

Бройтман О.А.¹, Савушкин Р.А.², Бородин С.А.¹, Иоффе М.А.³

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

¹ООО «ВНИЦТТ», Санкт-Петербург

²ПАО «НПК ОВК», Москва

³Санкт-Петербургский политехнический университет

В авангарде внедрения цифровых технологий в железнодорожной промышленности находится концепция постройки «умных вагонов», использования телеметрических систем для сбора и обработки данных, накапливаемых по мере эксплуатации подвижного состава [1]. Работа по совершенствованию качества отливок, производимых для нужд железнодорожного машиностроения, на современном этапе также требует внедрения цифровых технологий в процесс производства и его подготовки. Тем не менее, для разных компонентов проектов по освоению, наладке и серийному производству отливок возможная на сегодняшний день степень полноты реализации этой задачи различна.

Процедурные взаимодействия при принятии решений на этапах проектирования во многом требуют интуитивного подхода и не поддаются всецелой формализации, поэтому их сведение к уровню интернета вещей вероятно лишь в отдалённой перспективе. Проникновение компьютерных технологий в проектирование по-прежнему связано с использованием средств автоматизации CAD/CAE/CAM для подготовки технологической документации, геометрического 3D моделирования, расчёта литейной технологии, разработки управляющих программ для ЧПУ при производстве модельно-стержневой оснастки (МСО) и т.д. Совершенствование этих средств за последние два десятка лет связано с ростом функционала, возможностей и точности анализа, углублением взаимной интеграции, обращение к ним закрепляется на уровне стандартных практик и методик, обучение владению введено в образовательные программы.

Специфику технологий производства отливок для нужд железнодорожного машиностроения определяют типоразмерные характеристики литых заготовок, их сложность, применяемые материалы, сплавы, способы литья, а также высокие требования, предъявляемые к качеству. С учётом этих особенностей формируется основной круг проблем, сопутствующий задачам разработки литейных технологий и подготовки производства. Решение этих задач с применением цифровых технологий в современных реалиях работы Тихвинского вагоностроительного завода (ТВСЗ) и Всесоюзного научно-исследовательского центра транспортных технологий (ВНИЦТТ) связано с внедрением следования принципам сквозного

проектирования (рис. 1), доминирования работы с наследуемыми 3D моделями объектов вместо 2D чертежей. Принятие на вооружение подобной концепции позволяет минимизировать ошибки и снизить время реализации проектов по производству отливок.



Рис. 1. Сквозное проектирование при подготовке и запуске производства отливок (упрощённая схема)

Основные программные средства, используемые при проектировании литейных технологий на базе ВНИЦТТ, даны в табл. 1. Дополнительно используются электронные каталоги, справочники и базы данных, программные инструменты собственной разработки. Электронный оборот конструкторской и технологической документации 3D и 2D форматов, контроль версий и др. организован при использовании PDM решения на базе Siemens TeamCenter.

В литейных цехах ТВСЗ изготавливают стальные отливки компонентов тележек грузовых вагонов, автосцепных устройств и др. массой 100-600 кг с толщиной стенки 15-25 мм в вакуумно-плёночных формах с песчано-смоляными cold-box стержнями, что определяет типичные дефекты отливок, с которыми необходимо бороться при отладке и оптимизации технологий. При всех достоинствах [2] вакуумно-плёночной формовки (ВПФ) частым случаем при отладке технологии является необходимость искоренения засоров, усадки, горячих трещин, газовых дефектов. В табл. 2 дана краткая характеристика стандартных возможностей коммерческих СКМ ЛП в приложении к установлению способов преодоления перечисленных дефектов. Предпринятое в связи с накоплением опыта развитие пользовательских моделей в качестве надстройки к функционалу СКМ ЛП и тонкая доводка точности исходных данных позволяют компенсировать ряд проблем анализа результатов расчётов.

