

УДК 669.721.5

В.А. Дуюнова¹, С.В. Молодцов¹, А.А. Леонов¹, А.В. Трапезников¹**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СЛОЖНОКОНТУРНОЙ ОТЛИВКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-3-11

Рассмотрены этапы изготовления отливки из магниевого сплава МЛ5п.ч., включающие: разработку компьютерной модели детали, проработку моделей литейной оснастки и стержневых ящиков, расчет и анализ результатов при проведении виртуальной заливки модели отливки с помощью программных комплексов. Рассмотрены различные способы подведения расплавленного металла к отливке и выбран оптимальный вариант.

Проведена работа по предотвращению возможных дефектов литья, выявленных посредством моделирования в программе ProCast. По итогам работы осуществлена заливка изготовленных с помощью оснастки, напечатанной на 3D-принтере, песчаных форм.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, ProCast, SolidWorks, литейная оснастка, стержневой ящик, магниевый сплав, микрорыхлота, 3D-модель.

V.A. Dyuunova¹, S.V. Molodtsov¹, A.A. Leonov¹, A.V. Trapeznikov¹**APPLICATION OF COMPUTER MODELING METHODS IN THE MANUFACTURE OF COMPLEX-CONTOURED SHAPED CASTING**

This article discusses the stages of manufacturing models from the magnesium complex, including the development of computer models, the development of models and experimental models, calculation and analysis of the results when developing models of virtual bays using software systems. Various methods of supplying molten metal to a selected embodiment are considered.

Work was carried out to prevent possible defects in the ProCast program. As a result, the work was carried out with the help of equipment printed on a 3D-printer, sand forms.

Keywords: computer modeling, ProCast, SolidWorks, foundry equipment, core box, magnesium alloy, porosity, 3D-model.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время применение систем автоматизированного проектирования (САПР) позволило вывести проектную работу на новый уровень, обеспечивающий высокие темпы и качество производства. Программные пакеты автоматизированного проектирования необходимы для получения моделей, изготавливаемых методами 3D-печати. Внедрение аддитивных технологий в промышленность открыло новые горизонты в проектировании, предоставив возможность создавать сложные объекты более простым способом [1–4].

В литейном производстве программные пакеты также позволили проектировать модели деталей и литейной оснастки, а также производить расчеты процессов литья. Создание оснастки посредством печати на 3D-принтерах снижает продолжительность ее изготовления и увеличивает точность размеров [3, 4].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Материалы и методы

В данной работе разработана модель отливки детали «Корпус», получаемой из магниевого сплава МЛ5п.ч. Проектирование модели проводили с помощью программного комплекса SolidWorks. Процесс разработки и сопутствующие ему мероприятия приведены далее.

Создана 3D-модель по представленным заказчиком чертежам (рис. 1).

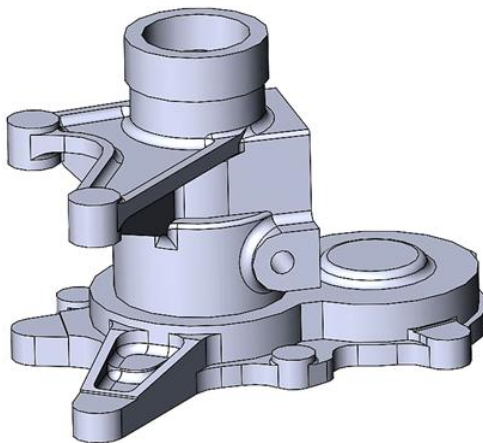


Рис. 1. Модель детали «Корпус»

Для спроектированной модели отливки выбрано расположение формы, определены литейные уклоны и задано расположение элементов литниковой системы. Различные типы литниковых систем имеют свои преимущества и недостатки, ввиду этого рассмотрены три варианта расположения отливки в форме и соответствующие им три вида литниковых систем.

Литниковая система – это совокупность каналов и приспособлений литейной формы, с помощью которых снабжают полость формы расплавленным металлом, для ее наполнения и подпитки в ходе кристаллизации. После завершения подачи металла в форму литниковая система и отливка какое-то время сообщаются, после чего отливка кристаллизуется. Предусмотрено также применение прибылей, которые будут питать жидким металлом узлы отливки в процессе ее затвердевания, что значительно снижает вероятность образования усадочных раковин и рыхлот. Прибыли устанавливают в тепловых узлах отливки, на обрабатываемых поверхностях [6–10].

