

<sup>1</sup>О. В. Акимов, д-р техн. наук<sup>1</sup>О. А. Чибичик<sup>1</sup>А. В. Редькина

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина  
e-mail: [litvo11@kpi.kharkov.ua](mailto:litvo11@kpi.kharkov.ua)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ РОТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Ключові слова:** *електродвигун, тяговий привод, тягові характеристики, ротор, заливка*

**Анотація.** *Проаналізовано чинники, що істотно впливають на якість заповнення сот при заливці в кокілях роторів електродвигунів тягового приводу, і розв'язана задача оптимізації технологічних режимів заливки. Застосування даних режимів у практиці заливки роторів дозволяє звести до мінімуму ймовірність утворення внутрішньої пористості, забезпечуючи цим самим кращі тягові характеристики.*

### Введение

Оптимизационное проектирование деталей и узлов энергетического оборудования, имеющее целью определение таких конструктивных параметров, которые обеспечивали бы заданный комплекс высоких эксплуатационных свойств, не всегда является надежной гарантией обеспечения данных свойств в реальных условиях эксплуатации. Причиной этого являются технологические ограничения, а зачастую и полная невозможность выполнения заложенных конструкторами требований к деталям машин. Такие ограничения связаны, в первую очередь, с недостаточно высоким уровнем развития технологий изготовления деталей машин, особенно в том случае, если предполагается использование технологий литейного производства. Несоответствие требований по качеству литых заготовок, из которых путем механической обработки получают готовые детали энергетического оборудования, переносится на саму деталь, в итоге страдают эксплуатационные показатели, не соответствующие фактически тем, которые закладывались конструкторами при проектировании машины. Поэтому актуальными представляются исследования, посвященные оптимизации технологических процессов литья деталей энергетического машиностроения. Целью таких исследований является определение технологических режимов литья, которые сводили бы к минимуму расхождение в фактических и закладываемых конструкторами на этапе проектирования эксплуатационных характеристик энергетического оборудования.

### Анализ литературных данных и постановка проблемы

Решение сформулированной задачи напрямую связано с вопросами качества продукции, являющейся краеугольным камнем в условиях современного промышленного производства, основная материальная часть которого уже находится в состоянии физического износа [1 – 4]. Учитывая, что отрасль энергетического машиностроения традиционно является одной из ключевых в экономике Украины, качество всех технологических процессов, применяемых в производстве, должно быть соответствующим. При этом принципиально, что учет технологических возможностей производства – обязательное условие при освоении новых изделий или модернизации существующих. В контексте этого интересны работы, посвященные проблемам увязок в конструкторско-технологической подготовке производства для деталей энергетических установок [5 – 8]. Не исключением являются и технологические процессы изготовления роторов тягового электропривода. Одна из технологических операций при изготовлении ротора – это заливка пазов предварительно нагретого сердечника ротора расплавленным алюминием, выполняемая в кокиле. От качества выполнения этой технологической операции в значительной степени зависят эксплуатационные показатели привода, однако обеспечение высокого качества как раз и является серьезной проблемой, подлежащей всестороннему исследованию.

### Описание технологического процесса изготовления роторов

Технологические процессы изготовления роторов для тягового электропривода подвижного состава включают следующие операции. Перед заливкой пазы сердечника ротора предварительно про-

греваются. Установку короткозамкнутой обмотки с замыкающими кольцами можно выполнять несколькими способами:

1. Помещая сердечник ротора вместе с заготовками в виде шайб из токопроводящего материала, установленными с двух его сторон, в пресс-форму, нагревая до температуры 350 – 400 °С и прикладывая усилие для вдавливания вдоль оси ротора в пазы его сердечника;

2. Устанавливая на сердечник ротора с пазами втулку из токопроводящего материала и осуществляя ее вдавливание в пазы в холодном состоянии до их полного заполнения токопроводящим материалом, например, посредством закатки с последующим удалением оставшегося на поверхности сердечника материала.

Для контроля качества собранного электродвигателя могут измеряться;

- сопротивление изоляции обмотки статора относительно станины;
- сопротивление обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;
- испытание изоляции обмоток относительно станины и между обмотками на электрическую прочность;
- испытание межвитковой изоляции обмоток на электрическую прочность, причем при испытании собранного электродвигателя необходимо определить ток и потери холостого хода, ток и потери короткого замыкания.