Разнообразие литейных дефектов, условий формирования структуры и свойств отливок из разных сплавов осложняет разработку универсальных моделей для всестороннего и прецизионного прогноза качества отливки (что, однако, ни в коей мере не отменяет актуальность их развития). По этой причине при использовании систем компьютерного анализа извечной остаётся проблема интерпретации результата, качество которой всецело

зависит от квалификации и опыта пользователя. Последнее и определит, насколько велик и полезен объём информации, извлечённый при анализе полученных при моделировании расчётных полей.

Таблица 1

Коммерческое программное обеспечение,
используемое во ВНИЦТТ при проектировании литейных технологий

Наименование	Характеристика
CAD	
NX Modeling	- развитый функционал для трёхмерного проектирования - сравнительно трудоёмкая процедура подготовки чертежей
CAE	
ProCAST	- конечно-элементная СКМ ЛП с большим числом моделей для расчёта явлений в процессе литья - ряд заложенных в СКМ ЛП моделей недостаточно развиты либо требуют существенной настройки по результатам выполнения экспериментальных работ - возможность внедрения собственных моделей как «пользовательских функций», разработанных на языке C
ПолигонСофт	- конечно-элементная СКМ ЛП с высокой скоростью и точностью выполнения тепловых расчётов - наиболее совершенная модель образования макро- и микропористости
Flow3D Cast	- СКМ ЛП для расчёта процессов при литье по методу конечных объёмов - наиболее совершенный гидро- и газодинамический решатель - возможность моделирования течения зернистых сред
HyperMesh (вспомогательное)	- подготовка расчётных конечно-элементных сеток высокого качества
NX Advanced Simulation (вспомогательное)	- основной расчётный пакет при анализе прочности деталей и конструкций вагонов - в рамках проектирования технологий литья – вспомогательный функционал: прочность приспособлений и оснастки, уплотнение прессованием формовочной смеси и др.
Информационное обеспечение CAE систем и расчёт свойств конечных изделий	
Thermodynamic Database Fe (в составе ProCAST)	- расчёт термомеханических свойств сплавов в широком интервале температур для обеспечения моделирования процессов литья - вычисляемый набор механических свойств сплавов ограничен, результат имеет умеренную точность
JMatPro	- расчёт термомеханических свойств сплавов, термокинетических диаграмм, диаграмм фазовых превращений - прогноз фазового состава и механических свойств металлических деталей после термообработки

Задача борьбы с дефектами отливок при использовании детерминированных моделей в составе известных СКМ ЛП осложняется в случае нерегулярного появления проблем на практике. При этом могут быть предприняты техники варьирования известных нестабильных условий литья до получения по результатам расчёта согласования с практикой. Не всегда, однако, такой способ надёжен, ведь присутствует риск присвоения в рамках итеративного поиска экстремальных значений одним параметрам, тогда как появление дефекта регулируется сложным сочетанием других, часть которых даже не включена в состав модели.

Хорошо себя зарекомендовал подход, предполагающий косвенную фиксацию способствующих появлению дефектов условий по мере сравнения результатов расчётов разных вариантов технологических решений. При этом параметрам модели не придаётся экстремальных значений, однако выявляется тенденция по мере их изменения, включая

сравнительную оценку эффекта от незначительного изменения местоположения и размеров тех или иных элементов литейной технологии на 3D модели. Это позволит отыскать заслуживающее практического внедрения решение, отличающееся меньшей чувствительностью к варьированию случайных факторов.

Таблица 2

Использование СКМ ЛП для диагностики качества отливок железнодорожного назначения