Способ подвода жидкого металла к отливке в первом случае (вариант I) выбран в нижней части отливки (рис. 2, а). Преимущества такого способа подведения заключаются в обеспечении размеренного поступления металла в форму, легкости равномерного подведения сплава по контуру отливки, последовательном вытеснении воздуха и образующихся газов из каналов формы, достаточно простом удалении литниковой системы механической обработкой. Из недостатков литниковых систем такого типа можно выделить трудность предупреждения усадочных раковин и рыхлот в теле отливки, вследствие перегрева нижних слоев формы отливки.

Во втором случае (вариант II) подвод металла осуществлялся в различные части формы, которые представляют собой комбинированную литниковую систему (рис. 2, б). Преимущества данного расположения – в равномерном распределении температур

по сечению отливки, что обеспечивает последовательную кристаллизацию. Но такая система сложна в исполнении и удалении при механической обработке.

В третьем случае (вариант III), как и в первом, выбрано нижнее расположение литниковой системы, но отливка перевернута относительно вертикали и подвод металла осуществляется не к основанию, а к верхнему цилиндру (рис. 2, в). Для данного расположения отливки в форме характерны те же преимущества и недостатки, что и в первом варианте. Но ввиду того, что более тонкие части отливки расположены ниже, ближе к питателям, становится возможным более равномерное затвердевание тонкостенных узлов, таких как ребра жесткости.

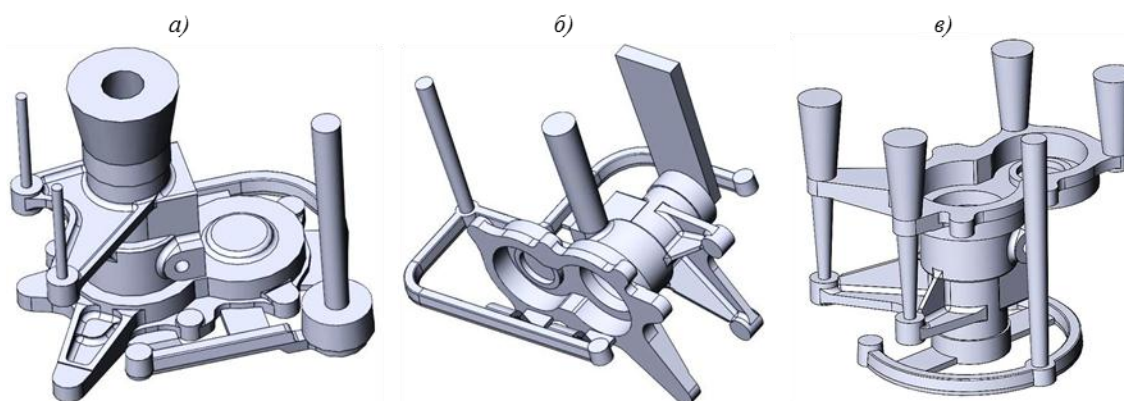


Рис. 2. Модель отливки детали «Корпус» по вариантам I (а), II (б) и III (в)

Дальнейшие операции по расчету процесса литья производили в программном комплексе ProCast. Такой программный комплекс компьютерного моделирования литейных процессов методом конечных элементов позволяет моделировать множество вариантов литейных технологий.

Расчет модели отливки в системе ProCast начинается с создания конечно-элементной сетки. Разбивка модели на элементарные ячейки для трех вариантов представлена на рис. 3. Создание сетки – важный и наиболее трудоемкий процесс, от которого зависит точность дальнейшего расчета. Для большей точности расчета можно уменьшить размеры конечных элементов, но в этом случае будет увеличиваться продолжительность расчета процесса. Оптимальным решением является уменьшение ячеек сетки в наиболее геометрически сложных или напряженных узлах и увеличение размеров ячеек в более простых. Поэтому элементы, на которые разбивали модель формы, имели большие размеры ячеек, а элементы модели отливки – меньшие [11–13]. Затем элементарным ячейкам отливки и формы присвоены характерные для заданных материалов параметры.

