

16. Chien-Ching, Ma. Analytical exact solutions of heat conduction problems for anisotropic multi-layered media [Текст] / Chien-Ching Ma, Shin-Wen Chang // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. — 2004. — Vol. 47. — P. 1643–1655.
17. Ozisik, M. N. Heat Conduction Wiley [Текст] / M. N. Ozisik // New York, 1993.
18. Bejan, A. Heat Transfer [Текст] / A. Bejan. — John Wiley & Sons, New York, 1993.
19. Dryden, I. G. C. The Efficient Use of Energy [Текст] / I. G. C. Dryden. — Ed. 2. — Butterworth Scientific, Oxford, 1982.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОБОГРЕВАЕМОГО ПОЛА

Предложены алгоритмы и программные решения, которые дают возможность обеспечивать оптимальные режимы подвода энергии к нагревателям многослойного структурированного пола в помещениях с учетом структурных и теплофизических параметров конструкции пола, а также опосредованно внешних климатических факторов. Применение результатов исследования в производственной практике специализированных комплексов позволит значительно повысить эффективность использования энергоресурсов традиционных, нетрадиционных и возобновляемых источников.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, энергопоток, многослойная структура, микроклимат, алгоритм.

Романченко Микола Анастасійович, кандидат технічних наук, професор, кафедра інтегрованої електротехнології та процесів,

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, Україна.

Слесаренко Анатолій Павлович, доктор фізико-математичних наук, професор, ведучий науковий співробітник, Лауреат Державної премії України, Інститут проблем машинобудування ім. А. Н. Підгорного НАН України, Україна.

Сорока Олександр Степанович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра мікроелектроніки, електронних приладів і пристроїв, Харківський Національний університет радіоелектроніки, Україна.

Романченко Николай Анастасиевич, кандидат технических наук, профессор, кафедра интегрированных электротехнологий и процессов, Харьковский Национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенка, Украина.

Слесаренко Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, Лауреат Государственной премии Украины, Ведущий научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Украина.

Сорока Александр Степанович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра микроэлектроники, электронных приборов и устройств, Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, Украина.

Romanchenko Nickolay, Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture, Ukraine.

Slesarenko Anatoliy, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Ukraine.

Soroka Alexander, Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine

УДК 621.74

**Пономаренко О. И.,
Тренёв Н. С.**

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАК РЕЗЕРВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОРШНЕЙ ДВС

В статье предложено использование процедуры распознавания образов для описания локализации дефектов в литых деталях «поршень» для ДВС. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса заполнения кокиля и кристаллизации сплава для усовершенствованной технологии литья, предполагающей применение термоизолирующих покрытий кокиля. Результаты компьютерного моделирования могут быть использованы для формализации процесса описания локализации дефектов в поршнях.

Ключевые слова: литая деталь, кокиль, компьютерное моделирование, термоизолирующее покрытие.

1. Введение

Высокая конкурентная борьба между производителями запчастей и комплектующих для двигателей внутреннего сгорания выводит на первый план необходимость решения вопросов, связанных с повышением качества деталей. В первую очередь, речь идет о заготовительном производстве — ведь от того, насколько качественно выполнена заготовка, зависит формирование свойств и готовых деталей. Под заготовкой в данном случае понимается отливка или литая деталь. Так как литые поршни изготавливаются в кокилях, очень важно

отрабатывать технологические процессы литья и совершенствовать сами конструкции кокилей с целью предупреждения внутренних литых дефектов. Задача в такой постановке должна рассматриваться как составная часть разработки общих мероприятий по техническому перевооружению литейных производств [1].

Сегодня в практике проектирования литых деталей применяется ряд специализированных программных пакетов трехмерного проектирования, а для решения задач по моделированию процессов кристаллизации используется российская программа LVM Flow. Учитывая, что выбор исходных параметров для компьютерного

моделирования осуществляется непосредственно конструктором или технологом на основе личного опыта, бывает проблематичным заранее с большой степенью достоверности определить правильность выбранных технических решений. Поэтому вопросы, связанные с формализацией процессов локализации внутренних дефектов литейного происхождения, должны обязательно решаться на этапе компьютерного моделирования процесса кристаллизации литой детали [2–5].

