



Оригинальная статья / Original article

УДК: 669.046.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-209-218>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

© А.В. Никаноров¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ: Цель исследования – сравнение компьютерных программ, используемых для моделирования литейных процессов – литья заготовок из сплавов металлов. Для сравнительного анализа были использованы следующие компьютерные программы: Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST. При моделировании использовались несколько объектов (образцов) литья разной степени сложности. В результате проведенного компьютерного моделирования в системе PROCAST были автоматически устранены дефекты чертежей, выявленные в начальной модели. Были построены двухмерная (2D) и трехмерная (3D) сетки, которые сделали форму для литья более качественной и многофункциональной как для самой отливки, так и для формы литья. Получены результаты моделирования литья в программе PROCAST. На основе полученных результатов было показано, что программный комплекс PROCAST является наиболее профессиональной компьютерной программой для моделирования литейных процессов из принятых для сравнения программ.

Ключевые слова: моделирование литейных процессов, компьютерное моделирование, программы Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST

Информация о статье: Дата поступления 15 августа 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Никаноров А.В. Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):209–218. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-209-218.

COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPUTER PROGRAMS FOR FOUNDRY PROCESS SIMULATION

Alexander V. Nikanorov

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 663074, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the research is to compare some computer programs used for the simulation of foundry processes including alloy casting. Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST computer programs are used for the comparative analysis. Several foundry samples of the various degree of complexity are used for the simulation. The performed computer simulation in the PROCAST system allowed to eliminate the drawing defects identified in the original model. A 2D and a 3D grid networks were built. They improved the quality of the casting mould and made it multifunctional for both a casting and a casting mould. Foundry simulation results in PROCAST program have been received. The obtained results suggest the software system PROCAST to be the most efficient computer program for foundry process simulation of all tested.

Keywords: foundry process simulation, computer modeling, Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST programs.

¹Никаноров Александр Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: nikanoroff@list.ru

Alexander V. Nikanorov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: nikanoroff@list.ru



Information about the article: Received August 15, 2018; accepted for publication October 30, 2018, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Nikanorov A.V. Comparative analysis of computer programs for foundry process simulation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 209–218. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-209-218.

Введение

Литейное производство является основной базой машиностроительного, авиационного и металлургического комплекса, и его развитие зависит от темпов развития данных отраслей в целом. Производство российских литевых деталей за годы реформирования сократилось в 4,5 раза: с 18,5 млн т до 4,2 млн т. Количество предприятий, производящих литейную продукцию, сократилось почти в три раза – с 3500 до 1250. Ликвидировано 10 научно-исследовательских институтов по литейному производству. Экспорт литья незначителен, а экспорт литейного оборудования практически отсутствует. Вместе с тем импорт литейного оборудования, в том числе для литейных цехов металлургических заводов, за 10 лет с 2003 г. увеличился почти в 9 раз, превысив 1 млрд долл. США в 2012 г. [1, 2].

Однако получение литевых деталей на основе сплавов цветных металлов с улучшенными физико-химическими характеристиками является очень важной производственной задачей, на решение которой нацелены ученые и производственники [3–5].

Из анализа современного состояния и перспектив развития инновационных технологий следует, что, прежде всего, необходимо значительное увеличение объема инвестиций в науку: исследования и разработки, создание новых машин, оборудования и технологий, проектно-конструкторские работы, приобретение патентов или лицензий, программных продуктов, обучение и подготовка кадров. Именно этих ресурсов не хватает для проведения модернизации литейного производства [6, 7]. Необходимо целый комплекс технологических решений, позволяющих наиболее эффективно реализовать приоритетные направ-

ления.

Такой «критической технологией», которая способна внести наибольший вклад в ускорение экономического роста, повышение конкурентоспособности продукции, является информационная технология (ИТ). Реализуется она через компьютерное проектирование, электронный архив, в который складывается вся информация и откуда она попадает к технологам, к метрологам, а от них к объектам проектирования. При этом выявляется большое количество недостатков в организации нашего производства и появляется возможность для их устранения [8, 9].