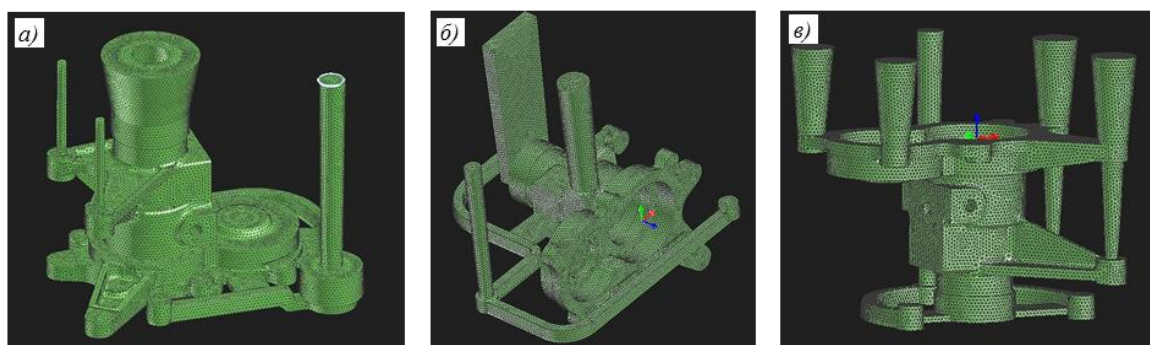


Рис. 3. Конечно-элементная сетка модели отливки «Корпус» по вариантам I (а), II (б) и III (в)

Так коэффициент теплопередачи между формой и отливкой, т. е. между магнием и кремниевым песком составляет $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [14, 15].

Заданы также характеристики процесса литья, такие как скорость литья и температура сплава при заливке. Температуру заливаемого металла варьировали для каждого варианта подвода литниковой системы. За основную температуру заливки принимали 720°C , которая соответствовала стандартной температуре заливки для данного сплава. Выбирали температуру 760°C , превышающую стандартную температуру, а также 680°C – меньше, чем стандартная температура, что моделирует остывание ковша при заливке нескольких форм.

Критерием остановки расчета является достижение всем объемом виртуального металла температуры солидус (410°C – для сплава МЛ5п.ч.) [16] – иначе говоря, критической температуры, ниже которой в расплаве не остается жидкой фазы. Затем с помощью процессора компьютера произведен расчет конечно-элементной модели с назначенными свойствами.

Модуль Viewer в комплексе ProCast воспроизводит процесс заливки песчаной формы металлом и его последующее остывание. На рис. 4 изображен момент времени, в который металл заполнил все полости формы, и температура расплава во всей отливке, не считая литниковую систему, опустилась ниже температуры солидус. Согласно цветовой шкале, изображенной на рис. 4, температура изменяется от фиолетового до красного оттенка, обозначая меньшую и большую температуры жидкого металла соответственно. Размерность шкалы – в градусах Цельсия.

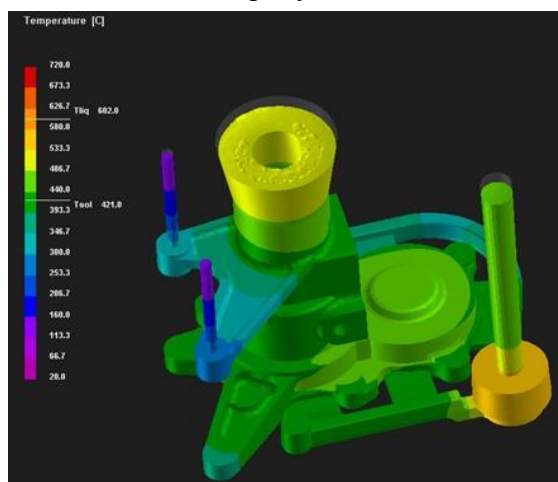


Рис. 4. Этап заливки детали «Корпус» на примере варианта I

Для оценки мест образования литейных дефектов в комплексе ProCast используются следующие расчетные параметры.

1. *Тепловые узлы (Hot Spots)* – данный параметр применяется для оценки характера затвердевания отливки, а также мест формирования макро- и микропористости.