2. Постановка задачи исследования

Целью исследования является компьютерное моделирование процесса заполнения кокиля расплавом и выявление мест дислокации внутренних дефектов. Результатом такого моделирования может быть выявление координат локализации дефектов и последующая формализация описания, на основании которой можно прогнозировать области литой детали, в которых вероятно образование дефектов при выбранной конструкции кокиля и технологических режимах литья.

3. Технологический процесс изготовления поршней

Применение методов распознавания образов для идентификации причин возникновения дефектов размерного и геометрического характера в литых поршнях впервые было предложено в работе [6]. Для реализации этого метода следует подробно проанализировать сам технологический процесс изготовления поршней. Существует два основных способа получения заготовок поршней: горячая штамповка и литье. Метод горячей штамповки обычно используется для производства поршней, к которым предъявляются особые требования по прочности. Эти поршни часто применяются в крупных дизельных двигателях, авиационных моторах и в моторах гоночных автомобилей. При этом получается плотная структура материала, не имеющая пор.

Поршни, изготавливаемые литьем, в основном получают литьем в кокиль. Этим методом производится большинство автомобильных и легких промышленных поршней. Внутренняя поверхность поршня формируется стержнем, который может быть цельным (моноклин) или состоять из 3–7 частей (клиньев). Наружная поверхность поршня формируется матрицей, образованной несколькими частями (обычно двумя), иногда еще и верхним стержнем. Собранные вместе все вышеперечисленные компоненты образуют литейную форму — кокиль.

После литья материал заготовки не обладает достаточной прочностью, твердостью и стабильностью при высоких температурах. Для улучшения структуры материала и придания необходимых механических свойств заготовку подвергают термообработке. После остывания отливки проходят этап так называемого «старения». Их помещают в печь, где нагревают до температуры примерно 520 °С, затем отливки медленно остывают вместе с печью. В зависимости от требований, предъявляемых к изделию, далее может иметь место один из двух вариантов:

1. Поршням дают остыть до комнатной температуры, отрезают литники и выпоры (прибыли) и загружают в печь при температуре около 515 °С на 4 часа. Затем поршни закаляют в кипящей воде, которая их быстро

охлаждает и замораживает в алюминии магний и медь. Это называется термической обработкой на твердый раствор, т. к. конечным результатом является твердый раствор меди и магния в алюминии.

2. После удаления из пресс-формы отливки медленно обдуваются воздухом (воздушная закалка). Это достаточно быстро их охлаждает, чтобы исключить выделение осадка и связать (заморозить) медь и магний в твердом растворе. Этот процесс называется «Воздушная закалка после пресс-формы» и позволяет снизить энергозатраты и подготовительно-наладочное время, благодаря устранению обработки на твердый раствор. Таким методом сейчас производят 80 % поршней.

При обоих вариантах обработки поршни затем подвергаются процессу старения (примерно 4 часа при температуре около 220 °С), в результате которого образуется контролируемая структура материала по всему поршню.

После термообработки поршни подвергаются механической обработке для достижения заданных геометрических параметров и различных дополнительных свойств.

Для соблюдения требуемой точности и повышения гибкости производства обработка может осуществляться на станках с числовым программным управлением.

4. Материалы для изготовления поршня

Сплавы алюминия с некоторым количеством легирующих элементов (кремний, медь, магний, никель и др.) Кремний (Si) в количестве 5–22 % придает сплаву жаропрочность, уменьшает коэффициент теплового расширения, улучшает литейные свойства, но при этом охрупчивает сплав и ухудшает обрабатываемость. Медь (Cu) 1–8 % улучшает механические свойства материала. Магний (Mg) 0,8–1,3 % придает сплаву высокomeханические характеристики, повышая предел прочности. Никель (Ni) 0,5–2 % придает сплаву жаропрочность и жаростойкость. Титан (Ti) 0,05–2 % улучшает механические свойства материала, за счет создания с алюминием интерметаллидных соединений уменьшает ползучесть. Различают три типа алюминиевых сплавов, применяемых в производстве поршней, которые отличаются главным образом содержанием кремния.

Доэвтектические сплавы. Содержание кремния ниже, чем в точке эвтектики — обычно около 9 % (для сплавов алюминий-кремний точка эвтектики 11–13 %).

