

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время отработка технологии изготовления сложных заготовок в литейном производстве, например корпусов, работающих под высоким давлением рабочей среды, как правило, производится методом проб и ошибок. Причиной этого является чрезвычайная сложность и недостаточная изученность процессов, происходящих в отливках во время затвердевания.

Учитывая значительные материальные и временные затраты при разработке технологии, создание эффективной методики оптимизации процессов затвердевания является важным вопросом. Как показывает практика на ряде предприятий, применение систем автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП) позволяет значительно снизить расходы и время на проектирование технологических процессов (ТП) литья. Однако на сегодняшний день методы и алгоритмы, применяемые в САПР литейных технологий, разработаны не в полном объеме и нуждаются в постоянном развитии.

Таким образом, актуальность темы исследования заключается в необходимости совершенствования эффективности использования САПР ТП в литейном производстве.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем ГБ 96.26 «Исследование процессов затвердевания металлических и неметаллических материалов» (№ гос. регистрации 01.9.60012544); ГБ 98/13 «Создание учебно-научного центра «Металлургия», подраздел «Физические основы моделирования и информационного обеспечения САПР технологических процессов получения структуры и свойств металлических материалов» (№ гос. регистрации 01.9.90001631; ГБ 2004/42 «Процессы получения литых заготовок с заданными свойствами»; в рамках хоздоговора с Воронежским региональным научно-координационным центром «Ренакордин», х/д 4/00-ц «Разработка системы автоматизированного проектирования технологического процесса литья точных заготовок для нефтегазового оборудования».

Цель и задачи работы. Целью научного исследования является разработка моделей и алгоритмов автоматизированного

проектирования на этапе «заливка-затвердевание» технологического процесса изготовления корпусных отливок ответственного назначения, получаемых методом литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) с использованием установки направленного затвердевания.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

провести анализ современного состояния САПР в литейном производстве и выявить перспективные направления повышения эффективности функционирования таких систем;

построить модели зависимости времени затвердевания и уровня дефектов корпусных отливок от наиболее важных технологических параметров, выявленных при оценивании их значимости;

построить оптимизационную модель, позволяющую при условии минимального времени затвердевания и заданного уровня дефектов находить оптимальные термодинамические параметры технологии на стадии затвердевания отливки;

разработать методику и алгоритм автоматизированного проектирования технологии на этапе «заливка-затвердевание», использующие специализированную базу данных (БД), учитывающую специфику ТП ЛВМ;

сформировать структурно-временную схему ТП ЛВМ для изготовления корпусных деталей и на ее основе определить структуру информационного обеспечения (ИО) комплекса моделирования и оптимизации литейной технологии;

разработать программное обеспечение (ПО) оптимизации термодинамического режима ТП ЛВМ с использованием установки направленного затвердевания на этапе «заливка-затвердевание».

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории управления большими системами, теории вероятности и математической статистики, теории моделирования и оптимизации, а также методы литья по выплавляемым моделям, металлографии и химического анализа.

Научная новизна работы. В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

комплекс регрессионных моделей зависимости времени затвердевания и уровня дефектов корпусных отливок от наиболее значимых параметров ТП, отличающийся возможностью прогнозирования развития усадочных процессов;

оптимизационная модель ТП изготовления корпусных отливок методом ЛВМ с использованием установки направленного затвердевания на этапе «заливка-затвердевание», позволяющая задавать различные уровни дефектов и находить оптимальные сочетания температурно-временных параметров технологии;

методика автоматизированного проектирования литейных технологий на этапе «заливка-затвердевание», отличающаяся универсальностью и применимостью к различным способам литья и конфигурациям отливок;

алгоритмы моделирования и оптимизации процессов затвердевания корпусных отливок, позволяющие учитывать в процессе работы наиболее значимые параметры литейной технологии.