Модуль Hot Spots отображает тепловые узлы в отливке, которые кристаллизуются изолированно от основной массы металла, что приводит в конечном итоге к формированию усадочных дефектов. Физический смысл данного параметра состоит в следующем: в ходе моделирования затвердевания сплава для каждого расчетного узла сетки определяется продолжительность охлаждения сплава до критического значения количества твердой фазы, в это же время оценивается скорость кристаллизации металла. Те узлы, для которых продолжительность охлаждения до значения критической доли твердой фазы является локальным максимумом, фиксируются программой как центры тепловых узлов в параметре Hot Spots [17–21].

На рис. 5 представлено распределение тепловых узлов (мест концентрации температур) в отливке, по которому можно определить места возможного образования микро- и макропористости. Шкала имеет размерность «секунды» и характеризует продолжительность охлаждения каждого расчетного узла до значения температуры, при котором образуется критическая доля твердой фазы (устанавливается в соответствии с характеристиками сплава в интервале от 0 до 1).



Рис. 5. Распределение тепловых узлов при расположении отливки по вариантам I (а), II (б) и III (в)

При заливке модели по варианту I наибольшая концентрация температур выявлена в основании отливки и локальных узлах на бобышках верхнего уровня отливки, что может привести к образованию микропористости. Охлаждение узлов с повышенной температурой осуществляют размещением в песчаной форме металлических вставок (холодильников).

При заливке модели по варианту II узлы концентрации температуры распределились по боковой поверхности по всей высоте отливки и в основании. В данном случае возможные места образования микропористости не концентрируются в одном месте, а базируются по большей части отливки. Предусмотреть холодильники для этого варианта будет сложнее, чем для варианта I.

В варианте III концентраторы температур рассредоточены по всему объему отливки, что дает менее благоприятную картину распределения возможных мест образования микропористости из всех вариантов подвода металла к отливке.

В варианте I тепловые узлы имеют более удобное расположение для дальнейшего их устранения посредством использования холодильников.

2. Время кристаллизации (Solidification Time) – параметр, определяющий распределение времени превращения жидкой фазы в твердую по отливке и позволяющий выявить узлы, затвердевающие позже остальных. Этот параметр также позволяет определить места возможного образования усадочных дефектов [22].

Параметр Solidification Time для трех вариантов исполнения отливок представлен на рис. 6 и отображает время, при котором каждая из соответствующих зон достигает температуры солидус. Согласно шкале, первыми кристаллизуются зоны фиолетового оттенка, последними – красного. Шкала имеет размерность «секунды» и характеризует время достижения температуры кристаллизации зон отливки.

В модуле Solidification Time хорошо видны те места в отливке, которые кристаллизуются последними или изолированно от остальных. Так, в вариантах I и II не наблюдается равномерного затвердевания снизу вверх. В дальнейшем это корректируется использованием холодильников, расположенных в форме. В модели варианта III имеется несколько образований, затвердевающих локально. Для всех вариантов отливок характерно быстрое охлаждение ребер и тонких стенок в верхней части отливок.

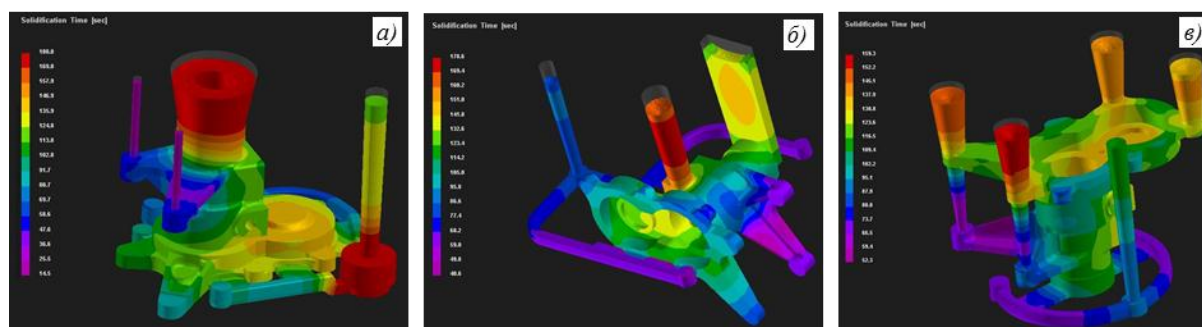


Рис. 6. Время кристаллизации тепловых узлов при расположении отливки по вариантам I (а), II (б) и III (в)

Все три варианта имеют характерные зоны, кристаллизующиеся значительно раньше остальной отливки.