Эвтектические сплавы. Содержание кремния составляет 11–13 % (в зависимости от количества других легирующих элементов).

Заэвтектические сплавы. В этих сплавах содержится значительное количество нерастворенного кремния в алюминии, что обеспечивает повышение износостойкости, но ухудшает технологические свойства. Содержание кремния может колебаться от 13 до 25 %.

В некоторых дизельных двигателях большой мощности могут быть использованы чугунные или стальные поршни или составные поршни с головкой из стали или чугуна в тех случаях, когда термические и механические нагрузки слишком велики для алюминия.

На поверхность поршней наносятся покрытия, выполняющие две главные функции: улучшение приработки поршня (наносится на юбку и изнашиваются через определенное время на этапе обкатки двигателя), улучшение механических свойств поверхности поршня (твердость,

износостойкость). Некоторые покрытия остаются на поршне на все время эксплуатации, предотвращая эрозию, растрескивание и улучшая антифрикционные свойства. Головка поршня, в особенности дизельного двигателя, иногда подвергается анодированию для уменьшения опасности растрескивания, вызываемого высокими термическими нагрузками при работе. Процесс производства поршней включает в себя получение заготовки, термообработку, механообработку, нанесение покрытий.

5. Модернизация технологии изготовления литого поршня 51-03-23 на основе результатов компьютерного моделирования

В качестве объекта исследования была выбрана конструкция кокиля и технология изготовления литых поршней на ОАО «АВТРАМАТ» (г. Харьков, Украина). Некоторые результаты моделирования термонапряженного состояния литого поршня, зависящего от конструкции кокиля и принятых технологических режимов литья, были рассмотрены в работах [7, 8]. После анализа приведенных в этих работах результатов для литого поршня модификации 51-03-23 и определения вероятности формирования в его теле усадочной пористости, было установлено, что существующая технология изготовления поршнем на ОАО «АВТРАМАТ» имеет ряд недостатков. Эти недостатки существующего технологического процесса приводят к формированию усадочной пористости и недостаточной плотности структуры сплава в ответственных местах отливки в силу слишком большой скорости кристаллизации. На основе этого было выбрано направление проведения дальнейших исследований на основе компьютерного моделирования процесса кристаллизации литого поршня. В качестве технического решения, обеспечивающего по предварительным выводам возможность регулирования процесса кристаллизации, было принято использование теплоизолирующего кожуха, свойства которого приведены в табл. 1, и предназначенного для поддержания сплава в жидком состоянии в течение более длительного времени.

Теплоизолирующий кожух, укрывающий кокиль, был смоделирован с помощью программы Solid Works и поршень был «пролит» с помощью пакета прикладных программ LVMFlow.

Результаты моделирования термонапряженного состояния поршня и вероятности образования усадочной пористости представлены на рис. 1.

На основе полученных результатов компьютерного моделирования было принято решение так оформлять теплоизолирующий кожух, чтобы он укрывал главным образом питающие элементы литниковой системы. В этом случае части кокиля, отвечающие за формообразование головки поршня и мест перехода ее в отно-

сительно тонкостенную «юбку», получают возможность более быстрого охлаждения за счет отсутствия в этих местах теплоизолирующего материала кожуха — это способствует реализации процесса направленной кристаллизации.

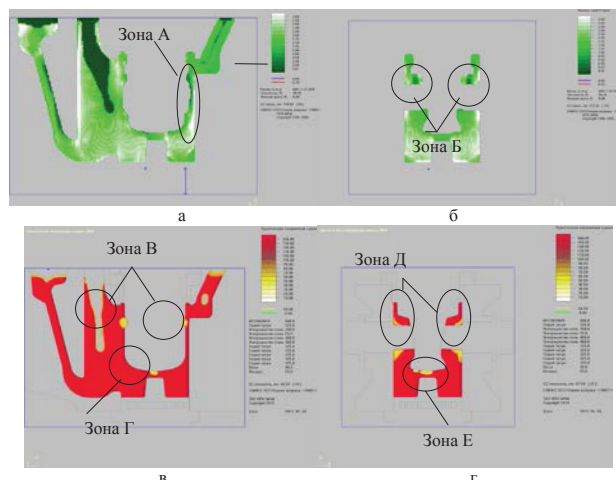


Рис. 1. Зоны внутренних дефектов: а, б — зоны вероятного образования усадочной пористости; в, г — зоны пониженной плотности сплава

Полученные результаты компьютерного моделирования позволили сделать вывод о правильности правильного технического решения — вероятность образования внутренних дефектов была сведена к минимуму и большинство их представилось возможным вывести в удаляемый части литниковой системы (рис. 2).