В настоящее время одной из главных идей развития промышленности должна стать неоиндустриализация, представляющая собой процесс крупномасштабной модернизации, основанной на безотходных технологиях автоматизированного производства – компьютеризованного и роботизированного [10].

Перечисленные факторы позволяют сформулировать основные направления стратегии дальнейшего развития литейного производства. Эти направления охватили практически весь комплекс проблем современного промышленного производства, а именно:

- состояние и направления развития мирового и отечественного литейного производства;
- современные технологии, материалы и оборудование;
- диагностика, сертификация и управление качеством отливок;
- компьютерные технологии в литейном производстве;
- экология и охрана труда;
- экономика и организация производства;



– подготовка кадров.

Как видно из вышеизложенного, одним из основных стратегических направлений развития литейного производства на современном этапе - это развитие моделирования и компьютерных технологий.

Развитие моделирования и компьютерных технологий предполагает:

– моделирование формирования отливки в форме – система синтеза по всем элементам процесса [11];

– автоматизированное проектирование литейной технологии;

– проектирование литейной технологии и оснастки в CAD-системе с последующим её изготовлением на станках с числовым программным управлением (ЧПУ);

– разработка системы быстрого прототипирования;

– компьютерное управление технологическим оборудованием [12, 13].

Сегодня в мире насчитывается большое количество программ для моделирования литейных процессов. В мировой практике основное распространение получили программы, представленные в табл.

це.

К сожалению, российским специалистам известны лишь такие программы, как Magmasoft, PROCast, SolidCast, а также две отечественные разработки – «Полигон» и LVMFlow.

Основные проблемы при выборе конкретной программы для моделирования технологических процессов состоят в отсутствии достоверной информации о возможностях самой программы, принципах работы с ней, а также в отсутствии специалистов на предприятиях России. Существенным фактором для отечественных предприятий при выборе программы для моделирования литейных процессов остается ее стоимость [14].

Программы для моделирования литейных процессов, используемые сегодня в России, в основном различаются степенью полноты факторов, учитываемых при моделировании, и, соответственно, стоимостью. Второе существенное различие связано с методами получения и решения уравнений: уравнения тепломассопереноса могут быть записаны в дифференциальном или интегральном виде.

Программы для моделирования литейных процессов и страны создатели

Programs for casting process simulation and the country of origin

Страна –разработчик	Программа	Страна-разработчик	Программа
Германия	Magmasoft	США	Flow3D
Германия	WinCast	США	PowerCast
Франция	PROCast	США	SolidCast (AFSolid)
Франция	QuikCast	США	CAPCast
Франция	PAM-Cast	США	RAPID/CAST
Франция	CalcoSoft	Корея	AnyCasting
Испания	Vulcan	Финляндия	CastCAE
Япония	JSCAST	Россия, г. Ижевск	LVMFlow
Россия, г. Санкт-Петербург	Poligon («Полигон»)	Россия, г. Москва	FlowVision
Англия	Mavis-Flow	Индия	AutoCast
Китай	InteCast	Австралия	Castflow, Casttherm



Метод конечных разностей (МКР) [15], используемый в таких программах, как Magmasoft, SolidCast, CastCAE, JSCAST, AnyCasting и других, позволяет в кратчайшие сроки получить распределение усадочных дефектов в проектируемой отливке и вовремя исправить технологию литья. Однако для устранения усадочной пористости в отливках ответственного назначения такие программы не подходят, так как применяемый математический метод недостаточно хорошо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки. Связано это с тем, что разбиение исходной геометрической модели происходит путем наложения прямоугольной сетки с постоянным шагом, что приводит к резкому увеличению числа расчетных ячеек в случае получения тонкостенных отливок больших габаритных размеров.

Метод конечных элементов (МКЭ) [15], используемый в таких программах, как Poligon («Полигон»), WinCast и т.д., позволяет максимально учесть геометрию отливки и выявить даже незначительные дефекты. Связано это с разбиением исходной геометрической модели отливки на конечные элементы (чаще всего – тетраэдры). Встроенные генераторы сеточной модели в самих программах дают большие погрешности. Проблема решается путем использования внешнего генератора сетки КЭ, что приводит к удорожанию приобретаемого программного обеспечения, увеличению

времени работы, а также требует от персонала высокой квалификации.