3. *Твердая фаза (Fraction Solid)* – параметр, дающий картину затвердевания отливки по времени и позволяющий прогнозировать усадочные дефекты в отливке [23–27].

Модуль Fraction Solid дает возможность оценить наличие локально кристаллизующихся зон в определенный момент времени и дополняет параметр Solidification Time, позволяя более наглядно наблюдать процесс кристаллизации посредством цветowych индикаторов в отливке. Данный параметр представлен на рис. 7 (шкала не имеет размерности) – значение «0» соответствует жидкой фазе расплава, значение «1» – твердой.

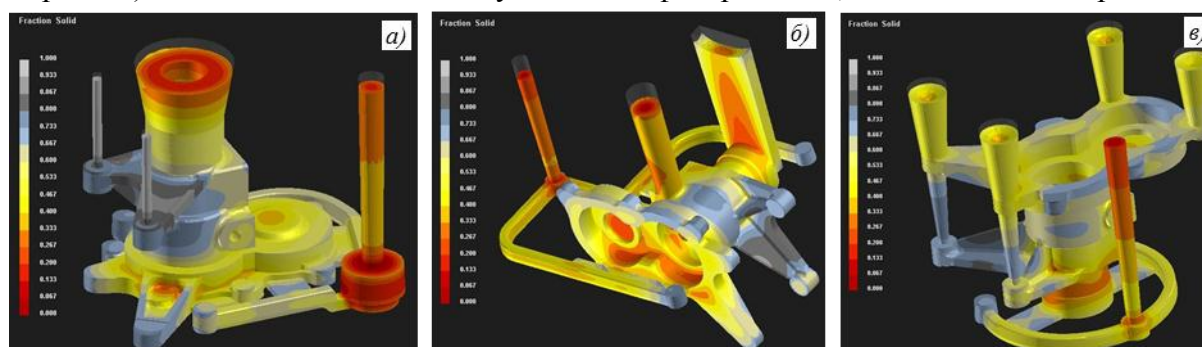


Рис. 7. Количество твердой фазы при расположении отливки по вариантам I (а), II (б) и III (в)

Расчет в комплексе ProCast показал, что в варианте I в отливке имеется меньший объем зон, в которых возможно образование усадочных дефектов и пористости, но необходимо предпринять ряд мер по предупреждению образования дефектов. Вариант I также более предпочтителен исходя из соображений механической обработки и разработки оснастки, он выбран в качестве рабочего. При дальнейшем изготовлении песчаной формы предусмотрены холодильники для основания отливки, в верхней части для бобышек и тонкостенных ребер предусмотрены дополнительные выпоры.

Варианты II и III показали худшие результаты в ходе расчета в комплексе ProCast – выявлен большой объем зон возможного формирования пористости. Оба варианта также нуждаются в более сложной механической обработке по сравнению с вариантом I.

На следующем этапе уточнена конструкция внутренних и внешних стержней, оформляющих геометрическую форму отливки. Проблемой, усложняющей проектирование моделей стержневых ящиков, стал выбор плоскости разъема формы. Конфигурация детали не позволяла однозначно определить эту плоскость, что привело к необходимости разработки стержней сложной конструкции.

Затем разработали и рассчитали литниковую систему.

Во избежание литейных дефектов, обусловленных нехваткой металла, в литниково-питающих системах предусмотрены прибыли. Это питающий элемент, представляющий собой полость, которая заполняется жидким металлом в ходе заливки. Прибыли также могут служить выпорами и шлакосборниками, посредством которых из отливки выводятся газы и неметаллические включения.

