

*The structural outline of automation of the chill mold auxiliaries is worked out. The criteria of choice of optimal chill mold auxiliaries construction, based on numerical methods of modeling, are offered.*

А. Н. ЧИЧКО, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, БНТУ, Л. В. МАРКОВ, ОАО «ММЗ»

УДК 669.27:519

## О КРИТЕРИЯХ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОКИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработка систем автоматизированного проектирования кокильной оснастки на протяжении долгого времени остается одним из самых важных и в то же время сложнейших вопросов литейного производства. От решения этого вопроса в значительной степени зависят уровень технологии и степень автоматизации процесса кокильного литья. Во многом благодаря рационально выбранному подходу к конструированию кокиля можно добиться хорошего качества получаемых отливок и высокой стойкости кокильной оснастки. Так, в последнее время методы моделирования технологических процессов постепенно вытесняют традиционные методы расчетов, используемые при проектировании кокильных отливок и оснастки. Математические методы позволяют с высокой долей вероятности предсказывать свойства будущей реальной отливки или оснастки, прогнозировать возможности образования тех или иных дефектов.

Анализ многочисленных научно-технических публикаций показывает, что на предприятиях литейного производства Республики Беларусь и стран СНГ при проектировании кокильной оснастки в значительной степени доминируют традиционные методы, основанные на опыте и эксперименте [1, 2]. К методам математического моделирования как к крайнему варианту прибегают лишь в тех случаях, когда невозможно добиться требуемых результатов (заданного качества отливок, требуемой стойкости оснастки и др.) методами традиционных расчетов и прототипирования. Причин этому много. Одна из них состоит в том, что в настоящее время для решения проблем проектирования кокильной оснастки предлагаются САД-системы, позволяющие повысить методы проектирования с использованием методов машинной графики. В то же время известно, что разрабатываемая оснастка для кокиля должна учиты-

вать особенности затвердевания отливки и процессы заполнения кокиля. Следует принимать во внимание и процессы формирования напряжений как в кокиле, так и в отливке. А здесь обычные САД-системы оказываются не достаточно эффективны и в этом случае необходимо использовать так называемые САЕ-системы (системы автоматизированного моделирования), которые позволяют рассчитать процессы литья в кокиль. Именно САЕ-системы являются реальным инструментом выбора и оптимизации кокильной оснастки.

Одной из таких систем моделирования является белорусская компьютерная система «ПроЛит-1.0» [3, 4], позволяющая моделировать процессы течения и кристаллизации металла в песчано-глинистых формах (рис. 1). Эта система дает возможность оценить вероятность образования недоливов и различных видов пористости в отливке. Однако она не позволяет промоделировать процесс формирования напряжений и деформации в кокиле при его заполнении и тем самым оценить его стойкость. Хорошо известно, что именно стойкость кокиля является одной из важнейших характеристик, которую необходимо учитывать, выбирая оптимальную пространственную конфигурацию кокильной оснастки. В работах [5–7] приведены математические модели для расчета напряжений и деформаций кокиля, позволяющие, в конечном счете, разработать методы расчета стойкости кокиля еще на стадии проектирования.

Анализ проблемы проектирования кокильной оснастки показал, что можно выделить следующие методы и подходы, которые должны быть встроены в процесс автоматизированного проектирования (рис. 2). Дадим необходимые пояснения к рисунку. Традиционными при проектировании кокильной оснастки являются расчеты толщины стенки кокиля, площади сечения элементов лит-



Рис. 1. Фрагмент моделирования процесса заполнения и кристаллизации металла в компьютерной системе «Пролит-1,0»