Метод контрольных объемов (МКО) (используемый в программах Flow-3D, LVMFlow) сочетает в себе простоту и факторизацию МКР и хорошую аппроксимацию границ между различными материалами и различными фазами. Это позволяет проводить моделирование максимально быстро, не теряя при этом точности расчетов. LVMFlow – единственная полноценная программа для моделирования литейных процессов, которая использует данный метод. Программа Flow-3D также использует МКО и является лидером для расчета гидродинамических задач, однако не является изначально предназначенной для процессов литья, поэтому не так часто используется для решения исследуемых задач.

К сожалению, ценовая политика программного обеспечения остается в России основным критерием выбора необходимой программы. Уровень цен колеблется примерно от 10 тыс. до 120 тыс. долл. за 1 рабочее место [16].

Стоит обратить внимание на удобство использования данных программ, так как некоторые из них имеют весьма громоздкий интерфейс и не переведены на русский язык. Большинство программ, базирующихся на МКЭ, имеют очень трудный для пользователя интерфейс, что в сочетании с отсутствием опыта работы на ЭВМ технологов-литейщиков сводит использование любой хорошей программы к нулю.

Цель и методы исследования

Целью исследования явился сравнительный анализ некоторых компьютерных программ для моделирования литейных процессов. При моделировании использовались объекты литья разной степени сложности: Magmasoft, Poligon, SolidCAST, PROCAST.

Результаты компьютерного моделирования литейных процессов и их обсуждение

Нами было проведено моделирование процессов литья заготовок.

Программа **Magmasoft** – многофункциональная специализированная САЕ-программа, позволяющая моделиро-

вать разнообразные литейные процессы. Программа относится к классу конечно-разностных систем анализа и имеет более 400 инсталляций (рис. 1). Программа обладает хорошей точностью получаемых ре-



зультатов и богатым набором параметров для проведения моделирования.

К недостаткам программы следует отнести: высокая стоимость, очень сложный интерфейс без поддержки русского языка, отсутствие отечественной базы данных по материалам и сплавам, большие временные затраты на ввод данных.

При использовании программы **Polygon** («Полигон») моделирование ведется на базе МКЭ, который позволяет использовать наиболее адекватные физические и геометрические модели (ГМ). Все модели и функции реализованы для трехмерных ГМ (рис. 2).