Однако, как бы качественно ни была выполнена сборка, существует проблема, внешне далеко не очевидная, но играющая существенную роль в формировании эксплуатационных характеристик тягового электропривода, например мощности. И эта проблема носит технологическую природу, связанную с качеством заполнения расплавом алюминия сот и формирования «беличьей клетки». Поэтому для решения вопросов, связанных с повышением тяговых характеристик, необходимо решить ряд задач, связанных с разработкой оптимальных технологических режимов заливки роторов, которая выполняется в нагретых кокилях, обеспечивающих наилучшие условия питания сот расплавом и, как следствие, минимальный объем пористости в залитой «беличьей клетке». Предварять решение этой, по сути оптимизационной, задачи должно исследование процессов фильтрационного питания как основы качественного заполнения сот.

### **Фильтрационное питание как фактор, влияющий на качество заполнения сот**

Усадочные дефекты и пористость отливок из алюминия, заливаемого в кокиль, образуются, как правило, на конечном этапе затвердевания отливки. С точки зрения борьбы с этими дефектами наиболее актуальным является исследование процесса фильтрационного питания. Формирующийся кристаллический каркас при затвердевании алюминия в сотах оказывает повышенное сопротивление продвижению питающего расплава. Фильтрация расплава сквозь твердожидкую зону осуществляется на всех этапах затвердевания отливки, поэтому проницаемость кристаллического каркаса играет существенную роль в процессе фильтрационного питания отливки. После образования связанного кристаллического каркаса дальнейшее снижение температуры и соответствующее утолщение элементов дендритной структуры за счет выделяющейся твердой фазы приводят к непрерывному уменьшению его проницаемости. При одинаковой площади сечения жидкой фазы меньшую проницаемость будет иметь кристаллический каркас того сплава, который образует более разветвленную двухфазную зону с большим количеством междендритных каналов. Среди факторов, влияющих на фильтрационное питание затвердевающего в сотах алюминия, основными являются: скорость кристаллизации, коэффициент усадки, ликвационные явления, наличие неметаллических включений в расплаве, температура заливки, газовыделение из расплава.

Влияние скорости кристаллизации на процесс фильтрационного питания связано как с проницаемостью кристаллического каркаса, так и со временем затвердевания. При большой скорости кристаллизации этого времени может оказаться недостаточно для поступления в отливку требуемого количества питающего расплава путем фильтрации, в результате чего зона питания сократится. Поэтому лучше питается отливка с низкой интенсивностью охлаждения.

Роль скорости кристаллизации следует рассматривать в комплексе с коэффициентом усадки при затвердевании и вязкостью сплава, поскольку увеличение последних приводит к увеличению расхода питающей жидкости и сопротивления связанных дендритов ее перемещению, ухудшая тем самым условия питания отливки; при нулевом их значении влияние скорости кристаллизации на процесс питания также прекращается. Облегчает питание измельчение кристаллов структуры металла или сплава.

Процессу фильтрационного питания содействуют ликвационные явления, в результате которых под действием возникающих капиллярных сил в двухфазной области развиваются циркуляционные потоки, облегчающие поступление питающего расплава к фронту кристаллизации.

Неметаллические включения, особенно не смачиваемые расплавом, способны закупоривать узкие и извилистые междендритные каналы, затрудняют фильтрационное питание отливок. Связывание несмачиваемых примесей смачиваемыми ослабляет это действие.

Положительное влияние на фильтрационное питание оказывает повышение температуры заливки сплавов, что можно объяснить переводом примесей в растворенное состояние и повышением физической однородности расплава. При этом следует учитывать, что положительное влияние фактора перегрева имеет определенный предел, сверх которого возможно чрезмерное газонасыщение расплава или окисление металла.

Выделение газов из металла внутри двухфазной области затвердевающей отливки препятствует ее фильтрационному питанию. Борьбу с этим явлением, характерным в первую очередь для алюминиевых сплавов, можно вести путем снижения в расплаве количества водорода и неметаллических включений, повышения давления и интенсивности теплоотвода, регулирования состава сплава с целью сокращения температурного интервала кристаллизации и повышения критического газосодержания.

### **Технологические факторы, регулирующие процесс фильтрационного питания**

Среди таких факторов следует выделить термовременную обработку расплава, вибрацию кокиля в процессе заливки, принудительное формирование концентрированной усадочной раковины.

Температурная обработка жидких алюминиевых сплавов, включающая перегрев до 800-1000 °С, оказывает существенное положительное влияние на структуру и особенно механические свойства литого металла. В условиях недостаточного питания термовременная обработка расплава положительно влияет на герметичность отливки и стабилизирует прочностные свойства литого металла при изменении условий питания.

Влияние вибрации проявляется в зависимости от конструктивных условий формирования отливки: в какой тип кокиля происходит заливка алюминия – в незамкнутый кокиль или в замкнутый кокиль.

При литье в незамкнутый кокиль происходят следующие процессы. Пока весь металл находится в жидком состоянии (при заливке или сразу после нее), он не может колебаться по всему объему вместе с формой, так как при выбранной конструкции кокиля инерционные силы гасят вибрацию в пристеночном слое. По мере затвердевания образующаяся твердая корочка и прилегающая к ней достаточно прочная часть двухфазной зоны увлекаются формой и также начинают вибрировать, тогда как центральная область отливки под действием сил инерции продолжает пребывать в относительно спокойном состоянии. Влияние вибрации на эту область может выражаться только перемешиванием расплава, что благоприятствует объемному затвердеванию. Однако и после образования в поверхностном слое центральной области прочного кристаллического каркаса этот слой не сразу присоединяется к вибрирующей оболочке, поскольку связь между ними постоянно разрушается непрерывными возвратно-поступательными относительными перемещениями. Из-за неровности трущихся поверхностей ломка и перераспределение кристаллов в зоне скольжения наружных и внутренних слоев продолжаются до тех пор, пока повышение концентрации твердой фазы не приведет к их прочному сцеплению. После этого к вибрирующей наружной части отливки присоединяется очередной слой центральной области и далее все повторяется. Интенсивное разрушение и перераспределение кристаллов в зонах скольжения существенно сказывается на их составе и структуре, в результате чего на месте этих зон образуются ликвационные полосы. Повышение параметров вибрации интенсифицирует развитие описанных процессов и формирование полосчатого строения отливки.

При литье в замкнутый кокиль сразу после заливки весь расплав начинает вибрировать вместе с формой и даже с увеличением амплитуды колебаний ликвационные полосы не появляются, что свидетельствует об отсутствии значительных относительных перемещений между слоями затвердевающей отливки. В данных условиях, особенно после образования наружной твердой корочки, для создания таких перемещений необходимо преодолеть действующее снизу атмосферное давление и объемную прочность расплава, а также вызвать местные разрывы.

Принудительное формирование концентрированной усадочной раковины осуществляется следующим образом. В отливку помещают полое тело (колокольчик) с газонепроницаемыми стенками, сообщающиеся через трубку с атмосферой или источником газа повышенного давления. После заливки поступающий в колокольчик газ вытесняет расплав для компенсации усадки отливки. Прибыль становится ненужной либо может быть значительно уменьшена. Чтобы сохранить металл в колокольчике жидким до окончательного затвердевания отливки, на его выходе устанавливают диафрагму из теплоизоляционного материала. Достичь такой же цели можно и без колокольчика, например, установкой в полость формы проволоки со скруткой на конце. В этих случаях доступ атмосферного давления внутрь

отливки исключается, а причиной образования концентрированных раковин является то, что указанные инородные тела выполняют роль крупных несмачиваемых включений, на которых и происходит разрыв растягиваемого усадкой расплава.

### Математическое моделирование и оптимизация технологических режимов заливки роторов

Согласно предварительным исследованиям, было установлено, что существенными факторами, влияющими на формирование внутренней пористости по причине некачественного фильтрационного питания, являются температура металла перед началом разливки, длительность заливки кокиля и время вибрации кокиля. Поэтому данные факторы могут быть приняты за входные переменные для построения математической модели, связывающей технологические режимы заливки роторов, с выходной переменной процесса (целевая функция). Обоснованием к выбору выходной переменной может служить следующее. Отклонение от оптимальных технологических режимов по ходу процесса неизбежно приведет к увеличению вероятности некачественного фильтрационного питания и, следовательно, к вероятности повышения внутренней пористости в «беличьей клетке». Следовательно, за целевую функцию можно принять вероятность брака залитого ротора, который квалифицируется как залитый ротор с повышенным объемом внутренней пористости. Электродвигатели с такими роторами не обеспечивают заданный уровень тяговых характеристик.