Проблема	Характеристика прогноза и особенности интерпретации
Прогноз усадочной пористости	- организация правильного питания отливки – ключевая задача моделирования - хорошо поддаётся предсказанию в силу доминирования фактора конфигурации отливки и умеренного влияния недостаточно надёжно определённых исходных данных
Моделирование образования горячих трещин	- умеренная точность прогноза в силу нестабильности механических свойств материала в двухфазной области, явлений залечивания и т.д. – выявление «подозрительных» зон - работа согласно стратегии решения конкретной возникшей задачи – уточнение технологии и конструкции детали в сторону снижения напряжений в опасном участке
Моделирование возникновения засоров	- умеренная точность прогноза в связи с высокой чувствительностью даже к незначительным нестабильностям процесса разлива и качества стержней - базируется на отслеживании критически высоких скоростей движения потока у поверхности стержней и формы
Прогноз размерной точности	- умеренная точность прогноза в силу принципиальной ограниченности детерминированной постановки - возможность отслеживания «аномальных» размерных изменений исключительно по вине сложного термомеханического взаимодействия отливки и формы
Моделирование газовых дефектов	- умеренная точность прогноза в силу необходимости использования развитой газодинамической модели - потребность в наличии фильтрационных свойств материалов стержней и формы, являющихся функциями температуры, времени и зависящих от структуры смеси

Примером может быть случай анализа способов предотвращения горячих трещин, модели предсказания которых в составе СКМ ЛП не всегда работают достаточно надёжно. При интерпретации результатов численных расчётов целесообразно опираться на представления о механизме образования дефекта, выбирая в качестве предпочтительных такие условия формирования проблемной области, когда напряжения в опасном интервале температур (в районе солидуса) минимальны. На рис. 2, а показана область радиуса буксового проёма рамы боковой тележки грузового вагона, изготавливаемой из стали марки 20ГЛ. В процессе отладки технологии производили поиск условий предотвращения горячей трещины за счёт доводки конструкции в сопряжении стенок и уточнения расположения ближайшей прибыли, анализируя уровень напряжений и температур в проблемной области. Для удобства анализа результатов расчётов может быть использована номограмма вида, показанного на рис. 2, б. Искомым сочетанием, благоприятно сказывающимся на снижении склонности к горячим трещинам, является такой вариант решения, при котором, в сравнении с не вполне удачным опробованным, обнаруживается снижение напряжений в опасном интервале температур. Практическое воплощение подтвердило действенность вновь разработанного решения.

Для показанного примера, равно как и для значительного числа задач борьбы с дефектами, природа которых связана с физико-химическим взаимодействием отливки и

формы, критичным с точки зрения точности прогноза является корректный учёт неравномерно распределённых в объёме механических, фильтрационных и тепловых свойств форм и стержней. Типичная СКМ ЛП не предоставляет возможности задания анизотропии упомянутых свойств, что потребовало развития соответствующих пользовательских моделей на базе изучения процессов формообразования [3, 4].