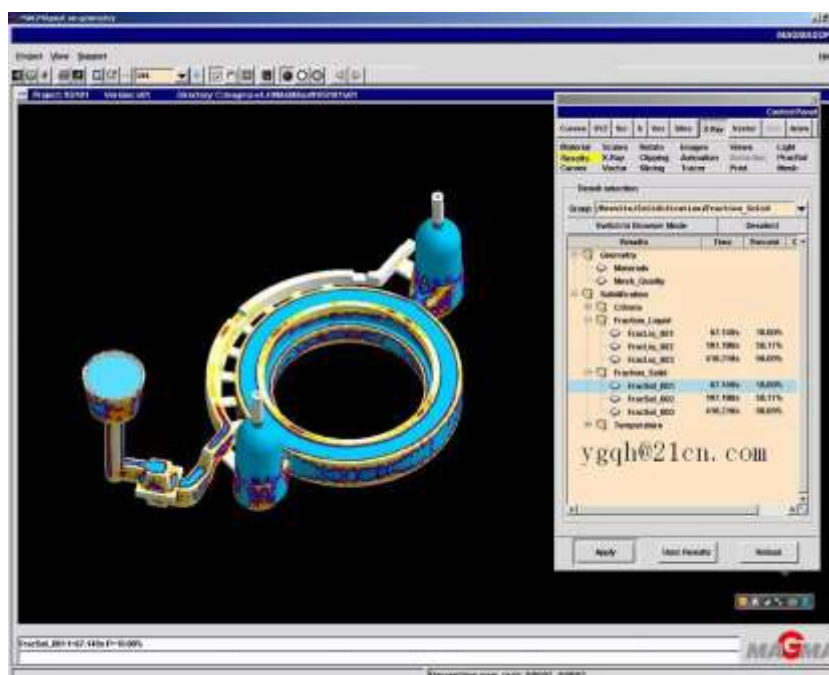


Рис. 1. Интерфейс программы Magmasoft
Fig. 1. Magmasoft interface

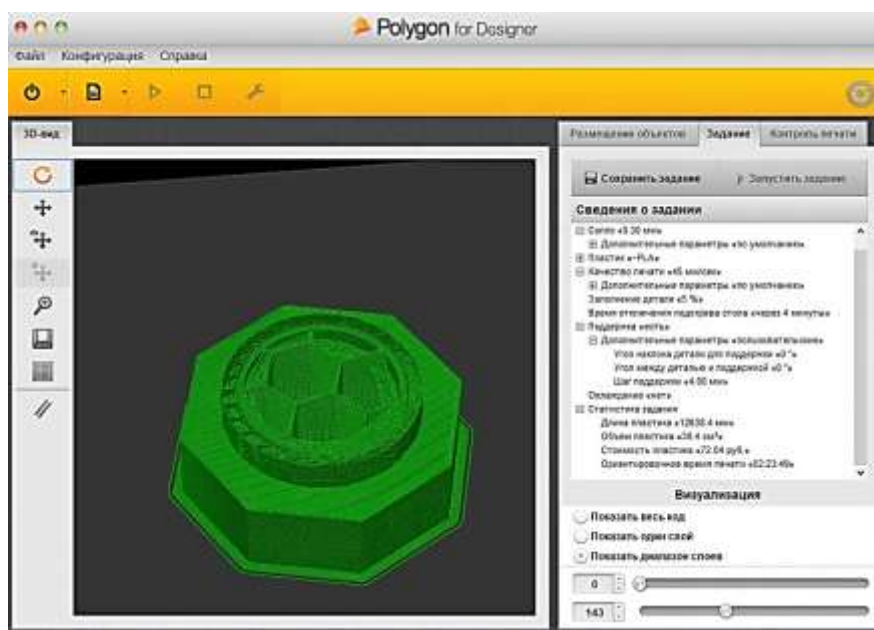


Рис. 2. Интерфейс программы «Полигон»
Fig. 2. Polygon interface



В решателях можно использовать не только прямой, но и итерационный метод расчета. Это позволяет в 10–15 раз уменьшить время расчета и требуемую оперативную память, что в сочетании с МКЭ делает доступным на персональном компьютере расчет отливок любой сложности. 3D-геометрический препроцессор «Полигона» при подготовке расчетных ГМ позволяет импортировать сетки практически всех известных генераторов: FEMAP, HyperMesh, ANSYS 4,4–5,3, ProCAST, Nastran, GiD, Pro/Mesh, StressLab, генератор Unigraphics и др. Для генерации 3D конечно-элементных сеток совместно с «Полигоном» могут поставляться автоматические генераторы сеток FEMAP или GiD, которые используют исходные ГМ в форматах IGES, PARASOLID, VDA FS, STL и др. Это позволяет совместно с «Полигоном» использовать все наиболее популярные 3D CAD-системы: SolidWorks, Unigraphics, ProEngineer, Компас-3D, EUCLID, CATIA, Cimatron, CADD5 и др.

К недостаткам программы можно отнести следующие: крайне неудобный интерфейс, сложность подготовки сеточной модели, сложность ввода данных, недостаточная база данных по материалам и сплавам, а также необходимость в приобретении дополнительного лицензионного программного обеспечения для генерации сеточной модели. По нашему мнению, «Поли-

гон» не может выступать как повседневная программа для разработки технологии получения отливок. «Полигон» следует использовать в паре с другой литейной программой как проверочное средство для отливок ответственного назначения. Возможно другое применение «Полигон»: организация учебного процесса в высших учебных заведениях [17].

Программа **SolidCAST** различает при моделировании следующие виды литья: непрерывное литье, литье по выплавляемым моделям, литье в кокиль, литье в песчаную форму, гравитационное литье.