Для построения математической модели применялись методы, изложенные в работах [9 – 11].

Для выбора начальной области планирования промышленных экспериментов использовали результаты предварительных цеховых испытаний, которые показали, что после удаления литников и вскрытия доступных залитых поверхностей брак не наблюдался при следующих значениях параметров: температура металла перед началом разливки 780 – 800 °С, длительность заливки кокиля 15 – 20 с., время вибрации 5 – 7 мин.

Однако приведенные диапазоны значений технологических параметров подразумевают благоприятное действие каждого из этих факторов по отдельности, но не позволяют «вскрыть» эффекта их одновременного действия на вероятность образования брака. Это означает, что, выдерживая температурный диапазон расплава 780 – 800 °С, не известно, какое время заливки и время вибрации должно быть, чтобы обеспечить минимум вероятности образования брака. Ведь изменение температуры даже в указанном диапазоне, будет способствовать смещению значений других параметров от считающихся в цехе оптимальными, в сторону больших или меньших значений.

Применением описанных в работах [9 – 11] методов получена математическая модель вида

$$P = 0,3008 - 0,13T^2 + 0,0195\tau_{зал}^2 - 0,1081\tau_{виб}^2,$$

где  $T$  – температура расплава;  $\tau_{зал}$  – время заливки;  $\tau_{виб}$  – время вибрации кокиля.

На рис. 1 для примера показаны результаты численного моделирования, позволяющие увидеть одновременное влияние комплекса технологических факторов (технологические режимы заливки роторов) на качество заливки. Результаты показаны в виде поверхности отклика – значения вероятности качественной заливки в зависимости от её времени и времени вибрации для различных фиксированных значений температуры заливки.

Из рис. 1 видно, что при температуре металла перед началом разливки 780 °С (что соответствует температуре перегрева металла) и при любом фиксированном значении времени вибрации с увеличением времени за-

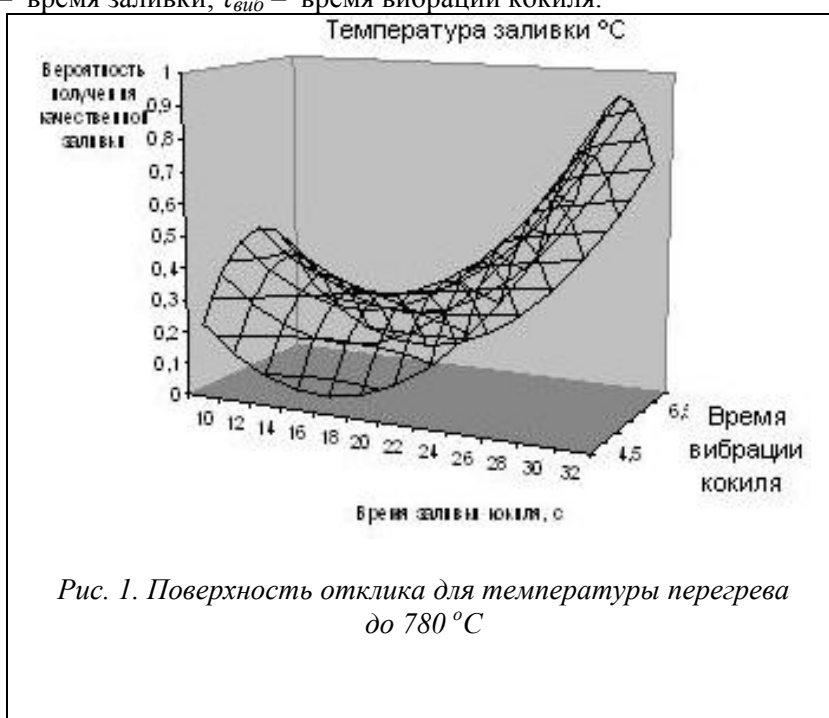


Рис. 1. Поверхность отклика для температуры перегрева до 780 °С

ливки до некоторого предела (в районе 18 с) вероятность получения качественной заливки снижается. При увеличении времени заливки выше этого предела вероятность получения качественной заливки увеличивается, достигая максимума порядка 80 % при времени вибрации примерно 6 мин.