Практическая ценность работы. Разработанные в диссертации методы, модели и алгоритмы автоматизированного проектирования технологии на этапе «заливка-затвердевание» позволяют существенно сократить время и материальные ресурсы на отработку технологического процесса литья корпусных деталей.

Предложены структура, состав, а также разработаны информационное и программное обеспечение оптимизации, дополняющие и расширяющие возможности САПР литейной технологии на базе комплекса «ПОЛИГОН».

Предложенная методика автоматизации проектирования была использована на Воронежском механическом заводе при разработке технологии изготовления корпусной отливки ЛВМ на установке направленного затвердевания.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2000); на XXXII-XXXV научно-технических конференциях сотрудников, студентов ВГТУ (Воронеж, 2002-2005); на научно-практических семинарах «Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности» (Санкт-Петербург, 2004, 2005).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 10 печатных работ. В работах [1,4] показана сложность поиска оптимальных вариантов технологии литья в реальном производстве без использования средств автоматизации; в работах [2,3,5,6] представлены результаты двухмерного моделирования процессов затвердевания корпусных отливок, изготавливаемых методом ЛВМ. В работах [7-10] обсуждаются вопросы трехмерного моделирования процессов затвердевания, а также проблемы, касающиеся создания универсальной методики автоматизированного проектирования литейных технологий на этапе «заливка-затвердевание».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 133 страницах; содержит 44 рисунка, 15 таблиц, библиографический список из 131 наименования и приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи работы, методы решения сформулированных задач, отмечены основные результаты исследования, выносимые на защиту; определена их научная новизна и практическая значимость; приведены сведения об апробации и практическом использовании результатов работы.

В первой главе приводится краткий обзор литературных источников по теме диссертации, выполнен критический анализ применяемых методов разработки новых технологий литейных процессов.

В настоящее время происходит интенсивное развитие информационных технологий. Это открывает неограниченные возможности использования компьютерной техники в САПР литейной технологии. Сложность использования этих способов состоит в неполноте математического описания технологических моделей процессов литья и недостатке информационного обеспечения, позволяющего проводить оптимизацию технологии.

Трудности применения САПР в литье заключаются еще и в том, что десятилетиями на предприятиях существовала практика накопления производственного опыта и эмпирических данных. По

мнению многих авторитетных литейщиков-исследователей, метод проб и ошибок является основой прогресса литейного производства.

Для успешного использования информационных технологий в литейном производстве требуется разработка новых подходов и совершенствование уже существующих методик.

В главе приводятся используемая в большинстве случаев и предлагаемая (рис.1) методики автоматизированного проектирования литейной технологии на этапе «заливка-затвердевание».

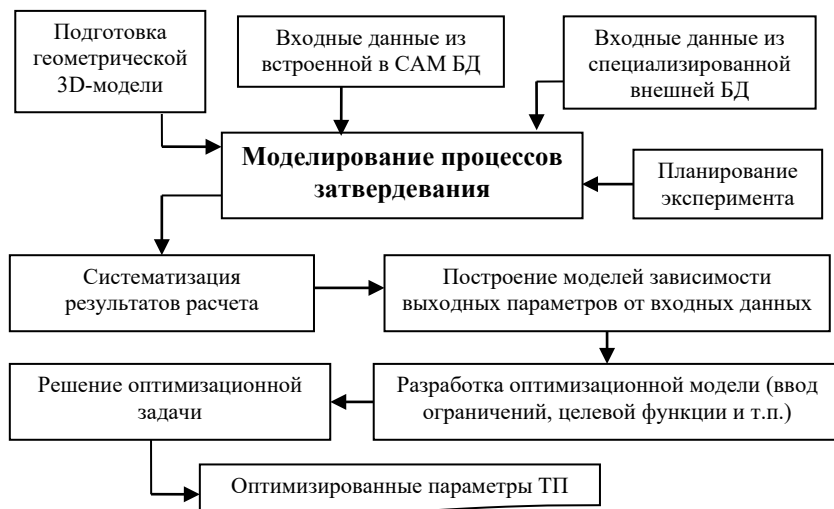


Рис. 1. Структура методики автоматизированного проектирования ТП литья на этапе «заливка-затвердевание»