SolidCast – базовый модуль (рис. 3). Включает в себя «быструю заливку» и анализ процесса затвердевания. В данном модуле отсутствует учет предварительного заполнения формы металлом, имеется только имитация.

Стоимость SolidCast составляет 17700 долл. США за 5 рабочих мест. Это означает, что купив 1 лицензию, реально смогут работать 5 технологов одновременно, но моделируя только процесс затвердевания. FlowCast – полноценный модуль учета движения расплава. Приобретается отдельно к каждому рабочему месту. Стоимость – 12000 долларов. Модуль OptiCast позволяет автоматически построить объемные модели прибылей в тепловых местах отливки. Стоимость модуля – 8000 долл. США.

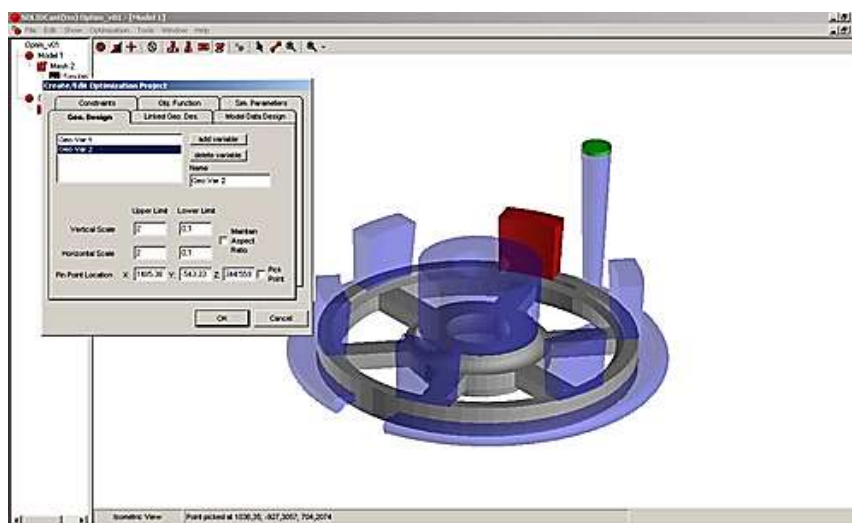


Рис. 3. Интерфейс программы SolidCast
Fig. 3. SolidCast interface



Недостатки SolidCast: неудобный интерфейс, несмотря на возможность перевода меню на русский язык, неудобный вывод результатов расчета для визуального анализа, отсутствует отечественная база данных по материалам и сплавам, чрезмерная длительность компьютерного расчета.

SolidCast – программа для моделирования литейных процессов начального уровня. Моделирует основные задачи, с которыми сталкиваются технологи. По своему функциональному назначению напоминает LVMFlow. Ежегодно выходят новые версии. Можно рекомендовать предприятиям с большой номенклатурой несложных отливок, т.к., приобретая 1 рабочее место, предприятие получает 5 рабочих мест. Однако автор не рекомендует программу Solidcast, поскольку она имеет значительно меньше возможностей, чем LVMFlow, уступает по скорости расчетов и значительно дороже.

ESI Group (PROCAST) представляет обширный набор приложений, модулей и инструментов для удовлетворения самых серьезных производственных нужд для литейной промышленности (рис. 4). PROCAST, основанный на МКЭ, способен кроме этого прогнозировать возникновение деформаций и остаточных напряжений в отливке и может применяться для анализа

таких процессов как изготовление стержней, центробежное литье, литье по выжигаемым моделям, непрерывное литье.

PROCAST поставляется с 3D-генератором тетрагональной сетки и средством чтения и анализа геометрии из CAD-систем, что обеспечивает связь между средой разработки и редактором сеток. Имеются конвертеры для следующих форматов: IGES, STEP, VDA, Parasolid, Unisurf, ACIS, UNIGRAPHICS, AutoCAD, CATIA v4 и v5. Имеется автоматический генератор оболочек, позволяющий создавать оболочковые формы для литья по выплавляемым моделям (включая многослойные оболочки). Специальная опция для создания послойных сеток, обладающая повышенной точностью, позволяет генерировать совпадающие и несовпадающие сетки. Генератор позволяет выполнять сборки поверхностных сеток с проведением булевых операций.