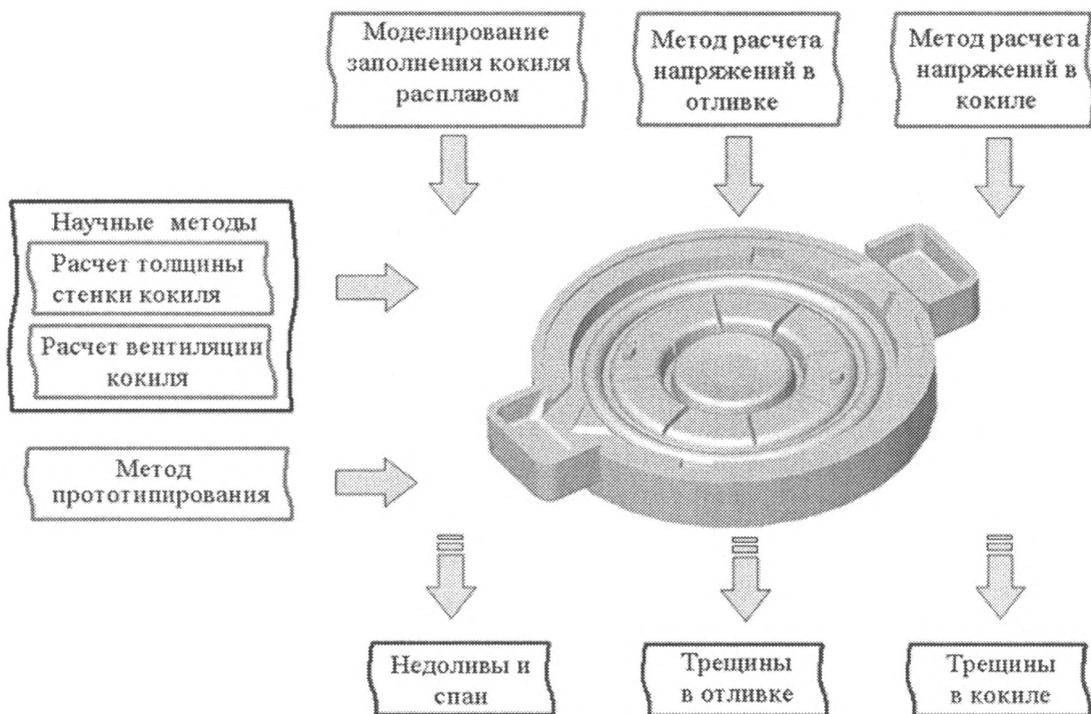


Рис. 2. Классификация методов для проектирования кокильной оснастки

никовой системы, вентиляции кокиля и другие методики расчетов, ставшие уже классическими. Следует отметить, что перечисленные выше методики расчетов практически не связаны с геометрией кокиля и отливки и поэтому лишь на качественном уровне в общих чертах определяют выбор конструкции кокильной оснастки.

Наиболее развит в заводской практике метод прототипирования, который<sup>6</sup> позволяет, используя аналоги, выбирать тип и конструкцию литниковой системы и кокиля. Этот метод также имеет определенные ограничения, так как конфигурации отливок могут очень сильно отличаться и найти удовлетворительный аналог бывает довольно слож-

но. Часто даже для двух схожих отливок требуются две принципиально различные компоновки кокиля. К тому же производственные литниковые системы нередко далеки от оптимальных и их использование в качестве типового варианта приводит к масштабированию ошибок, допущенных при их проектировании. Альтернативой этим подходам, а в ряде случаев их дополнением являются численные методы компьютерного моделирования, позволяющие рассчитывать динамику заполнения формы, а также процессы формирования напряжений и деформаций в кокиле и отливке. Из рисунка видно, что методы заполнения кокиля дают возможность анализировать вероятность образования таких литейных дефектов, как недоливы и спай, а методы расчета напряжений — вероятность образования трещин в отливке и кокиле. Эти методы позволяют уже на стадии разработки оценить конструкцию кокильной оснастки и выделить перспективные варианты для данной отливки.

На рис. 3 показана структурная схема САПР кокильной оснастки, которую мы назвали САП-КО-1 (система автоматизированного проектирования кокильной оснастки). Как видно из рисунка, она включает CAD-систему построения геометрической твердотельной модели, системы моделирования заполнения и кристаллизации металла («ПроЛит-1.0»), компьютерную систему для расчета напряжений и деформаций в кокиле, а также надстроечный модуль, позволяющий выбирать и оптимизировать конструкцию кокиля.