Основными отличиями предлагаемой методики являются:

- использование методов экспертной оценки и планирования эксперимента в ходе проведения моделирования с целью построения моделей зависимости выходных параметров (уровни дефектов, время затвердевания и т.п.) от исходных данных (температуры печи и формы, скорости перемещения и т.п.);
- разработка оптимизационной модели, задание условий и расчет оптимальных технологических параметров на этапе «заливка-затвердевание»;

- использование специализированной внешней базы данных, позволяющей более адекватно учитывать особенности технологии.

Проведен сравнительный анализ российских и зарубежных систем, использующихся для автоматизации проектирования литейных технологий на этапе затвердевания, и принято решение об использовании в качестве программного инструмента российской конечно-элементной системы САМ ЛП «Полигон», позволяющей проводить расчеты температурно-фазовых полей и усадочных дефектов.

Предложена структура комплекса автоматизированного проектирования ТП изготовления корпусных отливок на базе САМ ЛП «Полигон».

В заключительной части главы поставлены цели и определены задачи исследования.

Во второй главе представлен процесс оптимизации этапа «заливка-затвердевание» технологического процесса получения корпусных отливок методом ЛВМ на установке направленного затвердевания. Алгоритм процесса представлен на рис. 2.

Выполнено ранжирование и определены весовые коэффициенты одиннадцати параметров технологического процесса, влияющих на конечное качество литья. Оценка значимости факторов проводилась в соответствии с экспертными оценками специалистов-литейщиков Воронежского механического завода и позволила в дальнейшем при моделировании изменять только значимые технологические параметры, что значительно сократило общее время расчетов. Установлено, что наибольшее влияние на процесс затвердевания оказывают динамический режим выведения заливки оболочки из зоны нагрева, температурный режим печи и конструкция детали.

С использованием САМ ЛП «Полигон» были проведены расчеты времени затвердевания и уровня усадочных дефектов корпусной отливки ответственного назначения с учетом изменения наиболее значимых параметров технологии. Были рассчитаны различные варианты скоростей выведения заливки металлом формы из зоны нагрева ($V=4...20$ мм/мин), температурного режима оболочки $T_1=800...1400$ °С и температурного режима печи $T_2=1500...1600$ °С.

На основании полученных данных (см. таблицу) построены модели зависимости времени затвердевания Y_{VZ} , уровня дефектов в точке а Y_a и уровня дефектов в точке б Y_b от V , T_1 и T_2 .



Рис. 2. Алгоритм оптимизации параметров ТП ЛВМ

Модели строились методом полного факторного эксперимента. После проверки на адекватность с помощью F критерия Фишера были получены следующие зависимости:

$$Y_{VZ} = 1194.25 - 96.0625 \times X_1 + 1.635 \times X_3 - 0.03375 \times X_1 \times X_3; \quad (1)$$

$$Y_a = 10.63 - 0.116 \times X_1 - 0.009 \times X_2 - 0.0068 \times X_3 + 7.25 \times 10^{-5} \times X_1 \times X_3 + 5.208 \times 10^{-6} \times X_1 \times X_2 + 5.83 \times 10^{-6} \times X_2 \times X_3;$$

$$Y_b = 4.77 - 0.19698 \times X_1 - 1.974 \times 10^{-3} \times X_2 - 2.96 \times 10^{-3} \times X_3 + 1.325 \times 10^{-4} \times X_1 \times X_3,$$

где X_1 - скорость выведения отливки из зоны нагрева, мм/мин;

X_2 - температура оболочки в момент заливки, °C;

X_3 - температура средней части печи, °C.