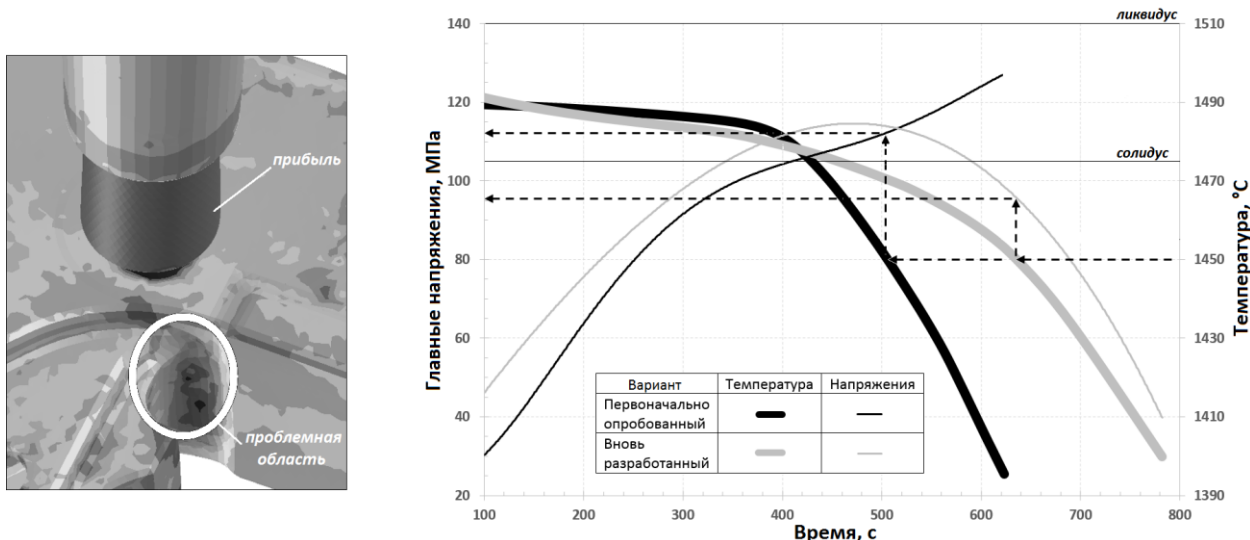


Рис. 2. Поиск условий предотвращения горячих трещин в отливке рамы:

а – конфигурация проблемного участка; б – номограмма температура/напряжения/время

По результатам компьютерной разработки проекта МСО появляется возможность обратиться к САМ технологиям при её производстве. В дополнение к надёжному способу изготовления на станках с ЧПУ, нынешний уровень развития цифровых технологий предоставляет возможность обращения к аддитивным методам получения МСО. В условиях ТВСЗ реализовано изготовление элементов МСО методом лазерной стереолитографии (SLA) из отверждаемых фотополимерных смол [5] на установке 3D Systems ProX 950 (максимальные габариты получаемого изделия 1500x750x550). По мере накопления опыта работы с указанной технологией печати выявлены следующие особенности в приложении к изготовлению МСО:

- дороговизна смол для 3D печати, в особенности, сравнимых по характеристикам износостойкости с модельными пластиками Ebalta или Sika под обработку на станках с ЧПУ, делает маловыгодной прямую 3D печать крупной модельной оснастки;
- оптимальный вариант – изготовление тонкостенной матрицы под дальнейшую (многократную) заливку самотвердеющей смолой, приобретающей высокие механические свойства;
- при печати используется умеренное разрешение для достижения разумной продолжительности процесса, поэтому необходима механическая доводка ступенчатой рабочей поверхности;

- оптимальное использование прямой печати элементов оснастки – фрагменты сложной конфигурации, пластины с маркировкой и т.п.;
- при печати крупных элементов возрастает опасность коробления с нарушением размерной точности и отбраковкой всего изделия.

Внедрение технологий 3D сканирования с помощью приобретённого на ТВСЗ устройства Creafom и соответствующего программного обеспечения позволило, в том числе, решить задачу ускоренного контроля точности изготовления МСО, особо актуальную для случаев ручной доводки. При обработке результатов сканирования возможно их наложение на эталонную 3D модель с выводом полей смещений для отслеживания расхождений конфигурации и размеров. Одним из основных осложнений при работе с 3D сканированием является невозможность доступа во внутренние полости изделий без их разборки либо разрушения.

Современные цифровые технологии, относящиеся к большим данным и методам машинного обучения, являются ускоренным способом достижения цели управления процессом производства отливок требуемого качества, хорошо отвечающим реалиям литейного производства, с попутным обогащением теоретических представлений о различных процессах при формировании отливок. В рамках внедрения упомянутых технологий на ТВСЗ созданы базовые условия, связанные с развёртыванием ERP и MES систем для управления ресурсами и производством отливок.

Литература

1. Орлова А.М. Концепция «умного вагона». //Техника железных дорог, 2018 – 2(42), с. 4-5
2. Иванов В.В. Теория и практика изготовления отливок в вакуумно-плёночных формах. Владивосток: Дальнаука, 2006. – 252 с.
3. Broytman O.A., Babkov D.S., Ioffe M.A. Computer Modeling of Castings Quality With Taking into Account the Differentiation of Structure-Dependent Cores and Molds Material Properties. //Int. Journ. Machines, Technologies, Materials, 2015 – 4, p. 15-18
4. Бройтман О.А., Бабков Д.С., Белозеров С.А., Петров А.И., Иоффе М.А. Исследование процессов формирования свойств песчаных стержней. //Литейщик России, 2017 – 10, с. 38-40
5. Jacobs P.F., Reid D.T. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography. Dearborn, MI: SME, 1992. – 434 p.