Точное описание геометрии, обусловленное применяемым МКЭ, позволяет системе PROCAST моделировать заполнение формы жидким расплавом и получать верные представления о: размывании песчаной формы, воздушных карманах, оксидах и турбулентном течении, возрасте материала, непроливах и холодных спаях, длине течения, переливах.

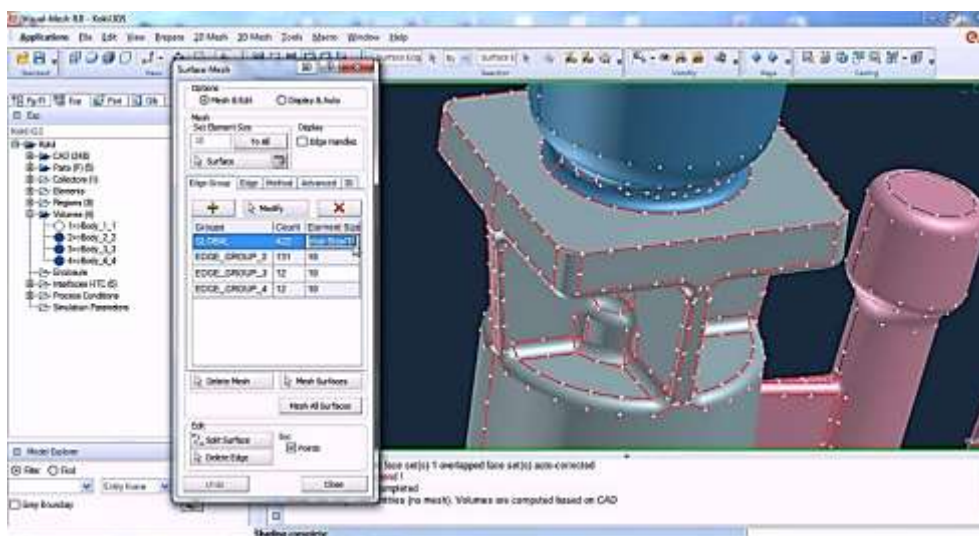


Рис. 4. Интерфейс программы PROCAST
Fig. 4. PROCAST interface



Расчет течения описывается полным уравнением Навье-Стокса [11] и может проводиться совместно с анализом температуры и напряжений. В решатель добавлены специальные модели для анализа турбулентных потоков, тиксотропных или твердожидких материалов, центробежного литья, литья по выжигаемым моделям и производства стержней. Термический решатель позволяет рассчитывать тепловой поток с учетом теплопроводности, конвекции и излучения. С помощью энтальпии учитывается тепловыделение, связанное и изменением фазового состава при кристаллизации и в твердом состоянии.

Существующий решатель напряжений работает совместно с термическим и гидродинамическим решателями и реализует упруго-пластичную и упруго-вязкопластичную модели поведения материалов. Кроме этого, могут применяться более простые модели, например, упругая, свободная или жесткая. Совместный расчет напряжений позволяет прогнозировать с высокой точностью: термический и механический контакты, горячие трещины и разломы, разрушение и деформации, усталость, напряжения в отливке и форме.

С программой PROCAST поставляется большая база данных материалов для литейных моделей. Ее содержание постоянно пополняется достоверными данными, проверенными в условиях действующего производства. В PROCAST включена уникальная термодинамическая база данных, которая позволяет пользователю, введя химический состав сплава, автоматически получить температурные кривые свойств,

необходимых для проведения точного расчета литейного процесса.

PROCAST предоставляет законченное решение для моделирования непрерывного и полунепрерывного литья заготовок. Программа способна моделировать установившийся режим, начальную и конечную стадии процесса.

Модуль инверсного расчета позволяет автоматически рассчитать параметры материала или процесса на основе температур, измеренных в заданных точках или в заданные моменты времени. Первичное и вторичное охлаждения могут быть определены по инверсному расчету.