Время затвердевания (с) и уровень дефектов в точках а и б (%) при различных технологических условиях

		Т формы 800 °C			Т формы 1100 °C			Т формы 1400 °C		
		Т средней части печи, °C			Т средней части печи, °C			Т средней части печи, °C		
		1500	1550	1600	1500	1550	1600	1500	1550	1600
Скорость V_z , мм/мин	20	$Y_{VZ} = 714$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,2$	$Y_{VZ} = 750$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,12$	$Y_{VZ} = 810$ $Y_a = 0,13$ $Y_b = 0,28$	$Y_{VZ} = 714$ $Y_a = 0,07$ $Y_b = 0,13$	$Y_{VZ} = 750$ $Y_a = 0,03$ $Y_b = 0,2$	$Y_{VZ} = 810$ $Y_a = 0,12$ $Y_b = 0,34$	$Y_{VZ} = 714$ $Y_a = 0,03$ $Y_b = 0,1$	$Y_{VZ} = 750$ $Y_a = 0,04$ $Y_b = 0,24$	$Y_{VZ} = 810$ $Y_a = 0,17$ $Y_b = 0,22$
	12	$Y_{VZ} = 1125$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,05$	$Y_{VZ} = 1170$ $Y_a = 0,05$ $Y_b = 0,05$	$Y_{VZ} = 1230$ $Y_a = 0,04$ $Y_b = 0,12$	$Y_{VZ} = 1125$ $Y_a = 0,08$ $Y_b = 0,04$	$Y_{VZ} = 1170$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,06$	$Y_{VZ} = 1230$ $Y_a = 0,01$ $Y_b = 0,15$	$Y_{VZ} = 1125$ $Y_a = 0,09$ $Y_b = 0,05$	$Y_{VZ} = 1170$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,04$	$Y_{VZ} = 1230$ $Y_a = 0,02$ $Y_b = 0,16$
	4	$Y_{VZ} = 3060$ $Y_a = 0,07$ $Y_b = 0,08$	$Y_{VZ} = 3120$ $Y_a = 0,03$ $Y_b = 0,099$	$Y_{VZ} = 3210$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,04$	$Y_{VZ} = 3060$ $Y_a = 0,07$ $Y_b = 0,08$	$Y_{VZ} = 3120$ $Y_a = 0,03$ $Y_b = 0,095$	$Y_{VZ} = 3210$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,02$	$Y_{VZ} = 3060$ $Y_a = 0,07$ $Y_b = 0,08$	$Y_{VZ} = 3120$ $Y_a = 0,03$ $Y_b = 0,096$	$Y_{VZ} = 3210$ $Y_a = 0,06$ $Y_b = 0,02$

На основе полученных зависимостей (1) построена оптимизационная модель, позволяющая задавать различные уровни дефектов и проводить оптимизацию температурно-временных параметров технологического процесса изготовления корпусных отливок, получаемых методом ЛВМ. Целевой функцией являлась минимизация времени затвердевания:

$$Y_{VZ} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Ограничения были представлены в виде:

$$\begin{cases} Y_a < A \\ Y_b < B \\ 800 \leq X_2 \leq 1400 \\ 1500 \leq X_3 \leq 1600, \end{cases} \quad (3)$$

где А и В заданный уровень дефектов в точках а и в соответственно.

В ходе решения оптимизационной задачи симплекс-методом были определены температурно-временные режимы. При условии, что уровень дефектов не должен превышать 0,1%, оптимальными параметрами являются: скорость выведения отливки из зоны нагрева $X_1 = 18.1$ мм/мин; температура оболочки в момент заливки $X_2 = 944$ °С; температура средней части печи $X_3 = 1500$ °С.

Структура рассмотренного в главе математического обеспечения показана на рис. 3.

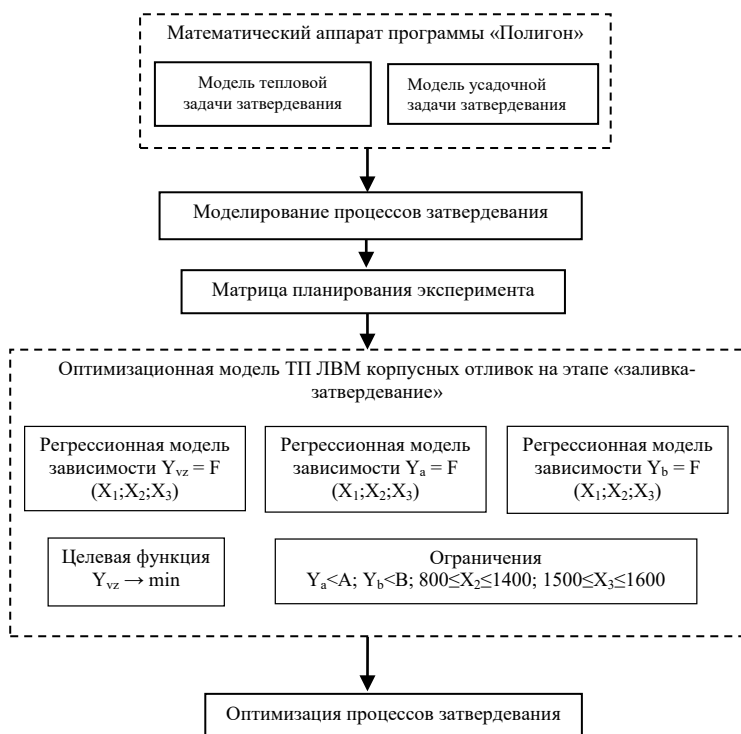


Рис. 3. Структура МО автоматизированного проектирования ТП изготовления корпусных отливок направленным затвердеванием

В результате проведенной работы была разработана методика автоматизированного проектирования технологии изготовления отливок на этапе «заливка-затвердевание», алгоритм которой представлен на рис. 4. Как видно из рисунка оптимизацию можно разделить на три основные части:

1) *Подготовка исходных данных для расчета.* Этот этап является наиболее ответственным и трудоемким. На нем происходит создание геометрической 3D-модели с помощью программы “SolidWorks” и ее разбивка на конечные элементы с помощью программы “HyperMesh”. Также на этом этапе определяются все теплофизические и усадочные параметры ТП.

2) *Расчет тепловых параметров и усадочных дефектов в программе «Полигон».* Целью этапа является получение результатов расчета усадочных дефектов в числовом формате (% дефектов).

3) *Оптимизация технологического процесса.* После получения данных в необходимом количестве строятся модели зависимости времени затвердевания, уровня дефектов в различных точках от различных термодинамических параметров ТП. Заключительной частью является построение оптимизационной модели технологического процесса на этапе «заливка-затвердевание». Для этого определяется целевая функция (время, уровень дефектов и т.п.) и вводятся ограничения (температуры, уровни дефектов, скорости и т.п.).

В третьей главе построена структурно-временная схема технологического процесса ЛВМ (рис. 5). На схеме показаны временные отрезки каждого из этапов. Даже если ориентироваться для каждой операции на минимальное время, полный технологический цикл продолжается не менее 50 дней. Как показывает производственный опыт, в среднем три попытки получения отливки приводят к браку, и лишь на четвертой удается получить отливку, удовлетворяющую высоким требованиям международных стандартов. Моделирование и оптимизация процессов, происходящих в литейной форме на этапе затвердевания отливки, помогают избежать ошибок и существенно сократить время на разработку технологического процесса литья.