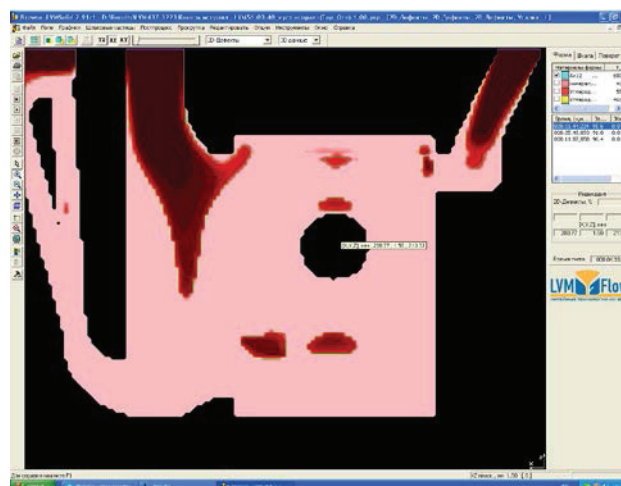


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования мест формирования внутренних дефектов

Таким образом, оказалось возможным поставить задачу о формализации процесса локализации внутренних дефектов.

Таблица 1

Свойства материала теплоизолирующего кожуха

Характеристика теплоизолирующего материала	Природа материала	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К	Прочность на сжатие кгс/см ²	Коэффициент теплового линейного расширения
Блоки и плиты из пеностекла FOAMGLAS®	Неорганическое алюмосиликатное стекло	120—160	0,045—0,06	5—20	$9 \cdot 10^{-6}$ ($\Delta L = 0,27$ мм)

6. Формализация процесса локализации внутренних дефектов

Идея применения метода распознавания образов для формализации процедуры локализации иллюстрирует рис. 3.

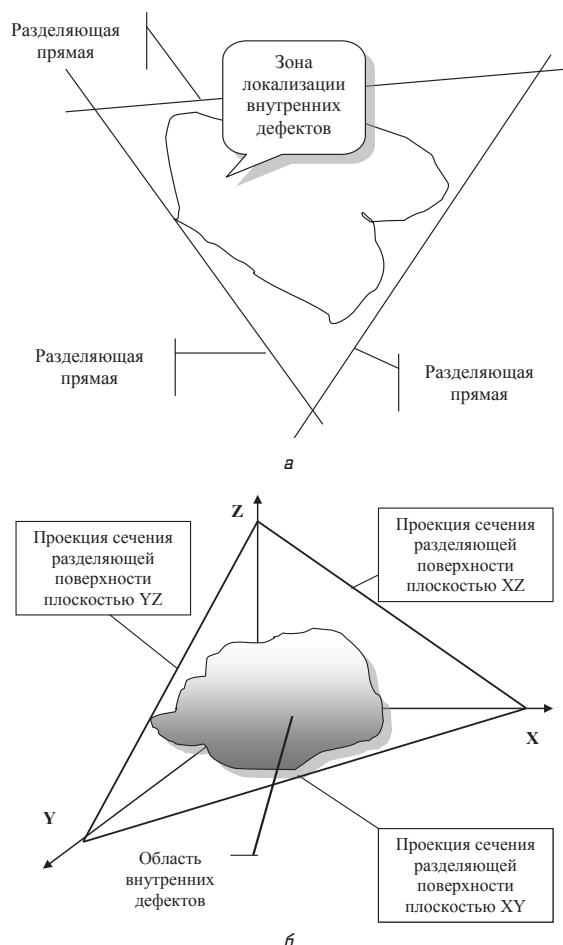


Рис. 3. Схема, поясняющая идею применения метода распознавания образов для формализации процедуры локализации внутренних дефектов в детали: *а* — двумерное представление; *б* — трехмерное представление

Разделяющие прямые — это границы, описываемые математически, и отделяющие область существования внутренних дефектов от бездефектной области и эти границы могут быть получены на основе применения методов распознавания образов, в частности методов статистической классификации [6, 9, 10]. Согласно этим работам, для решения задачи классификации должны быть выполнены следующие процедуры.