Конкретизируя представленную схему, на основании анализа существующих методик и подходов к проектированию оснастки был предложен ряд алгоритмов, объединяющих в себе как классические методики, так и методы моделирования, позволяющих производить оптимизацию конструкции литниковой системы и кокильной оснастки на различных этапах разработки технологии кокильных отливок.

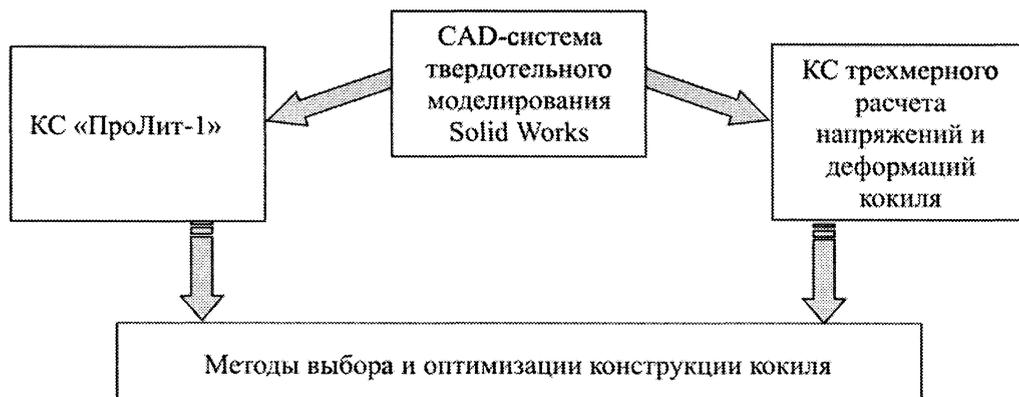


Рис. 3. Структурная схема системы автоматизированного проектирования кокильной оснастки

На рис. 4 представлен алгоритм выбора варианта литниковой системы для кокильной отливки. На первом этапе с помощью CAD-системы проектируют 3-D геометрию отливки [8]. Для отливки определяют несколько вариантов мест подвода, которые и служат основой для построения литниковой системы. Для проектирования литниковой системы используется метод прототипирования, а для наиболее простых случаев — методика расчета площади сечений Озанна—Диттерта. Таким образом, на первом этапе формируется геометрия N литниковых систем. На втором этапе для системы «отливка — литниковая система» проводится моделирование полей скоростей и температур. С помощью поля скоростей анализируются направления гидродинамических потоков, а также динамика заполнения литниковой системы и отливки. На основе расчетного поля температур анализируются места возможных перегревов, а также переохлаждений, приводящих к образованию дефектов типа «недолив». Кроме того, проводится анализ возможного пересечения гидродинамических потоков и, как след-

ствие, оценивается вероятность образования дефектов типа «спай». На втором этапе выполняются блоки алгоритмов 3—5. Те литниковые системы, для которых существует высокая вероятность образования недоливов, отбрасываются. В дальнейшем они модернизируются и могут быть повторно пропущены через этап 2.

После анализа процесса заполнения системы «отливка — литник» проводятся моделирование и расчет напряжений и деформаций в отливке (блок 6). На основе этих данных выполняется оценка вероятности образования трещин в отливке. Если высока вероятность образования трещин, то литниковая система, соответствующая этому варианту, отбрасывается и осуществляется дальнейший перебор вариантов.

Таким образом, представленная алгоритмическая схема позволяет системно анализировать литниковые системы для кокильных отливок и предлагать перспективные варианты для дальнейшей разработки кокиля.

На последующих этапах проектирования технологии кокильной отливки, непосредственно

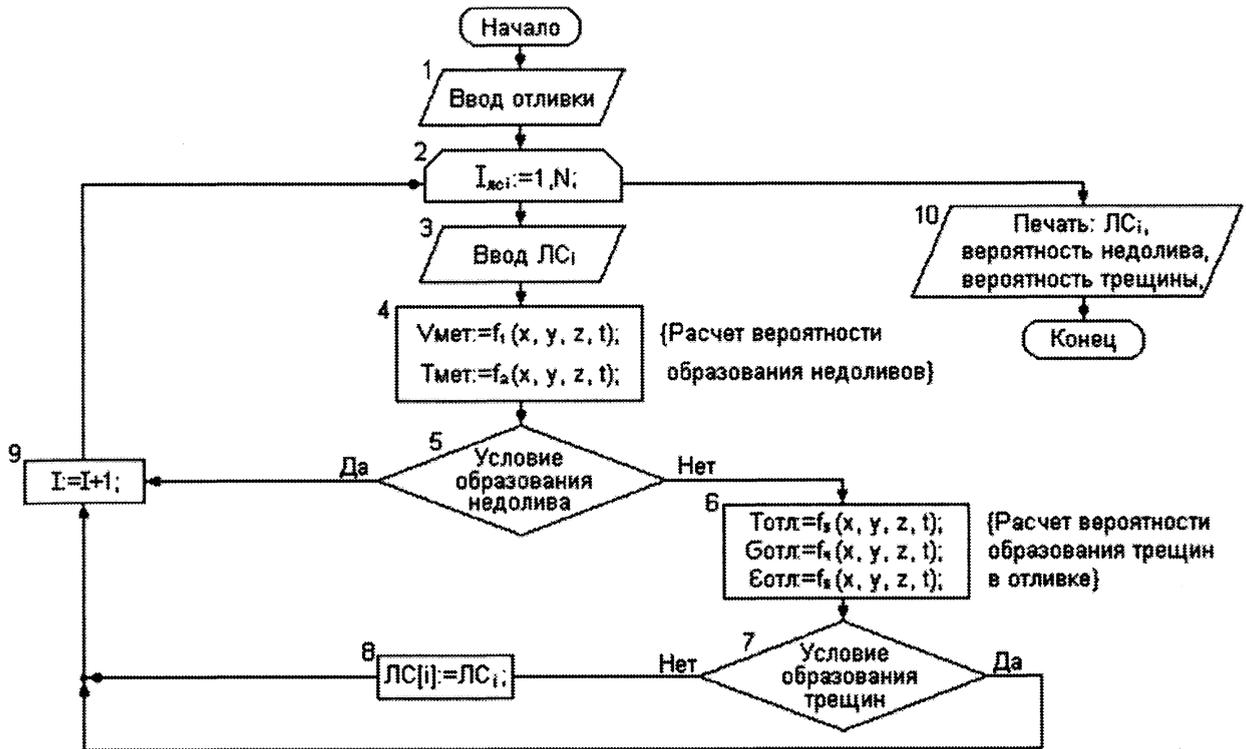


Рис. 4. Алгоритм выбора варианта литниковой системы для кокильной отливки

связанных с разработкой конструкции кокильной оснастки, используется алгоритм выбора конструкции кокиля (рис. 5). На этой стадии анализируются различные варианты кокильной оснастки на основе расчетов температурного поля кокиля, поля напряжений и деформаций кокиля. На первом этапе для заданной отливки разрабатывается N вариантов компоновки кокиля. Далее на втором этапе для каждого варианта кокиля производится перебор перспективных вариантов литниковых систем, полученных в ходе выполнения алгоритма, показанного на рис. 4. Для каждой комбинации «кокиль – литниковая система» проводятся повторные расчеты возможности образования недоливов и трещин в отливке и расчет вероятности образования трещин в кокиле. Основными критериями при выборе кокиля являются критические значения предела прочности с учетом марки сплава кокиля, а также наличие различных участков перегрева, снижающих стойкость кокильной оснастки. Таким образом, в результате выполнения этого алгоритма выбираются оптимальные варианты кокильной оснастки как по литниковой системе, так и конструкции кокиля.

