегченных силовых конструкций (кронштейнов, вильчатых стоек, крышек и т.д.), выполненных из алюминиевых сплавов. Номенклатура таких конструкций в изделиях ограничена вследствие высокого износа контактирующих поверхностей в местах сопряжения и крепления ответных деталей. Одним из эффективных конструкторско-технологических решений рассматриваемого вопроса может быть реализация широких возможностей литья в изготовлении литых армированных заготовок (ЛАЗ). Так, например, работоспособность верхнего и нижнего звеньев шлиц-шарнира во многом зависит



а



б



в

Рис. 4. Микроструктура сплава АЦ4Мг (АЛ24М), литые в кокиль:

- а – симуляция роста зерен сплава модели клеточного аппарата программы;
- б – микроструктура образца в литом состоянии до термической обработки  $\times 200$  [18], включения темного цвета представляют собой эвтектические выделения типа  $\alpha + T(Al_2Mg_3Zn_3)$ ;
- в – микроструктура образца в литом состоянии после термической обработки  $\times 200$  [18]

от размеров зоны контакта трущихся поверхностей и величины зазора  $\delta$ , заложенной в конструкции шарнирно-болтового соединения амортизационной стойки шасси (рис. 5).

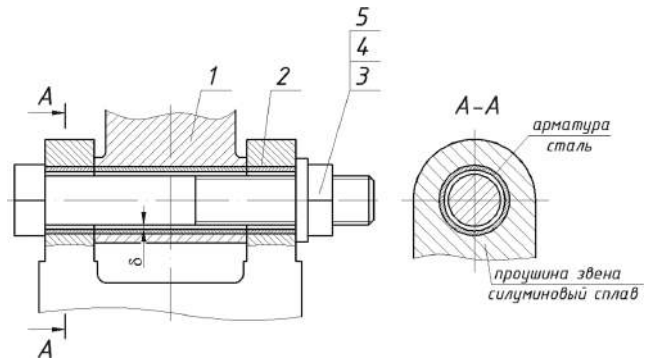


Рис. 5. Болтовое соединение шлиц-шарнира стойки шасси:

- 1 – звено верхнее; 2 – звено нижнее;
- 3, 4, 5 – болт, гайка, шайба

При многократном силовом нагружении и разгрузке шлиц-шарнира поверхность отверстий в алюминиевых звеньях изнашивается, контуры отверстий изменяют свою форму, что приводит к перекосам и задирам в работе и, как следствие, к снижению ресурса механизма. Применение литейной заготовки с армированной стальной втулкой существенно повышает антифрикционные свойства узла крепления контактирующих элементов.

Успешное применение армированных литых конструкций объясняется возможностью значительного расширения функциональных и эксплуатационных свойств изделия, работающего в условиях длительных силовых и тепловых воздействий. К таким деталям относятся элементы конструкций двигателей внутреннего сгорания, подшипники, крышки, вкладыши, инструменты и т. д. Процесс формообразования ЛАЗ сопровождается многими факторами, влияние которых на формирование свойств и качества заготовки в настоящее время недостаточно изучены. Присутствие армированных элементов формируют при кристаллизации расплава локальные зоны высокоградиентных температурных полей на границах раздела «жидкий сплав – армированный элемент», «жидкий сплав – форма», «армированный элемент – форма» [20]. Возникающие в процессе литья неоднородное высокоградиентное термонагружение литейного блока, неравномерная объемная деформация металла сопровождаются концентрацией упругопластических напряжений в окрестностях контура арматуры и способствуют образованию технологических дефектов заготовки в виде коробления, пористости, усадочных раковин и трещин.

В качестве примера приведем результаты исследования процесса формообразования армированной литой детали «диск» (рис. 2,а). Исходные данные: материал диска – сплав АК12, материал вставок – твердый тугоплавкий сплав ВК8, вид литья – литье под давлением (рис. 6).

Проведенный анализ процесса формообразования литой армированной заготовки на базе созданного цифрового двойника в комплексе СК МЛП «ПолигонСофт» способствовал решению ряда вопросов в поиске оптимальных условий изготовления отливки с заданными функциональными свойствами.

