



УДК 621.74.02

Поступила 13.10.2017

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ООО «РЛЗ»

APPLICATION EXPERIENCE OF COMPUTER SIMULATION SYSTEMS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF FOUNDRY PRODUCTION AT THE ROSTOV FOUNDRY

А. В. ФЕДОСОВ, ООО «Ростовский литейный завод», г. Ростов-на-Дону, Россия, ул. Менжинского, 2. E-mail: fedosov-sol@mail.ru, Г. В. ЧУМАЧЕНКО, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, пл. Гагарина, 1. E-mail: gchumachenko@dstu.edu.ru

A. V. FEDOSOV, «JSC Rostov foundry», Rostov-on-Don, Russia, 2, Menzhinsky str. E-mail: fedosov-sol@mail.ru, G. V. CHUMACHENKO, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, 1, Gagarin sq. E-mail: gchumachenko@dstu.edu.ru

Рассмотрены этапы внедрения средств компьютерного моделирования в производственный процесс ООО «РЛЗ». Предложена система оценки результатов моделирования, которая включает определение комплексных параметров, позволяющих проводить оценку причин и вероятности образования усадочных дефектов. Предложено уравнение, определяющее связь между результатами моделирования и фактическим браком в производстве. Для оценки причин образования усадочных дефектов предложено использовать индекс работы питателя. Для оценки возможности уменьшения массы литниковой системы предложено использовать индекс выхода годного. Разработаны уравнения для расчета этих индексов. Представлен системный подход по применению результатов моделирования, предусматривающий организацию базы данных прорабатываемых технологий. Развитие этой базы позволяет не только аккумулировать нарабатанный опыт, но и применять его для минимизации ошибок и экономии времени в процессе внедрения новых отливок. Представлены результаты практического применения разработанной системы для 10 позиций, что позволило увеличить выход годного на 6,9% и сократить уровень общего брака на 5,1%.

The stages of introduction of computer simulation tools in the production process of The Rostov Foundry are considered. A system for estimating the results of simulation is proposed, which includes the definition of complex parameters that allow an assessment of the causes and the probability of formation of shrinkage defects. An equation that determines a relationship between results of simulation and actual rejects in production is proposed. The feeder operation index is suggested to use for estimation of the reasons for the formation of shrinkage defects. The yield index is suggested to evaluate the possibility of reducing the weight of gate system. Equations for calculating of these indices are developed. A systematic approach is presented for the application of simulation results, which provides for the organization of a database of the technologies being studied. The development of this base allows not only to accumulate the experience, but also to apply it to minimize errors and save time in the process of introducing new castings. The results of practical application of the developed system for 10 positions are presented, which allowed to increase the yield by 6.9% and to reduce the total defects rate by 5.1%.

Ключевые слова. Компьютерное моделирование, оптимизация, выход годного, усадка, прибыль.

Keywords. Computer simulation, optimization, yield, shrinkage, income.

Активные работы по разработке и применению средств компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) были начаты порядка 25–30 лет назад. Однако широкое использование данных продуктов на отечественных литейных предприятиях началось не так уж давно. Причиной этому являлись как недоработки со стороны разработчиков и распространителей программного обеспечения, так и высокая инерционность со стороны отечественного потребителя. Сегодня уже на многих предприятиях достигнуто понимание практической значимости применения СКМ ЛП. Об этом свидетельствует появление в литературе большого количества положительных примеров как индивидуальных решений [1, 2], так и опыта разработки схем интеграции СКМ ЛП в производственный процесс [3, 4]. Однако

формирование полноценного системного подхода по применению СКМ ЛП на всех этапах производства находится на стадии разработки и требует продолжения работ в этом направлении.

Цель работы – разработка системного подхода по применению средств математического моделирования для оптимизации технологии производства отливок в песчано-глинистые формы; улучшение технико-экономических показателей производства отливок из высокопрочного чугуна в условиях ООО «РЛЗ».