Влияние времени вибрации противоположно влиянию времени заливки – худшее качество заливки приходится на меньшее и большее время вибрации, наилучший же эффект заливки наблюдается в области средних значений.

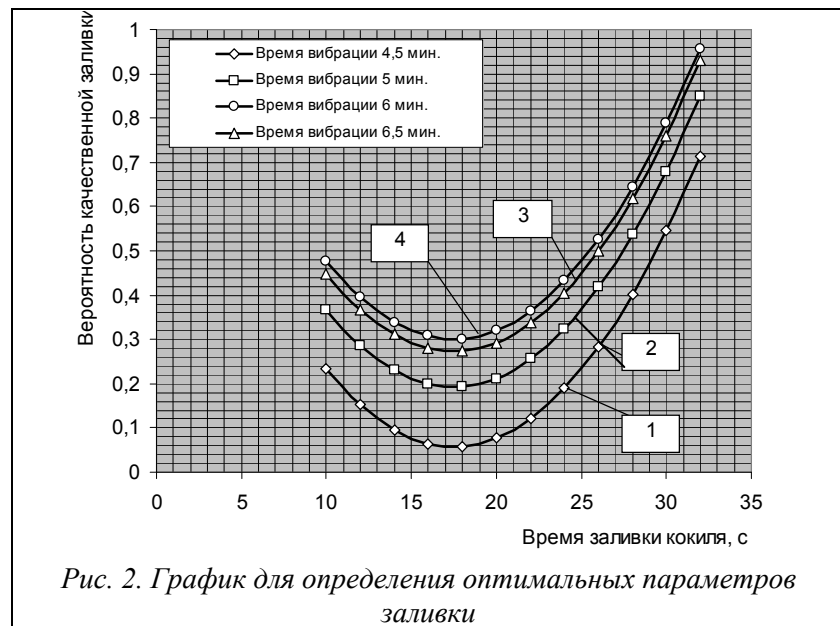


Рис. 2. График для определения оптимальных параметров заливки

На поверхности отклика это выражается в её вогнутости при фиксированных значениях времени вибрации и выпуклости при фиксированных значениях времени заливки кокиля. Из этого можно сделать вывод, что увеличение температуры металла перед началом разливки неоднозначно влияет на её качество. В рассмотренном температурном диапазоне наилучшим следует считать температуры в средней части указанного температурного диапазона. Уменьшение или увеличение температуры сверх оптимального значения снижает вероятность качественной заливки. При «наложении» поверхностей отклика для различных температур металла перед началом разливки друг на друга можно увидеть оптимальную область технологических параметров, представив результаты в виде графика технологических параметров в оптимальной области при оптимальной температуре расплава при выпуске 790 °С (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что наиболее неблагоприятными режимами заливки при любом времени вибрации является время заливки от 10 до 30 с. Дальнейшее «удлинение» процесса заливки влияет положительно на её качество, но максимальный эффект достигается только при времени вибрации 6 мин. Увеличение времени вибрации не будет приводить к улучшению результатов. Это видно по «сближению» соответствующих графиков. Оптимальным временем заливки следует считать 32 с.

### Выводы

Результаты проведенных исследований могут быть положены в основу решения вопросов, связанных с повышением эксплуатационных характеристик тягового электропривода. Основными техническими решениями, благодаря которым это становится возможным, является разработка оптимальных технологических режимов заливки роторов, выполняемой в нагретых кокилях – такие режимы обеспечивают наилучшие условия питания сот расплавом и, как следствие, минимальный объем пористости в залитой «беличьей клетке».

Наиболее неблагоприятными режимами заливки при любом времени вибрации является время заливки от 10 до 30 с. Дальнейшее «удлинение» процесса заливки влияет положительно на её качество, но максимальный эффект достигается только при времени вибрации 6 мин, увеличение же времени вибрации свыше этого не приводит к улучшению результатов.