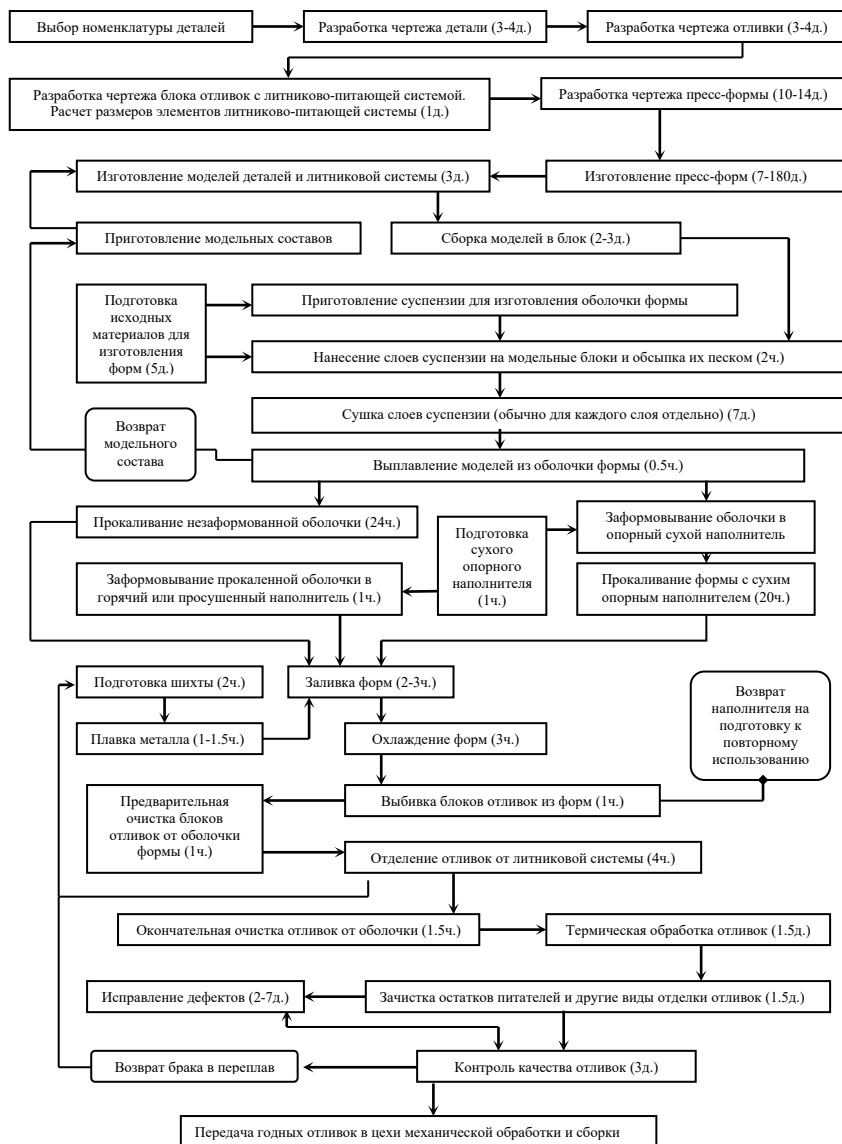


Рис. 5. Структурно-временная схема процесса изготовления отливок методом ЛВМ

Для эффективного проведения моделирования и оптимизации необходима разработка САПР с четким представлением всех операций ЛВМ и наличием информации о материалах, используемых в производстве. С этой целью было разработано ИО на основе базы данных, включающей в себя: химические составы сталей и сплавов, их механические и литейно-технологические свойства; теплофизические свойства материалов, применяемых в технологии ЛВМ; описание технологических режимов изготовления отливок методом ЛВМ; библиотеку технической документации литейного производства. Состав и структура ИО САПР ТП ЛВМ представлены на рис. 6.



Рис. 6. Структура информационного обеспечения САПР ТП ЛВМ.

На основе построенной ранее оптимизационной модели (1-3) на языке Basic была написана программа, в ходе работы которой у

пользователя запрашивается максимально допустимый процент уровня пористости в отливке. Далее производится многовариантный анализ решений и выбор оптимальных параметров ТП.

В заключительной части главы разработана структура программного комплекса (ПК) анализа и поддержки принятия решений в ходе автоматизированного проектирования ТП ЛВМ.

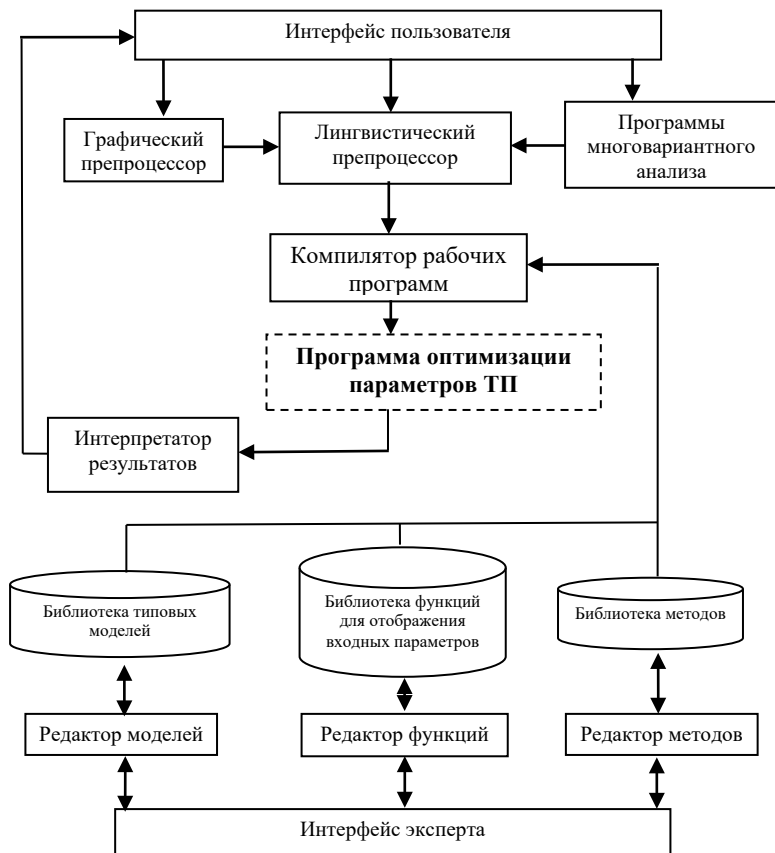


Рис. 7. Состав и структура программного комплекса анализа и поддержки принятия решений в ходе автоматизированного проектирования ТП ЛВМ.

ПК (рис. 7) должен обеспечивать пользователям любого уровня возможность проводить оптимизацию технологии, не

прибегая к множественным специфическим процедурам и операциям.

В четвертой главе представлена экспериментальная часть работы.

Разработан механизм взаимодействия математического, программного и информационного обеспечения в процессе проектирования технологии ЛВМ корпусных отливок.

На основании достаточной сходимости расчетных и экспериментальных данных были подтверждены ранее сделанные выводы об эффективности методики. Установлено, что при использовании предлагаемой методики временные и материальные затраты могут быть снижены на 20...50%.

Исследованы химический состав и механические свойства отливок, изготовленных по оптимизированной технологии. Установлено, что макроструктура материала отливок плотная, литейные дефекты усадочного происхождения отсутствуют. Микроструктура, химический состав и механические свойства отливок соответствуют стали ВНЛ-1 в термообработанном состоянии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена структура комплекса автоматизированного проектирования технологии изготовления отливок на этапе «заливка-затвердевание» на основании проведенного анализа состояния САПР в литейном производстве.

2. Проведено моделирование температурно-фазовых полей 3D-модели и вероятности образования дефектов усадочного характера в отливке при различных термодинамических условиях.

3. Построен комплекс моделей зависимости времени затвердевания и уровня дефектов корпусных отливок в двух точках от трех наиболее важных технологических параметров, выявленных в ходе экспертной оценки значимости одиннадцати факторов, влияющих на конечное качество отливки.

4. Построена оптимизационная модель процесса затвердевания корпусных отливок, изготавливаемых методом ЛВМ, с применением установки направленного затвердевания.