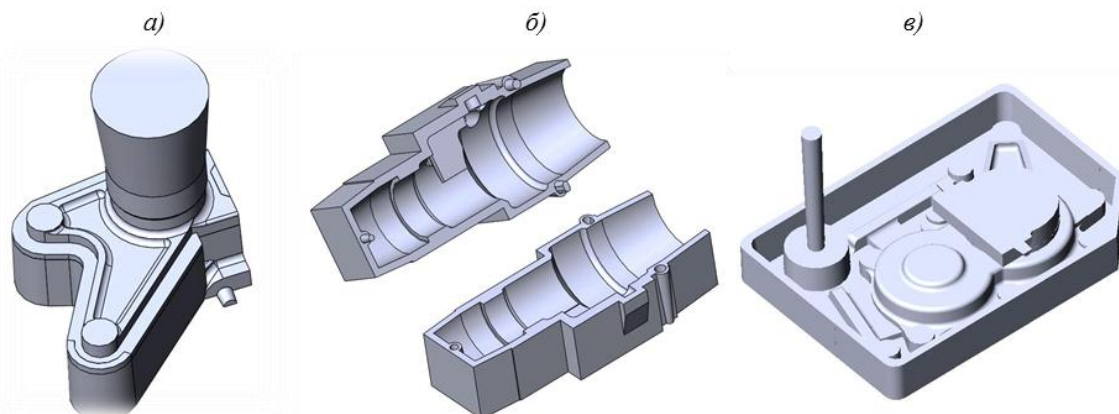


Рис. 8. Стержневые ящики и модели форм: *а* – модель верха; *б* – ящик для внутреннего стержня; *в* – стержневой ящик

После проработки моделей стержней и отливки разработана модельная оснастка, включающая модели верха, низа и стержневых ящиков. Стержни должны легко извлекаться из оснастки, не разрушаться при извлечении, не иметь тонких элементов и острых углов. В связи с этим стержневые ящики выполнены многосоставными, разборными, обеспечивающими простоту извлечения стержня (рис. 8).

Результаты

После проведения полного расчета модели выбран способ изготовления, а также изготовлены и собраны стержни и полуформы. Затем в условиях литейного цеха проведены плавки магниевого сплава МЛ5п.ч. и изготовлены отливки детали «Корпус» (рис. 9).



Рис. 9. Отливки детали «Корпус»

Анализ геометрической формы полученных отливок показал, что использование САПР при разработке отливки и оснастки позволило предотвратить вероятные дефекты (незалиты, отклонения от геометрических размеров, утяжины и т. д.), а также сократить продолжительность производственного цикла изготовления детали и снизить вероятность брака.

Полученные отливки испытаны с помощью рентгенографического неразрушающего контроля. По результатам расшифровки рентгенографических снимков микрорыхлоты и другие дефекты не обнаружены.

Обсуждение и заключения

В результате данной работы в системе Solidworks спроектированы модели отливки детали и литейной оснастки, разработана литниковая система. Рассмотрены три различных варианта расположения модели в форме. Произведен расчет в программном комплексе для моделирования литейных процессов ProCast для трех литниковых систем, выбранных для различного размещения отливки. По результатам расчетов и анализа преимуществ расположения отливки в форме выбран наиболее оптимальный вариант, обеспечивающий меньшую вероятность образования литейных дефектов. Посредством системы ProCast также получена картина мест возможного образования микро- и макропористости и усадочных дефектов, что позволило предусмотреть систему охлаждения теплонагруженных узлов отливки. Проведена плавка и изготовлена экспериментальная партия отливок детали «Корпус». По результатам проведения рентгенографического неразрушающего контроля внутренние дефекты в отливке не выявлены.

Моделирование отливок и процесса литья с помощью САПР имеет ряд преимуществ – экономию времени и ресурсов.

В первом случае – это уменьшение времени на исправление модели и допущенных ошибок. В долгосрочной перспективе – это наработка базы, создание шаблонов, которые могут пригодиться при разработке других моделей и значительно сократить затраты времени.

Во втором – экономический эффект от использования САПР заключается в значительном повышении производительности труда при высоком уровне сокращения ошибок, перенесенных с модели непосредственно на изготавливаемый объект, и, как следствие, в улучшении качества изготовленных изделий.