При проектировании кокильной оснастки на конечной стадии возможен еще один алгоритм, связанный с оптимизацией расхода металла на литниковую систему и оптимизацию массы кокиля (рис. 6). Перспективные комбинации «кокиль – литниковая система», выделенные на ранних стадиях проектирования, рассматриваются с точки зрения минимизации массы литниковой системы

и кокиля, но не в ущерб качеству отливок и стойкости кокильной оснастки. Для этого, используя возможности САД-системы по определению объема 3-D модели, определяется масса литниковой системы и кокиля. Полученный массив данных сортируют по массе и производится выбор оптимального сочетания. Далее следует этап экспериментального апробирования полученного варианта и в случае неудовлетворительного варианта – внесение корректировки в конструкцию и запуск алгоритмов № 1–2.

Для системного анализа различных вариантов кокиля необходимо и применение методов оптимизации (см. нижний блок рис. 3). Моделирование процесса заполнения кокиля и моделирование напряженного состояния кокиля и отливки могут привести к ситуации, при которой необходимо критериально оценить, какой из рассчитанных вариантов лучше. В связи с этим предлагаются следующие критерии, позволяющие выбрать лучший вариант кокильной оснастки:

$$\sum_{i=1}^n V_i^{\text{отл}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $V_i^{\text{отл}}$  – объем незаполненных расплавом  $i$ -сеточных элементов, принадлежащих воздуху в форме;

$$\sum_{i=1}^k N_i^{\text{отл}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