С 2009 г. на ООО «РЛЗ» организовано крупносерийное производство мелких и средних отливок из высокопрочного чугуна на базе технологии внутриформенного модифицирования. За это время на предприятии сформировался внушительный действующий парк модельной оснастки, технологии для которого разрабатывались с применением различных методик и подходов по расчету ЛПС. Данный факт и различный уровень проработки привели к тому, что применяемые технологии сильно отличаются по показателям эффективности. С 2015 г. на предприятии начато освоение СКМ ЛП, что позволяет не только производить индивидуальную оценку эффективности технологий, но и расширить возможности системного подхода к разработке новых и оптимизации действующих литейных технологий. Как и внедрение большинства новых подходов в производство, освоение СКМ ЛП происходит поэтапно:

- 1) оценка адекватности результатов моделирования применительно к локальным особенностям производства;
- 2) корректировка входных параметров модели с целью обеспечения максимальной согласованности результатов прогноза с производственными данными; разработка системы оценки результатов прогноза;
- 3) применение СКМ ЛП на этапе оптимизации действующих технологий и наработка опытной базы данных по результатам моделирования;
- 4) разработка системного подхода по применению результатов моделирования для получения максимальной точности прогноза при разработке новых технологий.

По каждому из перечисленных этапов на ООО «РЛЗ» был проведен большой объем работ.

Первый этап освоения СКМ ЛП очень важен, поскольку происходит первое сопоставление ожиданий и возможностей предлагаемого программного комплекса. На этом шаге важно понимать, что результаты моделирования обладают некоторой статистической неопределенностью вследствие применения различных расчетных сеток и экспериментальных данных по теплофизическим параметрам системы. В таком случае полученный прогноз более корректно характеризовать некоторой областью достоверности. С другой стороны, на производственные результаты оказывает влияние дрейф технологических параметров (химический состав, температура и др.), поэтому адекватность компьютерного прогноза должна оцениваться с учетом диапазона допустимых отклонений.

Определенной сложностью при прохождении первого этапа на ООО «РЛЗ» было то, что производство отливок для машин сельскохозяйственного назначения позволяет согласовывать достаточно большие допуски на дефекты с последующим их исправлением. Поэтому для ряда отливок прямое сопоставление результатов моделирования и статистики по браку показало существенное расхождение. Значительно сократить этот разрыв позволило вовлечение в процесс анализа дополнительных данных об уровне исправления литейных дефектов и о нарушениях технологических режимов. Таким образом, максимальная согласованность компьютерного прогноза и фактических данных была достигнута благодаря использованию комплексных параметров, которые объединяют прямые и косвенные данные, отражающие наличие дефекта в отливке.

Следующим важным фактором в процессе достижения высокой достоверности компьютерного прогноза является разработка системы оценки результатов моделирования. Рассмотрим в качестве примера оценку вероятности образования усадочных дефектов. Как правило, результатом расчета математической модели является поле распределения относительной плотности материала в объеме отливки. В этом случае оценку вероятности образования дефектов следует проводить по двум критериям: площади и степени поражения расчетного объема отливки. С одной стороны, чем выше локальные значения поля усадки, тем выше вероятность образования усадочных раковин, с другой стороны, эта вероятность уменьшается с уменьшением пораженности расчетного объема. Так, на ООО «РЛЗ» для оценки вероятности образования усадочных дефектов применяется уравнение:

$$\text{Shr} = \text{Shr}_{\max}^{(n-m\text{Shr}_{(v)})},$$

где Shr – вероятность образования дефекта, отн. ед.; Shr_{\max} – максимальное локальное значение поля усадки, отн. ед.; $\text{Shr}_{(v)}$ – относительный объем отливки, пораженный усадкой, отн. ед.; n, m – коэффициенты пропорциональности.

Определение коэффициентов пропорциональности производится на основе достижения максимальной корреляции между расчетными и фактическими значениями уровня брака.

Помимо прогнозирования собственно уровня брака, отдельный интерес представляет оценка причины его образования. В качестве наиболее распространенных причин образования усадочных раковин можно выделить следующие: недостаточность объема прибыли и раннее перемерзание питателя. Анализ временных срезов процесса кристаллизации отливки позволяет прогнозировать степень влияния этих причин при оценке работы ЛПС. Так, на ООО «РЛЗ» было предложено использовать индекс работы питателя (ИРП), характеризующий соотношение объема жидкой фазы, оставшейся в ЛПС после кристаллизации отливки, к жидкой фазе, изолированной в отливке в момент перемерзания питателей. ИРП представляет собой нормализованную величину и определяется по уравнению:

$$\text{ИРП} = 1 - (\text{Ж}_\Pi - \text{Ж}_3)^{k(1-\text{Ж}_И)},$$

где Ж_Π – объем жидкой фазы в момент перемерзания питателей, отн. ед.; Ж_3 – объем жидкой фазы в момент полной кристаллизации отливки, отн. ед.; $\text{Ж}_И$ – объем жидкой фазы, изолированной в отливке, отн. ед.; k – коэффициент пропорциональности.

Значение ИРП, равное 1, указывает на полноценную работу питателя, т. е. его перемерзание происходит не ранее полного затвердевания отливки. Чем меньше это значение, тем раньше происходит перемерзание питателя и больше объема жидкой фазы остается изолированным в отливке, что в результате приводит к увеличению вероятности образования усадочных дефектов. Так, ИРП может быть использован для оценки причины образования усадки. Высокие значения ИРП указывают на недостаточность объема прибыли и необходимость его увеличения, тогда как низкие значения указывают на необходимость увеличения сечения питателя или изменения точки подвода металла.

Не меньший интерес представляет оценка возможности увеличения выхода годного литейных технологий. Для этой цели разработан индекс выхода годного (ИВГ), который является логическим развитием характеристики ИРП. ИВГ определяется произведением доли жидкой фазы, оставшейся в ЛПС в момент полного затвердевания отливки и величины ИРП. Значения ИВГ также являются нормированными, и, по сути, выражают избыточный объем литниковой системы, который, весьма вероятно, не оказывает влияния на процесс формирования отливки.

Применение предложенных комплексных параметров на ООО «РЛЗ» позволяет значительно повысить релевантность результатов компьютерного моделирования литейных технологий и их согласованность с фактическими данными по оценке качества литья.

Первые положительные результаты применения СКМ ЛП были получены при решении задачи оптимизации действующих литейных технологий с целью увеличения выхода годного для отливок из стали и высокопрочного чугуна. На первом этапе этой задачи необходимо определить перечень позиций, обладающих высоким потенциалом в отношении уменьшения массы литниковой системы. При этом чаще всего применяется экспертная оценка, недостатком которой является возможность проведения только качественной оценки. Расчет же и анализ значений ИВГ позволяют количественно оценить резервы по снижению массы ЛПС и произвести их ранжирование. Таким образом, применение ИВГ существенно улучшает качество поиска технологий для проведения оптимизации. Следует отметить, что полностью отказаться от экспертной оценки в пользу применения ИВГ пока не представляется возможным, эти два подхода хорошо дополняют друг друга и позволяют повысить эффективность оценки.

Схема дальнейшей работы подобна многочисленным итерационным схемам, представленным в литературе, но с дополнением в виде применения значений ИВГ. В качестве критерия оптимальности принимается величина ВГ с обязательным условием обеспечения требуемого уровня качества и дополнительным условием порога ИВГ, например, не менее 4%.

Пороговое значение ИВГ вводится для обеспечения некоторого запаса покрывающего колебания технологических факторов в производстве, что позволяет учитывать уровень организации производства и добиться стабильности показателей качества при реализации технологии. В таблице представлены результаты расчетов рассмотренных величин для цикла оптимизации отливки «Винт». Исходная технология представлена под кодом варианта, равным нулю. В этом примере видно, как изменяются условия питания отливки и выход годного для различных технологических вариантов. Последний вариант, безусловно, является лидером, однако технология при этом претерпела кардинальные изменения, что связано со значительными затратами на разработку и изготовление полностью нового комплекта. Таким об-

разом, окончательный выбор наиболее эффективного варианта может быть произведен после взвешивания эффекта от применения новой технологии и затрат на ее реализацию.

Пример процесса оптимизации технологии с применением ИРП и ИВГ

Код варианта	Время затвердевания, (ч, м, с)	Доля жидкой фазы, %			ИРП	ИВГ, %	Объем усадки в теле отливки, %	Максимальная пористость, %	Вероятность образования дефекта	Выход годного, %
		в момент полного затвердевания	перемерзания питателей	изолированной в отливке, %						
0	0:09:06	15	26	30	0,5	8,1	10	50	60,3	48
1	0:09:06	14	18	15	0,7	10,4	14	50	63,2	40
2	0:08:19	14	28	30	0,5	7,0	10	50	60,3	52
3	0:08:19	5	10	5	0,8	3,8	5	12	17,8	37
4	0:08:10	14	28	30	0,5	7,0	10	50	60,3	53
5	0:08:10	5	5	0	1,0	5,0	5	12	17,8	35
6	0:05:45	4	4	0	1,0	4,0	0	0	→0	50

Безусловным преимуществом является проведение оптимизации при наличии фактических производственных данных по рассматриваемой технологии. В этом случае результаты прогноза могут быть напрямую соотнесены с фактическими данными и использоваться в качестве базовой точки отсчета для оценки эффективности предлагаемых изменений, что позволяет наиболее точно прогнозировать ожидаемый уровень качества новой технологии с учетом всех особенностей и специфики рассматриваемой отливки. Однако это не представляется возможным в процессе подготовки производства новых отливок. Внедрение каждой новой отливки, даже с конфигурацией, подобной действующей, может обернуться неприятным сюрпризом. В этом случае разумным является подстраховка и назначение избыточных характеристик, неблагоприятно сказывающихся на эффективности технологии, которую впоследствии приходится оптимизировать. Снизить до минимума количество недочетов и ошибок в процессе подготовки производства позволяет опыт, полученный на базе анализа действующих технологий. В этом отношении весьма важны систематизация и организация базы данных проведенных расчетов, результатом анализа которой является пакет коэффициентов и статистических характеристик, применяемых для оценки соответствия результатов прогноза и фактических производственных данных. Достаточная полнота базы данных позволяет производить группировку отливки по различным технологическим и конструкционным характеристикам, таким, как габарит, приведенная толщина стенок и др. Благодаря этому появляется возможность подстраиваться под особенности новой конфигурации отливки и существенно увеличивать точность выполняемого для нее прогноза.

Для достижения максимальной эффективности от применения результатов математического моделирования представленные выше подходы необходимо связать в единую систему. На рисунке три основных направления применения СКМ ЛП объединены в систему посредством обмена коэффициентами и расчетными данными. Основой представленной системы является база данных расчета технологических вариантов литниковых систем, связанная с производственной базой учета брака. Пополнение этих двух баз данных будет сопровождаться непрерывным улучшением качества прогноза математического моделирования и соответственно повышением эффективности процессов оптимизации и подготовки производства.

В представленной схеме не отображено исследовательское направление применения СКМ ЛП. На наш взгляд, целесообразно не включать данное направление в общую производственную систему, что позволит обеспечить его независимость от производственных штампов, которые могут ограничивать эффективность поиска новых решений и подходов.



Схема применения средств математического прогнозирования и технологического анализа в литейном производстве

Применение рассмотренной системы, даже при использовании технологической базы данных объемом порядка 30 отливок, позволило успешно провести оптимизацию действующей технологии для 10 наименований. В результате средняя величина выхода годного для этих отливок была увеличена на 6,9%, при этом уровень общего брака был снижен на 5,1%.