Важным преимуществом использования программных комплексов также является возможность доработки и изменения модели на любом этапе работы в случае изменения технического задания или внесения технологических изменений в конструкцию детали. Невысокая стоимость и малые сроки выполнения расчета, а также большой объем и наглядность полученной информации о ходе технологического процесса и качестве будущей отливки делают компьютерное моделирование важнейшим инструментом опытного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. №1. С. 2–6.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // *Наука в России*. 2012. №3. С. 36–44.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
5. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: 2015. С. 458–470.
6. Власова К.А., Клюквина Т.Д., Леонов А.А., Ларионов С.А. Взаимодействие модельных составов с пластиковой оснасткой, изготовленной с помощью технологии 3D-печати // *Труды*

- ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №2 (62). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-7-7.
7. Технология литейного производства: литье в песчаные формы: учеб. для вузов / под ред. А.П. Трухова, Ю.А. Сорокина, М.Ю. Ершова и др. М.: Академия, 2005. 582 с.
 8. Shangquan H., Kang J., Deng C. et al. 3D-printed shell – truss sand mold for aluminum castings // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 250. P. 247–253.
 9. Дуюнова В.А., Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Яковлев А.Л., Леонов А.А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // *Технология легких сплавов*. 2018. №4. С. 28–43.
 10. Зуев А.В., Лощинин Ю.В., Баринов Д.Я., Мараховский П.С. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 575–595. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595.
 11. Fu J., Wang K. Modelling and Simulation of Die Casting Process for A356 Semi-solid Alloy // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 1565–1570.
 12. Ngo T.D., Kashani A., Imbulzano G. et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. P. 172–196.
 13. Михайлова А.Е., Дошина А.Д. 3D принтер – технология будущего // *Молодой ученый*. 2015. №20. С. 40–44. URL: <https://moluch.ru/archive/100/22467/> (дата обращения: 05.02.2019).
 14. Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А. О современных тенденциях развития магниевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2016. №3. С. 94–105.
 15. Трофимов Н.В., Леонов А.А. Противоприварные покрытия, используемые для литья форм и стержней из ХТС, применяемых при литье магниевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №12 (60). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-10-10.
 16. Клюквина Т.Д., Власова К.А., Леонов А.А., Яшина С.А. Изучение механизма образования прочности в самоотверждающих смесях с фенольным связующим (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №3 (63). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-18-27.
 17. Kang H.T., Ostrom T. Mechanical behavior of the cast and forged magnesium alloys and their microstructures // *Material Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 490. Issue 1–2. P. 52–56.
 18. Chen L., Wang Y., Peng L. et al. Study on the interfacial heat transfer coefficient between AZ91D magnesium alloy and silica sand // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Vol. 54. P. 196–203.
 19. Bruna M., Bolgibruchova D., Pastircak R. Numerical Simulation of Porosity for Al Based Alloys // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 177. P. 488–495.
 20. Кокцинская Е.М. Технология 3D-печати: обзор последних новостей // *Видеонаука*. 2016. №2 (2). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-3d-pechati-obzor-poslednih-novostey> (дата обращения: 05.02.2019).
 21. Платонов М.М., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Барботько С.Л. Оптимизация состава полимерной композиции с пониженной пожарной опасностью на основе поликарбоната для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // *Известия вузов. Сер.: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. №1. С. 87–94.
 22. Смирнов О.И., Скородумов С.В. Моделирование технологии послойного синтеза при разработке изделий сложной формы // *Современные наукоемкие технологии*. 2010. №4. С. 83–87.
 23. Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 58. Issue 4. DOI: 10.2478/amm-2013-0186.
 24. Лакедемонский А.В., Кваша Ф.С., Менделеев Я.И. и др. Литейные дефекты и способы их устранения. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
 25. Производство точных отливок / И. Дошкарж, Я. Габриель, М. Гоушть, М. Павелка. М.: Машиностроение, 1979. 296 с.
 26. Бойчук А.С. Неразрушающий контроль деталей и конструкций авиационной техники из полимерных композиционных материалов при использовании ультразвуковых фазированных решеток // *Тез. докл. 19-й Всерос. науч.-технич. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике*. Самара, 2011. С. 289–291.
 27. Жуковский С.С. Холоднотвердеющие связующие смеси для литейных стержней и форм: справочник. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.