5. Разработана методика автоматизированного проектирования технологического процесса ЛВМ на этапе «заливка-затвердевание». Методика является универсальной для различных способов изготовления отливок.

6. Разработано информационное обеспечение, включающее в себя БД, содержащую информацию обо всех этапах ТП ЛВМ и свойствах используемых материалов, а также структурно-временную схему процесса изготовления отливок методом ЛВМ, позволяющую проводить предварительную оценку трудоемкости отдельных этапов производства.

7. Разработана программа оптимизации термодинамических параметров технологического процесса изготовления корпусных отливок направленным затвердеванием. Предложена структура интегрированного программного комплекса оптимизации ТП ЛВМ, обеспечивающего возможность работы пользователям любого уровня.

8. Обоснована эффективность предлагаемой методики автоматизированного проектирования ТП ЛВМ на основании результатов исследования свойств отливок, изготовленных по оптимизированной технологии.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Особенности изготовления заготовок для нефтегазового оборудования литьем по выплавляемым моделям / Ю.Н.Савельев, И.Н. Алехин, А.С. Грибанов, А.А. Щетинин, В.А. Аммер, С.В. Жеглов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение. - 1998. Вып.1.4. С.62-63.

2. Затвердевание тонкостенных отливок, изготавливаемых методом литья по выплавляемым моделям с использованием наружных холодильников / И.Н. Алехин, В.С. Кучеренко, Ю.Н. Савельев, А.А. Шеменова, Н.П. Ярославцев, В.А. Аммер, С.В.Жеглов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение. - 1999. Вып.1.6. С.89-91.

3. Компьютерное моделирование процесса затвердевания корпусных отливок / А.С. Грибанов, Ю.Н. Савельев, А.А. Щетинин,

В.А. Аммер, С.В. Жеглов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение. - 2000. Вып.1.8. С. 115-117.

4. Влияние типа литниково-питающей системы на качество корпусных отливок при литье по выплавляемым моделям/ И.Н. Алехин, А.В. Бондарь, А.С. Грибанов, Ю.Н. Савельев, С.В. Жеглов, А.А. Щетинин, А.В. Щетинин, В.А. Аммер // Техника машиностроения. 2000. №2. С.33-35.

5. Изучение возможности применения системы автоматизированного моделирования литейных процессов «Полигон» при подготовке производства точных корпусных отливок высокого давления / Ю.Н. Савельев, А.С. Грибанов, Г.М. Кувшинова, С.В. Жеглов, М.Д. Тихомиров, Д.Х. Сабилов // Прогрессивные литейные технологии: Тез. конф. М., 2000.

6. Компьютерное моделирование процесса затвердевания корпусных отливок / А.С. Грибанов, Ю.Н. Савельев, С.В. Жеглов, В.А. Аммер, А.А. Щетинин // Техника машиностроения. 2002. №5. С.52-53.

7. Жеглов С.В., Савельев Ю.Н., Щетинин А.А. Компьютерное 3D-моделирование процессов затвердевания корпусных отливок // Прикладные задачи моделирования и оптимизации: Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2002. С. 173-179.

8. Жеглов С.В., Разинкин К.А., Щетинин А.А. Реализация метода экспертных оценок критериев, влияющих на качество корпусных отливок // Высокие технологии в технике, медицине, экономике и образовании: Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2002. Ч.2. С. 155-161.

9. Анализ решения тепловой задачи при моделировании процесса формирования отливки корпуса насоса в системе «Полигон» / А.А. Щетинин, Л.С. Печенкина, С.В. Жеглов, А.В. Щетинин // Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Энергетика. - 2003. Вып.7.3. С.78-81.

10. Жеглов С.В. Моделирование процесса затвердевания корпусной отливки // Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности: Материалы науч.-практ. семинара. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2004. С.63-67.

Подписано в печать .09.2005.
Формат 60х84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж экз. Заказ №_____
Воронежский государственный технический
университет
394026 Воронеж, Московский просп., 14