### Литература

1. Гребеников, А. Г. Качество и сертификация промышленной продукции / А. Г. Гребеников, А. К. Мяслица, В. М. Рябченко, К. Б. Трофимов, В. Я. Фролов // Учеб. пособие. - Харьков: Харьк. авиац. ин-г, 1998. – 396 с.
2. Карпов, Л. И. Инженерные методы оценки и контроля качества в серийном производстве / Л. И. Карпов, В. Г. Литвинов, В. А. Яворсий – М.: Изд-во стандартов, 1984, 216 с.
3. Шор, Я. Б. Критерии управления качества продукции / Я. Б. Шор. - М.: Знание, 1974. – 200 с.
4. Журавлев, В. А. Создание интегрированных САПР ТП литейного производства / В. А. Журавлев, С. Ж. Жалимбетов, В. В. Васькин, Н. В. Каметов // Литейное про-тво. – 1988. – №10. – С. 4 - 5

5. Акимов, О. В. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС. (Часть 1. Рабочие характеристики.) / О. В. Акимов, В. А. Петросянц, В. А. Солошенко // Вестн. Харьков. политехн. ун-та. – 1999. – Вып.30. – С. 48 - 51

6. Акимов, О. В. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС. (Часть 2. Прочностные характеристики.) / О. В. Акимов, В. А. Петросянц, В. А. Солошенко // Вестн. Харьков. политехн. ун-та. – 1999. – Вып.46. – С. 46 - 50

7. Акимов, О. В. Анализ погрешностей формообразования отливок колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС на этапе изготовления их восковых моделей / О. В. Акимов, В. А. Солошенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – №3. – С. 11 – 18

8. Акимов, О. В. Применение методов компьютерно-интегрированного ресурсного проектирования к литым деталям ДВС по критерию эксплуатационных характеристик на примере колеса турбины турбокомпрессора / О. В. Акимов, А. П. Марченко, В. А. Петросянц // Вісн. нац. техн. уні-ту «ХП». – 2008. – №9. – С. 3 – 15.

9. Дёмин, Д. А. Обработка экспериментальных данных и построение математической модели технологического процесса методом наименьших квадратов (МНК) / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – №3/1. – С. 47 – 50.

10. Дёмин, Д. А. Оптимизация технологических режимов / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – №2/1(20). – С. 32 – 35.

11. Ресурсосберегающие технологии в литейном производстве: справочное пособие / Д. А. Дёмин, Е. Б. Дёмина, О.В. Акимов и др.; под общ. Ред. Д. А. Дёмина. – 1 изд. – Х.: Технолог. центр, 2012. – 320 с.

Поступила в редакцию 16.10.13

<sup>1</sup>Б. П. Таран, канд. техн. наук

<sup>1</sup>В. В. Малахов

<sup>1</sup>К. О. Молодов

e-mail: [molodov2009@yandex.ru](mailto:molodov2009@yandex.ru)

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

УДК 621.74

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОКИЛЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Ключові слова:** енергетичне машинобудування, прототипування, кокіль, розмірний ланцюг

**Анотація.** *Описаний приклад застосування комплексного підходу до проектування оснащення для виготовлення відповідальних складнопрофільних литих деталей енергетичного машинобудування: моделей, стрижневих ящиків, кокілів. Показано, що застосування методів оптимізації припусків на основі побудови та аналізу розмірних ланцюгів для проектування робочої порожнини кокіля в поєднанні з технологією швидкого прототипування забезпечують можливість отримання високоякісних відповідальних литих деталей. Наведено результати експериментальних досліджень термостійкості кокілів зі вставками з псевдославу Fe - Si.*

### Введение

На современном этапе развития энергетического машиностроения часто возникают проблемы создания гибких технологических процессов производства деталей и машин с целью получения готовых узлов и механизмов в кратчайшие сроки. Для производства литых деталей сложной конфигурации с внутренними полостями требуется проектирование и изготовление модельной оснастки, включающие как саму модель, так и стержневые ящики. Выполнение такой работы осуществляется с использованием сложных процессов механической обработки и точной лекальной доводки, что ведет к большому материальным и финансовым затратам, а самое главное к длительности выполнения данных работ. В этой связи представляет практический интерес использование современного метода быстрого прототипирования, позволяющего по заранее спроектированной 3D – модели выращивать с помощью установок лазерного спекания из фотополимерной смолы готовые модели.

### Анализ литературных данных и постановка проблемы

Технология быстрого прототипирования Rapid Prototyping быстро получила признание среди конструкторов и технологов, занимающихся вопросами разработки литейной оснастки [1]. Внедрение

© Б. П. Таран, В. В. Малахов, К. О. Молодов, 2013