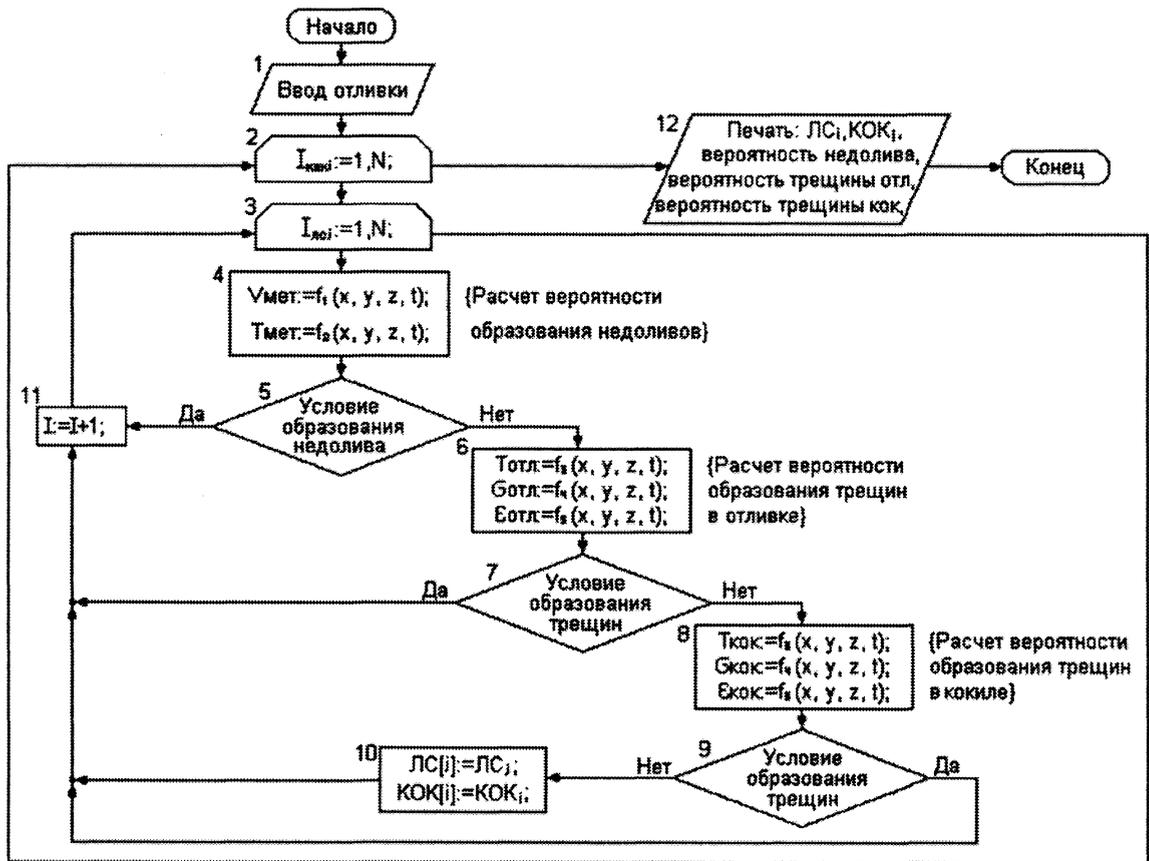


Рис. 5. Алгоритм выбора конструкции кокиля

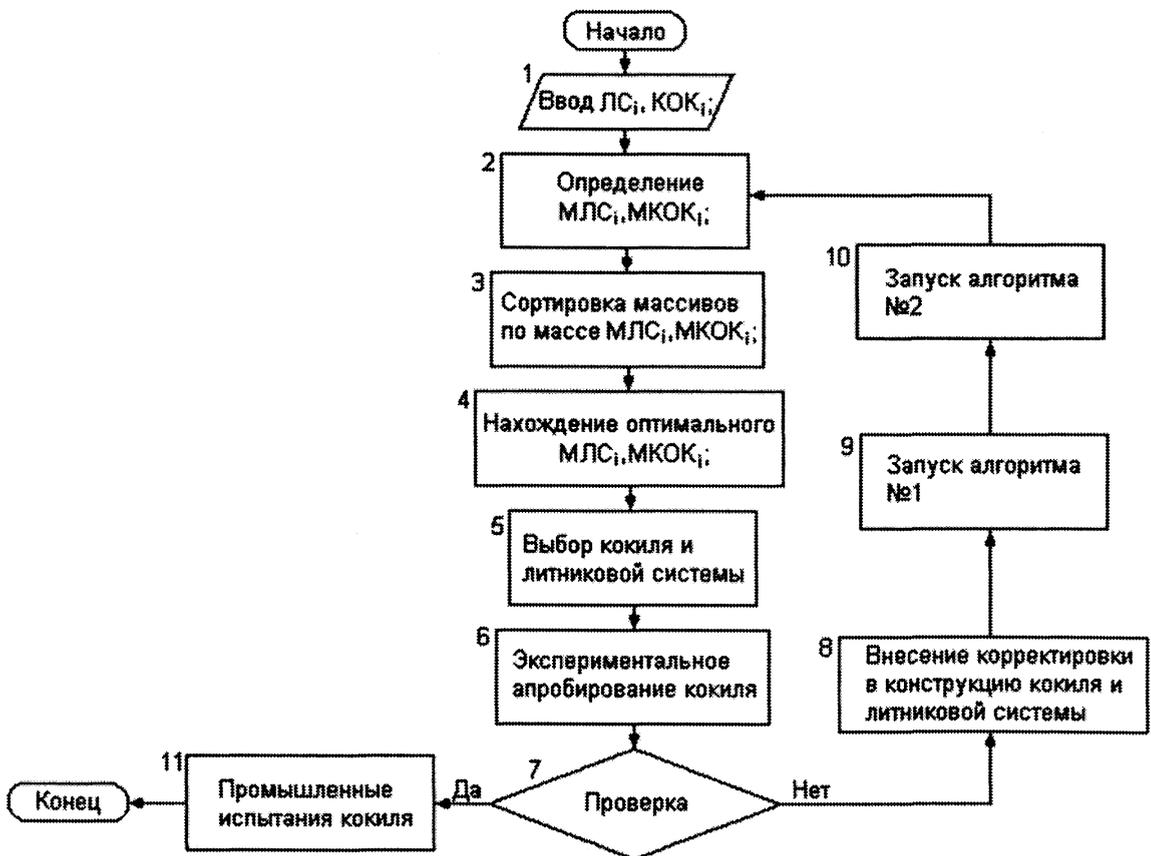


Рис. 6. Алгоритм оптимизации кокиля по массе литниковой системы и кокиля

где  $N_i^{\text{отл}}$  — объем  $i$ -сеточных элементов отливки, для которых выполняется условие:

$$\sigma_i^{\text{отл}} > \sigma_{\text{кр}}^{\text{отл}},$$

где  $\sigma_i^{\text{отл}}$  — термические напряжения для  $i$ -сеточного элемента отливки;  $\sigma_{\text{кр}}^{\text{отл}}$  — критические значения напряжений материала отливки;

$$\sum_{i=1}^l N_i^{\text{кокиль}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $N_i^{\text{кокиль}}$  — объем  $i$ -сеточных элементов кокиля, для которых выполняется условие:

$$\sigma_i^{\text{кокиль}} > \sigma_{\text{кр}}^{\text{кокиль}},$$

где  $\sigma_i^{\text{кокиль}}$  — термические напряжения для  $i$ -сеточного элемента кокиля;  $\sigma_{\text{кр}}^{\text{кокиль}}$  — критические значения напряжений материала кокиля;

$$\sum_{i=1}^r V_i^{\text{лс}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $V_i^{\text{лс}}$  — объем  $i$ -сеточных элементов, принадлежащих литниковой системе.

Интегральный критерий для выбора оптимальной кокильной оснастки можно определить как объем пространства конструкции «отливка — литниковая система — кокиль», который имеет минимум возможных дефектов. Они могут проявиться в технологическом процессе, используя конкретную кокильную оснастку:

$$\sum_{i=1}^n V_i^{\text{отл}} + \sum_{i=1}^k N_i^{\text{отл}} + \sum_{i=1}^l N_i^{\text{кокиль}} + \sum_{i=1}^r V_i^{\text{лс}} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Критерий (5) может быть использован для выбора оптимальной конструкции кокильной оснастки среди разрабатываемых вариантов на этапе проектирования. Для вычисления выражения (5) необходимо проводить численный анализ процессов заполнения металлом кокиля и расчеты напряжений в отливке и кокиле с использованием сеточных методов, т.е. предлагаемые критерии

ориентированы на сеточные методы расчета технологического процесса.

Таким образом, разработанные алгоритмы позволяют проводить оптимизацию конструкции литниковой системы и кокильной оснастки на различных стадиях процесса проектирования. При этом за счет объединения в них классических методик расчетов и подходов к конструированию оснастки, а также методов математического моделирования достигается возможность точного и эффективного конструирования оснастки. При этом все варианты, построенные по классическим методикам, проходят этап моделирования полей температур и напряжений, благодаря чему отсеиваются ошибочные и малоэффективные с точки зрения литья в кокиль варианты. Кроме того, для кокилей, выбранных на основе приведенных алгоритмов (рис. 4–6), определяют вариант с минимально-достаточной литниковой системой и минимальной массой кокиля, что обеспечивает энергосбережение при проектировании кокильной оснастки.

### Литература

1. Чичко А.Н., Матюшинец Т.В., Марков Л.В. Общая алгоритмическая схема процесса проектирования кокильной оснастки // *Литье и металлургия*. 2006. №1. С. 34–37.
2. Чичко А.Н., Матюшинец Т.В. О проблемах разработки САПР для проектирования кокильной оснастки // *Литье и металлургия*. 2006. №3. С. 121–124.
3. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Комплекс программных средств «ПроЛит» для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов // *Программные продукты и системы*. 2002. №4. С. 47–48.
4. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // *Докл. НАН Беларуси*. 2001. Т.45. №4. С.110–114.
5. Чичко А. Н., Марков Л. В. Расчет динамики изменения температур при заполнении металлической формы // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. Ч.1. С. 57–63.
6. Чичко А. Н., Марков Л. В. Математическое моделирование термонапряженного состояния кокиля с целью повышения его стойкости // *Литье и металлургия*. 2005. № 1. С. 70–75.
7. Чичко А. Н., Марков Л. В. Моделирование динамики изменения температур в отливке и форме при варьировании различных теплофизических характеристик кокильных покрытий // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. Ч.1. С. 52–56.
8. Чичко А.Н., Матюшинец Т.В., Марков Л.В. Алгоритмизация компьютерного проектирования литейных деталей с помощью САД-систем // *Литье и металлургия*. 2005. №4. С. 35–37.