К недостаткам программы можно отнести отсутствие русскоязычного интерфейса и высокую стоимость, но она оправдана возможностями программы.

PROCAST – действительно лучшая литейная программа из опробованных и представленных в данной статье. Она предоставляет пользователю неограниченные возможности для моделирования всех видов литья. Интуитивно понятный интерфейс и качественная генерация сеточной модели.

PROCAST идеален для предприятий авиакосмического производства, где временные затраты (месяц и более) на оптимизацию одной отливки оправдываются достигнутыми целями. Для рядовых предприятий PROCAST не рекомендуется, т.к. возможности программы в полном объеме использоваться не будут, а проведение моделирования вызовет серьезные сложности и потребует много времени.

Заключение

В результате проведенного компьютерного моделирования в системе PROCAST автоматически устранены дефекты чертежей, которые были в исходной модели. Была построена 2D- и 3D-сетки, которые обеспечили создать форму для литья более качественной и многофункциональной как для самой отливки, так и для формы литья. В SolidCAST это

недоступно: данная программа может лишь подготовить модель непосредственно перед литьем, без устранения дефектов и прочего функционала, который использует PROCAST. Кроме того, в программе PROCAST присутствует гибкая система выбора материала для литья, которых недостаточно в SolidCAST. Но в обеих программах присутствует процесс литья и за-



твердевания.

Единственный недостаток программы PROCAST – это ее дороговизна на рынке программ, предназначенных для моделирования литейных процессов.

Программы Magmasoft, Poligon, которые также нами были опробованы для моделирования литейных процессов, обладают крайне сложным и неудобным интерфейсом, сложностью подготовки сеточной модели и ввода данных.

Библиографический список

1. Ткаченко С.С., Евсеев В.И. Состояние и перспективы развития литейного производства в станкостроительной отрасли промышленности России [Электронный ресурс] // Литейный консилиум онлайн. URL: <https://litkons.com/info/innovations/sostoyanie-i-perspektivy/> (26.10.2018)
2. Дибров И.А. Состояние и перспективы развития литейного производства в России // Тр. VIII съезда литейщиков России. Т. 1. С. 3–11.
3. Kovalyova T., Eremin E., Arinova S., Medvedeva I., Dostayeva A. Enhancing surface roughness of castings when sand-resin mold casting // *Metallurgija*. 2017. Т. 56. № 1-2. С. 135–138.
4. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Металлографическое исследование образцов алюминиевых рондолой // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 3. С. 124–128.
5. Ромашкин А.Н., Дуб В.С., Иванов И.А., Марков С.И., Мальгинов А.Н., Толстых Д.С. Разработка сквозного технологического процесса производства заготовок для машиностроения на основе компьютерного моделирования // *Металлург*. 2014. № 9. С. 109–117.
6. Широких Э.В., Перфилова В.Ю. Совершенствование литниковых систем с помощью компьютерного моделирования литейного процесса // *Вестник Московского государственного областного социально-гуманитарного института*. 2015. № 20 (4). С. 65–69.
7. Кучуков Р.А. Модернизация экономики: проблемы и задачи // *Экономист*. 2008. № 9. С. 3–27.
8. Губанов С.С. Неоиндустриализация плюс вертикальная интеграция (о формуле развития России) // *Экономист*. 2009. № 11. С. 3–17.

9. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Базы физико-химических и технологических данных для создания информационных технологий в металлургии // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1999. №3. С. 17–21.
10. Спирин Н.А., Лавров В.В. Информационные технологии в металлургии. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. 495 с.
11. Коптев А.В. Уравнения Навье – Стокса. От теории к решению практических задач // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 7-4 (49). С. 86–89. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.49.141>
12. ProCAST // ESI Group (France) [Электронный ресурс]. URL: www.esi-group.com (26.10/2018).
13. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 608 с.
14. Монастырский, А.В. О современных методах разработки и оптимизации технологических процессов в литейном производстве // *Литейное производство*. 2010. № 5. С. 19–22.
15. Warming R.F., Hyett B.J. The modified equation approach to the stability and accuracy analysis of finite-difference method // *J. Comp. Phys*. 1974. V. 14. P. 159–179.
16. Турищев В. Моделирование литейных процессов: что выбрать? // *CADmaster*, 2005. № 2 (27). С. 33–35.
17. Белов В.Д. О литейном производстве в машиностроительной отрасли России и роль литейных кафедр в его развитии // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2013. № 4. С.20-23.