Необходимо отметить, что ни для одной из оптимизированных технологий не наблюдалось увеличения уровня как внутреннего, так и внешнего брака, что свидетельствует о высоком достигнутом уровне соответствия между результатами прогноза и фактическим уровнем брака.

В результате на ООО «РЛЗ» были проведены все четыре этапа освоения СКМ ЛП. С уверенностью можно сказать о достигнутом положительном опыте оптимизации действующих литейных технологий и разработке системного подхода по применению результатов моделирования. На этапе подготовки производства организовано использование базы данных накопленного опыта, развитие которой способствует непрерывному увеличению точности компьютерных прогнозов, что благоприятно сказывается на сокращении материальных и временных затрат в процессе освоения новых отливок.

Выводы

В процессе внедрения СКМ ЛП на ООО «РЛЗ» была разработана система оценки результатов моделирования, включающая определение комплексных параметров для оценки вероятности и причин образования усадочных дефектов. Применение предложенных параметров на ООО «РЛЗ» позволило значительно повысить релевантность результатов компьютерного моделирования литейных технологий и их согласованность с фактическими данными по оценке качества литья.

Предложен системный подход по применению результатов моделирования, включающий создание и непрерывное пополнение базы данных прорабатываемых технологий, которая в свою очередь является источником пакета параметров, отражающих накопленный опыт и позволяющих уточнять результаты прогноза. Развитие этой базы позволяет не только аккумулировать наработанный опыт, но и применять его для минимизации ошибок и экономии времени в процессе внедрения новых отливок.

Практическое применение разработанной системы на 10 позициях позволило увеличить выход годного на 6,9% и сократить уровень общего брака на 5,1%.

Литература

1. **Ваченко А. С.** Математическое моделирование как инструмент технолога-литейщика // Литейное производство. 2015. № 3. С. 30–32.
2. **Монастырский А. В.** Излом боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. В. Монастырский, В. М. Бубнов, С. В. Котенко, В. В. Балакин // САПР и графика. 2013. № 1 (195). С. 95–99.
3. **Монастырский А. В.** О современных методах разработки и оптимизации технологических процессов в литейном производстве // Литейное производство. 2010. № 5. С. 19–22.
4. **Огородникова О. М., Мартыненко С. В., Будяк Е. С.** Опыт внедрения системы компьютерного моделирования литейных процессов на ОАО «НПК Уралвагонзавод» // Тр. одиннадцатого съезда литейщиков России. Нижний Тагил: Уралвагонзавод, 2013. С. 367–370.

Reference

1. **Vachenko A. S.** Matematicheskoe modelirovanie kak instrument tehnologa-litejshhika [Mathematical modeling as an instrument of a foundry technologist]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2015, no. 3, pp. 30–32.
2. **Monastyrskij A. V., Bubnov V. M., Kotenko S. V., Balakin V. V.** Izlom bokovoj ramy telezhki gruzovogo vagona Analiz tehnologii proizvodstva, puti ustraneniya defektov [Fracture of the side frame of the freight car trolley. Analysis of production technology, ways to eliminate defects]. *SAPR i grafika = CAD system and grafics*, 2013, no. 1 (195), pp. 95–99.
3. **Monastyrskij A. V.** O sovremennyh metodah razrabotki i optimizacii tehnologicheskikh processov v litejnom proizvodstve [Modern Methods of Developing and Optimizing the Manufacturing Processes in the Foundry Industry]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2010, no. 5, pp. 19–22.
4. **Ogorodnikova O. M., Martynenko S. V., Budjak E. S.** Opyt vnedreniya sistemy komp'yuternogo modelirovaniya litejnyh processov na OAO «NPK Uralvagonzavod» [Experience in implementing the computer simulation of foundry processes at NPK Uralvagonzavod]. *Trudy odinnadcatogo sezda litejshhikov Rossii = Proceedings of the 11th Conference of the Russian foundrymen*. Nizhnij Tagil, Uralvagonzavod, 2013, pp. 367–370.