1. Расчет математических ожиданий m^A и m^B классов A и B , определяющих области существования дефектов в отливке от бездефектной области.

2. Расчет плотности распределения вероятностей классов A и B — $p_A(X)$ и $p_B(X)$ по формулам:

Если m^A и m^B — математические ожидания вектора X для классов A и B , и ковариационные матрицы распределения вектора X для классов A и B равны ($\text{cov}^A(X) = \text{cov}^B(X)$), плотности распределения вероятностей $p_A(X)$ и $p_B(X)$ могут быть представлены в виде:

$$p_A(X) = ke^{\left(-\frac{1}{2}(x-m^A)' \text{cov}^{-1}(x)(x-m^A)\right)},$$

$$p_B(X) = ke^{\left(-\frac{1}{2}(x-m^B)' \text{cov}^{-1}(x)(x-m^B)\right)},$$
(1)

где k — постоянный множитель, $\text{cov}^A(X)$ и $\text{cov}^B(X)$ — ковариационные матрицы классов A и B соответственно.

3. Расчет условных вероятностей принадлежности j -го объекта (координата точки отливки) к классу A и B :

$$P(A|x^j) = \frac{P(A)p_A(x^j)}{P(A)p_A(x^j) + P(B)p_B(x^j)},$$

$$P(B|x^j) = \frac{P(B)p_B(x^j)}{P(A)p_A(x^j) + P(B)p_B(x^j)}.$$
(2)

4. Получение классифицирующего правила в виде (3) или (4):

$$x^j \in A \text{ если } P(A|x^j) \geq P(B|x^j),$$

$$x^j \in B \text{ если } P(A|x^j) < P(B|x^j).$$
(3)

$$x^j \in A \text{ если } F(A|x^j) \geq y_0,$$

$$x^j \in B \text{ если } F(A|x^j) < y_0.$$
(4)

где $F(x^j)$ — дискриминантная функция, определяемая по уравнению (5), y_0 — пороговое значение дискриминантной функции.

$$F(x) = x' \text{cov}^{-1}(x)(m^A - m^B) =$$

$$= \frac{1}{2}(m^A + m^B)' \text{cov}^{-1}(x)(m^A - m^B) - \ln \frac{P(A)}{P(B)}.$$
(5)

В формуле (5) $P(A)$ и $P(B)$ — вероятности наблюдения классов A и B соответственно, а координатами вектора X выбираются значения координат XYZ , снимаемые с результатов компьютерного моделирования.

Пример применения данного метода для одного из описаний плоскости для рассматриваемой литой детали «поршень» приведен в форме классифицирующего правила (6):

$$x^j \in A \text{ если } [-7,803x_1 - 51,025x_2 - 7,575x_3 \geq (-3510,79)],$$

$$x^j \in B \text{ если } [-7,803x_1 - 51,025x_2 - 7,575x_3 < (-3510,79)].$$
(6)

На рис. 4 показано распределение для классов A и B в задаче построения поверхности, разделяющей дефектную и бездефектную области.

Полученное классифицирующее правило, позволяющее относить объект к одному из классов (класс A — бездефектная область, класс B — область существования внутренних дефектов). Дальнейшим развитием полученных результатов может быть проведение математического планирования эксперимента и последующая оптимизация [11–13], с целью выявления влияния конструктивных параметров оснастки на смещение в трехмерном пространстве разделяющих плоскостей, и позволяющие определить значения конструктивных параметров оснастки, обеспечивающие минимальный объем дефектной области в литых деталях.