References

1. Tkachenko S.S., Evseev V.I. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya liteinogo proizvodstva v stankostroitel'noi otrasli promyshlennosti Rossii* [State and development prospects of foundry production in Russian machine-tool industry]. *Liteinyi konsilium on-lain* [Online foundry council]. Available at: <https://litkons.com/info/innovations/sostoyanie-i-perspektivy/> (accessed 26 October 2018).
2. Dibrov I.A. State and development prospects of foundry production in Russia. *Trudy VIII s'ezda liteishchikov Rossii* [Proceedings of the VIII Congress of Russian foundry workers]. Vol. 1. pp. 3–11. (In Russian)
3. Kovalyova T., Eremin E., Arinova S., Medvedeva I.,

- Dostayeva A. Increasing surface roughness of castings under sand casting. *Metallurgija* [Metallurgy]. 2017. Vol. 56. No. 1-2, pp. 135–138. (in Russian)
4. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Metallographic investigation of aluminum rondol samples. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2015, no 3, pp. 124–128.
5. Romashkin A.N., Dub V.S., Ivanov I.A., Markov S.I., Mal'ginov A.N., Tolstykh D.S. Development of an end-to-end technological process for blank production for mechanical engineering based on computer modeling. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014. no 9. pp. 109–117.
6. Shirokikh E.V., Perfilova V.Yu. Improving pouring



gate systems via casting process computer modeling. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo sotsial'no-gumanitarnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Region State University]. 2015. no 20 (4). pp. 65–69. (in Russian)

7. Kuchukov R.A. Modernization of economy: problems and challenges // *Ekonomist* [The Economist]. 2008, no 9, pp. 3–27. (in Russian)

8. Gubanov S.S. Neoindustrialization plus vertical integration (on the formula of Russia's development). *Ekonomist* [The Economist]. 2009, no 11, pp. 3–17. (in Russian)

9. Prikhod'ko E.V., Togobitskaya D.N. *Bazy fiziko-khimicheskikh i tekhnologicheskikh dannykh dlya sozdaniya informatsionnykh tekhnologii v metallurgii* [Databases of physico-chemical and technological data to create information technologies in metallurgy]// *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 1999. no 3. pp. 17–21. (in Russ.)

10. Spirin N.A., Lavrov V.V. *Informatsionnye tekhnologii v metallurgii* [Information technologies in metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU–UPI Publ., 2004. 495 p.

11. Koptev A.V. The Navier – Stokes equations. From theory forward to solution of practical problems // *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Research Journal]. 2016, no 7-4 (49),

pp. 86–89. (in Russ.)

12. ProCAST. ESI Group (France). Available at: www.esi-group.com (accessed 26 October 2018).

13. Denisenko V.V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological interaction, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2009. 608 p.

14. Monastyrskii A.V. *O sovremennykh metodakh razrabotki i optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov v liteinom proizvodstve* [On modern development and optimization methods of technological processes in the foundry industry]. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry]. 2010. no 5. pp. 19–22.

15. Warming R.F., Hyett B.J. The modified equation approach to the stability and accuracy analysis of finite-difference method. *J. Comp. Phys.* 1974, Vol. 14, pp. 159–179.

16. Turishchev V. *Modelirovanie liteinykh protsessov: chto vybrat'?* [Modeling of casting processes: what to choose?] *CADmaster*, № 2(27), 2005, pp. 33–35

17. Belov V.D. About foundry production in the Russian machine building industry and the function of departments of casting in its development. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-intensive technologies in mechanical engineering]. 2013, no 4, pp. 20–23.

Критерии авторства

Никаноров А.В. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nikanorov A.V. have author's rights and bear responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.