Тестирование виртуальных прототипов в системах компьютерного моделирования производственных процессов позволяет выявить наиболее критические зоны с точки зрения обеспечения требуемых качественных и количественных характеристик разрабатываемого объекта, обусловленных особенностями заготовительного производства. Разработчик получает программный инструмент и широкие возможности в уточнении конфигурации конструкции и технических требований, а также в управлении технологическим циклом литья программными средствами. Однако не будем забывать, что разработку технологий производства заготовки осуществляют конструкторско-технологические службы предприятия-изготовителя. Таким образом, формируется единая информационная среда, в которой реализуются конструкторско-технологические замыслы специалистов, обладающих

широким спектром компетенций, через цифровое сопровождение двойников на этапах жизненного цикла изделия «разработка – проектирование – изготовление».

## Выводы

1. Этап формирования технической концепции проекта нового изделия АТ включает интеграцию инновационных конструкторско-технологических решений, направленных на получение продукта высокого качества с требуемыми эксплуатационными характеристиками, и связаны, в том числе, с необходимостью проведения анализа реализации технологических возможностей производства новых изделий.

2. Приведены преимущества применения в проектной практике современных программных продуктов систем компьютерного моделирования технологических процессов изготовления изделий АТ на базе отечественного комплекса ПолигонСофт, позволяющего моделировать формообразование литых заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов для деталей авиационного назначения. Многофакторность взаимных связей литейного заготовительного передела и их вариативность осложняет выбор ключевых параметров заготовки.

3. Тестирование виртуальных прототипов в системах компьютерного моделирования производственных процессов позволяет выявить наиболее критические зоны с точки зрения технологической отработки процессов изготовления и обеспечения

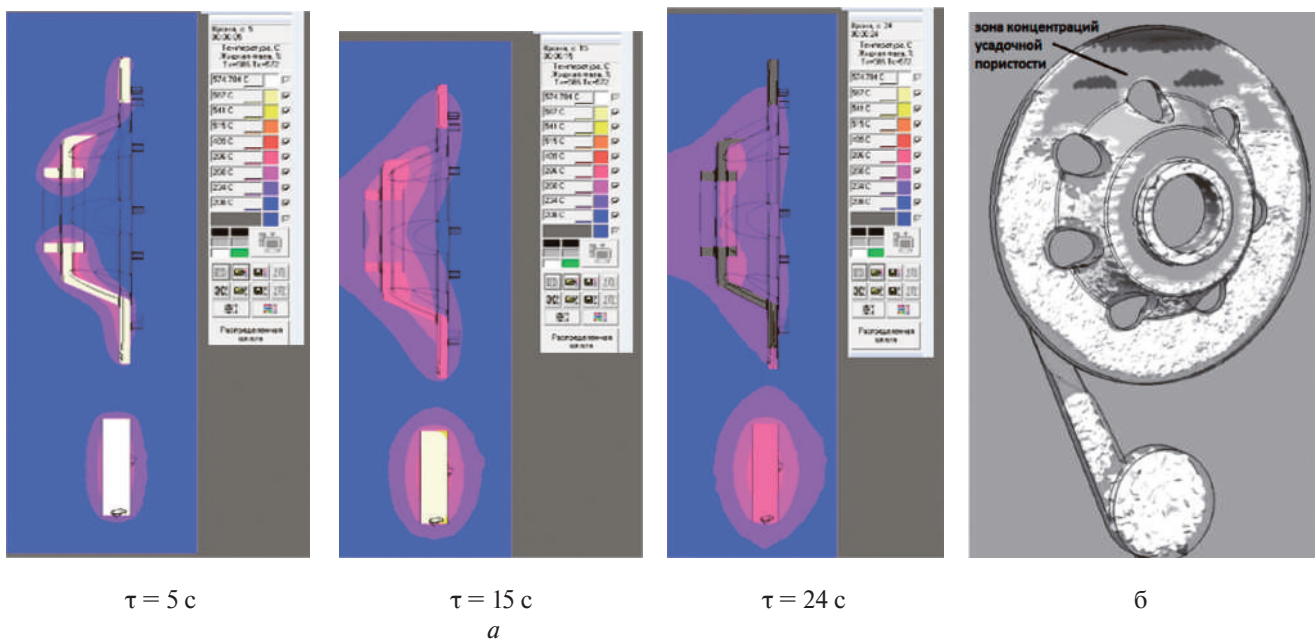


Рис. 6. Динамика формирования теплового процесса:

а – ключевые анимационные кадры моделирования теплового процесса в системе отливка – форма;  
б – прогнозирование усадочной пористости заготовки

требуемых качественных и количественных характеристик разрабатываемого изделия.

4. Внедрение в рабочую практику конструктора-проектировщика технологий цифрового прототипирования на базе создания цифровых двойников значительно расширяет его компетенции и функционал в сфере взаимодействия «разработчик – изготовитель – заказчик» на этапах жизненного цикла изделий авиационной техники.

5. Аккумуляция единого информационного пространства в формировании полезных свойств цифрового двойника, позволяющего виртуально детализировать этапы жизненного цикла, и достижение требуемого результата представляют собой мощные инструменты в принятии рациональных конструкторско-технологических решений, снижая риски в обеспечении прочности и надежности изделий авиационной техники.

#### Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

#### Список источников / References

- Скворцов Е.Б., Чанов М.Н., Шелехова С.В. Методы интеграции в концептуальном проектировании самолетов транспортной категории // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2023. № 3. С. 14–27.  
Skvortsov EB, Chanov MN, Shelekhova SV. Integration methods in the conceptual design of transport category aircraft. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. 2023(3):14–27. (In Russ.).
- Анисимов К.С., Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н. и др. Оптимизация процесса совершенствования авиационных комплексов на базе концепции функционального проектирования // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2022. № 1. С. 105–123. DOI: 10.31857/S0002338822010036  
Anisimov KS, Evdokimenkov VN, Krasil'shchikov MN, et al. Optimization of the process of improving aviation complexes based on the concept of functional design. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2022(1):105–123. (In Russ.).
- Желтов С.Ю., Жеребин А.М., Попов В.А. Системный анализ и внешнее проектирование авиационных комплексов – основной исследовательский этап создания авиационной техники // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 8. С. 65–71.  
Zheltov SYu, Zherebin AM, Popov VA. System analysis and exterior design of aviation systems: key research phase of aircraft development. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. 2013(8):65–71. (In Russ.).
- Орлова Е.В., Орлов М.Ю. Методика концептуального проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей для самолетов гражданской авиации // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 159–165. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185676>  
Orlova EV, Orlov MYu. A Conceptual Design Technique for the Civil Aviation Aircraft Gas Turbine Engines Combustion Chambers. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):159–165. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=185676>
- Седельников А.В., Танеева А.С. Концептуальная модель малого космического аппарата технологического назначения // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 44–55. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180647>  
Sedel'nikov AV, Taneeva AS. Conceptual Model of a Technological Purpose Small Spacecraft. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(2):44–55. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=180647>
- Ткаченко А.Ю., Пелевин В.С., Алексенцев А.А. и др. Концептуальное проектирование стартера генератора на базе виртуальной среды АСТРА-9 // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 114–122. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179113>  
Tkachenko AY, Pelevin VS, Aleksentsev AA, et al. Conceptual Designing of Generator Starter Based on the ASTRA-9 Virtual Medium. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(1):114–122. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=179113>
- Волостнов Б.И. Цифровое машиностроение: принципы создания и перспективы развития интеллектуальных производств // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. №1. С. 4–37.  
Volostnov BI. Digital engineering: principles for the establishment and perspectives of development of intelligent productions. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2018(1):4–37. (In Russ.).
- Сироткин О.С., Сироткин Р.О. Цифровизация в машиностроении: проблемы и тенденции развития // Авиационная промышленность. 2021. № 1. С. 61–69.  
Sirotkin OS, Sirotkin RO. Digitalization in mechanical engineering: problems and development trends. *Aviatsionnaya promyshlennost'*. 2021(1):61–69. (In Russ.).
- Долгов В. А., Никищечкин П. А., Ивашин С. С. и др. Современные подходы к построению цифровых двойников продуктов, процессов и систем, включая производственно-логистические системы машиностроительных предприятий // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 2. С. 88–96. DOI: 10.52261/02346206\_2023\_2\_88

- Dolgov VA, Nikishechkin PA, Ivashin SS, et al. Modern approaches to the construction of digital twins of products, processes and systems, including machine-building enterprises production and logistics systems. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2023(2):88-96. (In Russ.).
10. Богинский А.И., Чурсин А.А. Цифровые модели для оптимизации производственно-технологических процессов // Вестник машиностроения. 2020. № 2. С. 63-67.  
Boginskiy AI, Chursin AA. Digital models for optimizing of production technological processes. *Vestnik mashinostroeniya*. 2020(2):63-67. (In Russ.).
11. Анциферов С.И., Сычев Е.А., Карачевцева А.В. и др. Цифровое проектирование беспилотного летательного аппарата для мониторинга объектов агропромышленного комплекса // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. № 7. С. 535-539. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-535-539  
Antsiferov SI, Sychev EA, Karachevtseva AV, et al. Digital design of an unmanned aerial vehicle for monitoring agricultural facilities. *Vestnik mashinostroeniya*. 2025;104(7):535-539. (In Russ.).
12. Кобзев В.В., Бабкин А.В., Скоробогатов А.С. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях новой реальности // *π-Economy*. 2022. Т. 15. №5. С. 7-27. DOI: 10.18721/JE.15501  
Kobzev VV, Babkin AV, Skorobogatov AS. Digital transformation of industrial enterprises in the new reality. *π-Economy*. 2022;15(5):7-27. (In Russ.).
13. Скворцов Е.Б., Бондарев А.В., Чанов М.Н. и др. Сложность и синергия в системной интеграции технологий самолета // *Авиационная промышленность*. 2024. №1. С. 53-66.  
Skvortsov EB, Bondarev AV, Chanov MN, et al. Complexity and synergy in the system integration of aircraft technologies. *Aviatsionnaya promyshlennost'*. 2024(1):53-66. (In Russ.).
14. Левкина О.Ю. Проблемы организации эффективного производства литых заготовок на авиастроительном предприятии и пути их решения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. № 4(3). С. 693-697.  
Levkina OYu. The problems to establish an efficient foundry and ways to solve them. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(4):693-697. (In Russ.).
15. Ammar HR, Samuel AM, Samuel FH. Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys. *International Journal of Fatigue*. 2008;30(6):1024-1035. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.08.012
16. Крушенко Г.Г., Двирный В.В., Решетникова С.Н. и др. Повышение плотности деталей летательных аппаратов, отливаемых из алюминиевых сплавов // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2016. Т. 1. № 12. С. 312-314.  
Krushenko GG, Dvirnyi VV, Reshetnikova SN, et al. Increasing the density of aircraft parts cast from aluminum alloys. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2016;1(12):312-314. (In Russ.).
17. Галдин Н.М., Чернега Д.Ф., Иванчук Д.Ф. и др. Цветное литье: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.  
Galdin NM, Chernega DF, Ivanchuk DF, et al. *Non-ferrous casting: A reference book*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 528 p. (In Russ.).
18. Белоусов Н.Н., Кашевник Л.Я. Новые высокопрочные алюминиевые сплавы для литья в металлические формы // *Вопросы оборонной техники. Серия XVI*. 1975. Вып. 70. С. 14-20.  
Belousov NN, Kashevnik LYa. New high-strength aluminum alloys for casting into metal molds. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Series XVI*. 1975(70):14-20. (In Russ.).
19. Монастырский А.В., Власов Ю.Б. PoligonSoft для литейного производства // *Литейное производство*. 2022. № 8. С. 31-37.  
Monastyrskii AV, Vlasov YuB. PoligonSoft for foundry production. *Foundry production*. 2022(8):31-37. (In Russ.).
20. Миронова Л.И., Монастырский В.П., Воронов А.А. и др. Особенности формообразования литых армированных деталей. Проблемы и способы их разрешения // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2016. №1. С. 141-147.  
Mironova LI, Monastyrskiy VP, Voronov AA, et al. Features of cast clad components formation. problems and methods of solution. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2016(1):141-147. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 05.12.2025  
Одобрена после рецензирования / Revised 23.12.2025  
Принята к публикации / Accepted 25.12.2025