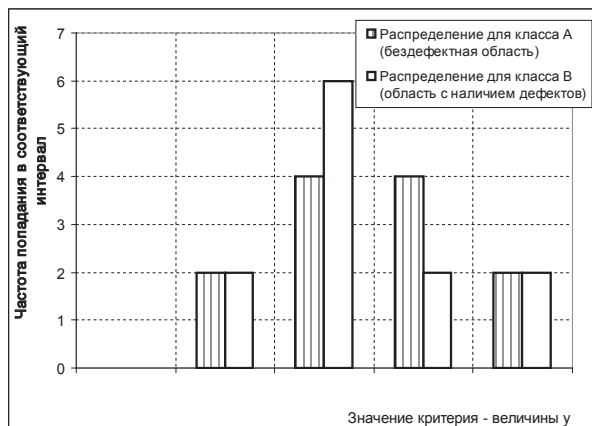


Рис. 4. Зависимость частоты попадания в соответствующий интервал от значения критерия — величины y

7. Выводы

В результате проведенного исследования с помощью методов компьютерного моделирования процесса заполнения кокиля расплавом, стало возможным решить задачу выявления мест дислокации внутренних дефектов. Результатом такого моделирования может быть выявление координат локализации дефектов и последующая формализация описания, на основании которой можно прогнозировать области литой детали, в которых вероятно образование дефектов при выбранной конструкции кокиля и технологических режимах литья.

Литература

- Пономаренко, О. И. Оптимизация технологических решений в условиях работы литейных цехов [Текст] / О. И. Пономаренко. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. — 320 с.
- Алехин, В. И. Компьютерное моделирование процессов при производстве литых деталей двигателя [Текст] / В. И. Алехин, О. В. Акимов, А. П. Марченко // Литейное производство. — Москва, 2010. — № 9. — С. 31–33.
- Алехин, В. И. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС [Текст] / В. И. Алехин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Двигатели внутреннего сгорания. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. — № 2. — С. 101–104.
- Алехин, В. И. Моделирование литейных процессов при изготовлении автомобильных поршней [Текст] / В. И. Алехин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Цветные металлы. — Москва, 2010. — № 8. — С. 81–83.
- Алехин, В. И. Моделирование мест проявления дефектов усадочного характера при проектировании литых деталей ДВС [Текст] / В. И. Алехин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Металл и литье Украины. — Киев, 2010. — № 12. — С. 27–30.
- Дёмин, Д. А. Диагностика технологического процесса. Руководство для технолога [Текст] / Д. А. Дёмин. — Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2005. — № 5/1(17). — С. 29–40.
- Краснокутский, Е. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации литой детали в кокиле [Текст] / Е. Краснокутский // Технологический аудит и резервы производства. — 2012. — Т. 1, № 1(3). — С. 3–8.
- Савченко, Ю. Применение компьютерно-интегрированных систем и технологий в производстве поршней [Текст] / Ю. Савченко // Технологический аудит и резервы производства. — 2012. — Т. 1, № 1(3). — С. 8–13.
- Дёмин, Д. А. Применение параметрических методов распознавания образов для исследования длительности модифицирующего эффекта [Текст] : материалы Научно-технической конференции / Д. А. Дёмин // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. — 1996. — С. 56–58.
- Дёмин, Д. А. Идентификация чугуна для определения рациональных режимов легирования [Текст] / Д. А. Дёмин, А. Б. Божко, А. В. Зрайченко, А. Г. Некрасов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 4/1(22). — С. 29–32.
- Дёмин, Д. А. Обработка экспериментальных данных и построение математической модели технологического процесса методом наименьших квадратов (МНК) [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 3/1(26). — С. 47–50.
- Дёмин, Д. А. Оптимизация технологического процесса в цехе предприятия [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2005. — № 6/1(18). — С. 48–59.
- Дёмин, Д. А. Оптимизация технологических режимов [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 2/1(20). — С. 32–35.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЯК РЕЗЕРВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОРШНІВ ДВС

У статті запропоновано використання процедури розпізнавання образів для опису локалізації дефектів у литих деталях «поршень» для ДВС. Наведено результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення кокилю і кристалізації сплаву для вдосконаленої технології литья, що передбачає застосування термоізолюючих покриттів кокиль. Результати комп'ютерного моделювання можуть бути використані для формалізації процесу опису локалізації дефектів у поршнях.

Ключові слова: лита деталь, кокиль, комп'ютерне моделювання, термоізолююче покриття.

Пономаренко Ольга Іванівна, доктор технічних наук, професор, кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Тренев Николай Сергеевич, кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Пономаренко Ольга Іванівна, доктор технічних наук, професор, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. Тренев Микола Сергійович, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Ponomarenko Olga, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Trenev Nicholay, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua