



Е. А. Краснокутский\*

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТОЙ ДЕТАЛИ В КОКИЛЕ

*В статье приведены результаты компьютерного моделирования процесса кристаллизации в литых деталях типа «поршень» при использовании различных термоизолирующих покрытий кокиля. На основании полученных результатов сделан вывод о возможности оптимизации параметров качества поршня путем эффективного управления процессами кристаллизации.*

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

### 1. Введение

Проектирование деталей двигателей внутреннего сгорания является одним из основополагающих этапов в изготовлении конкурентноспособных отечественных двигателей. Актуальной в этой связи представляется проблема разработки методологии проектирования деталей ДВС с использованием компьютерно-интегрированных систем и технологий. Отечественные производители поршней начали использовать компьютерно-интегрированные технологии для решения научных и производственных задач сравнительно недавно [2, 3]. Это связано с не изученностью многих процессов, особенно на этапе формирования литых деталей, а также этапе формирования свойств самого материала литых деталей. В качестве важнейших требований, предъявляемых к поршневым материалам, можно выделить следующие:

- высокая статическая и динамическая прочность, в том числе при рабочих температурах поршня;
- высокая усталостная прочность;
- достаточная твердость при нормальной и повышенной температурах;
- высокая теплопроводность;
- невысокий коэффициент линейного расширения;
- низкий удельный вес;
- удовлетворительные технологические свойства, обеспечивающие возможность изготовления качественных деталей при минимальных экономических затратах.

Учет этих факторов необходим при выборе оптимальных параметров изготовления литых деталей поршней и выбор многих из них должен основываться на проведении технологического аудита реального производства, в условиях которого изготавливаются эти детали.

Компьютерное моделирование и позволяет провести такой технологический аудит, причем экономия материальные ресурсы, т. е. в некотором роде «виртуальный» технологический аудит.

### 2. Постановка задачи исследований

В данной работе рассматривается решение проблем по обеспечению качества литых деталей на примере поршня ДВС с принудительным воспламенением. Данная деталь была спроектирована в упрощенном виде для простоты анализов результатов ряда экспериментов, выявляющих влияние свойств изолирующего материала кокиля и разделительных составов на процесс кристаллизации отливки и процесс образования литейных дефектов.

Для проектирования детали типа «поршень» был применен программный пакет трехмерного проектирования Solid Works, а для проведения поставленных задач по моделированию литейных процессов была выбрана программа LVM Flow [4–6].

Для постановки задачи была создана конечно-разностная модель детали типа «поршень» и металлической оснастки с такими данными: размер ячейки — 3 мм; количество ячеек — 378 480 шт.; материал отливки поршня — АК12М2МгН (ГОСТ 1583-93) (ДСТУ 2839-94); предварительный разогрев матриц кокиля и стержня до  $t = 300$  °С; поддон кокиля имеет условное водяное охлаждение и разогрев до  $t = 100$  °С; литниковая система представляет собой стояк с щелевым питателем; температура металла перед заливкой составляет — 680 °С; материал матрицы — серый чугун СЧ20 (ГОСТ 1412-85); материал стержня и поддона кокиля — углеродистая сталь Сталь45 (ГОСТ 1050-88); способ заливки — гравитационное литье (струя): диаметр струи — 10 мм; напор — 100 мм.

С учетом исходных данных, представленных выше, моделировался процесс заливки, кристаллизации

\* Работа выполнена под руководством профессора Акимова П. В.

и образования дефектов в отливке. В качестве варьируемых параметров были выбраны коэффициент теплопроводности разделительного покрытия, нанесенного на формообразующие поверхности кокиля, и материал теплоизоляционного «кожуха», предлагаемого для термоизоляции кокиля.

### 3. Методика исследования

Одним из наиболее эффективных путей достижения поставленных целей является автоматизация деятельности предприятия на основе современных CAD/CAM/CAE-систем, реализующих концепцию комплексной автоматизации производства, т. е. охват всего технологического цикла. При жесткой ограниченности средств можно осуществить локальную автоматизацию отдельных участков технологического процесса, что также может принести существенную экономию материальных и временных затрат. Одним из таких участков является проектирование литейной технологии. Современное проектирование литейной технологии осуществляется с помощью CAD/CAE-систем и включает в себя построение трехмерных (3D) геометрических моделей детали, отливки с литниковой системой, а также литейной оснастки и изготовление по ним чертежной документации.

Задачи, решаемые с помощью CAE-систем:

- Отработка литейной технологии на стадии проектирования без дорогостоящих натурных экспериментов.
- Оптимизация уже имеющейся технологии – конфигурации литниковой системы, прибылей, температуры и режима заливки и т. д.

Универсальным численным методом решения граничных задач, в основе которых лежат дифференциальные уравнения  $n$ -го порядка, являются методы конечных разностей (сеток) [7]. Достоинство конечно-разностных методов состоит в том, что они сводят решение краевой задачи для дифференциального уравнения к решению системы алгебраических уравнений относительно значений искомой функции на заданном множестве точек. Это достигается путем замены производных, входящих в дифференциальное уравнение, их конечно-разностными аппроксимациями.

### 4. Эксперимент и результаты моделирования

Задача исследования формулируется следующим образом. Задана упрощенная модель отливки типа «поршень» из алюминиевого сплава АК12М2МгН (ГОСТ 1583-93). Необходимо провести оценку влияния материала утеплителя кокиля на процесс кристаллизации отливки и образование усадочных дефектов. Для решения поставленной задачи была выполнена 3D-модель исходной отливки поршня и элементов технологии литейной формы. 3D-модель строилась с помощью программы Solid Works. После этого выполнялась конвертация в формат программы LVMFlow и компьютерное моделирование процесса кристаллизации с целью выявления возможных дефектов и мест их локализации. Толщина разделительного слоя ( $S$ ) составляла 0,3 мм, коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) варьировался на двух уровнях:  $\lambda = 0,002$  Вт/м°C и  $\lambda = 0,4$  Вт/м°C.

«Пролитая» с помощью LVMFlow модель литой детали типа «поршень» имеет вид, представленный на рис. 1–2.

При данных начальных условиях и выбранных коэффициентах теплопроводности разделительных составов был

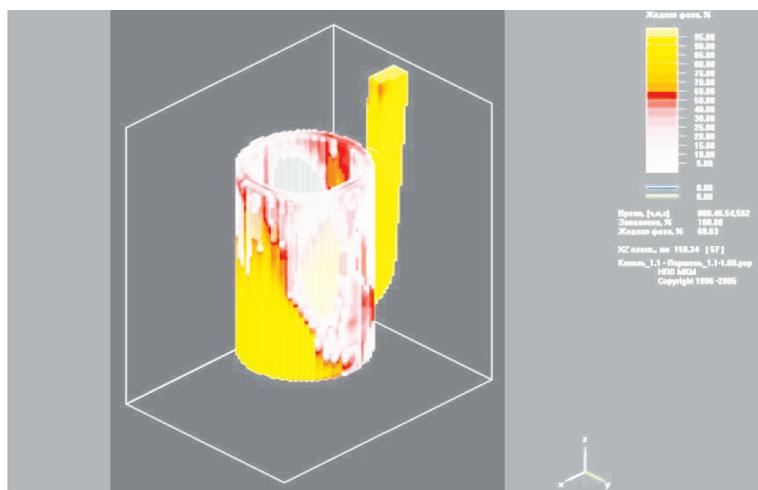


Рис. 1. Общий характер направленности кристаллизации отливки (при содержании жидкой фазы ~70 %) при  $\lambda = 0,002$  Вт/м°C

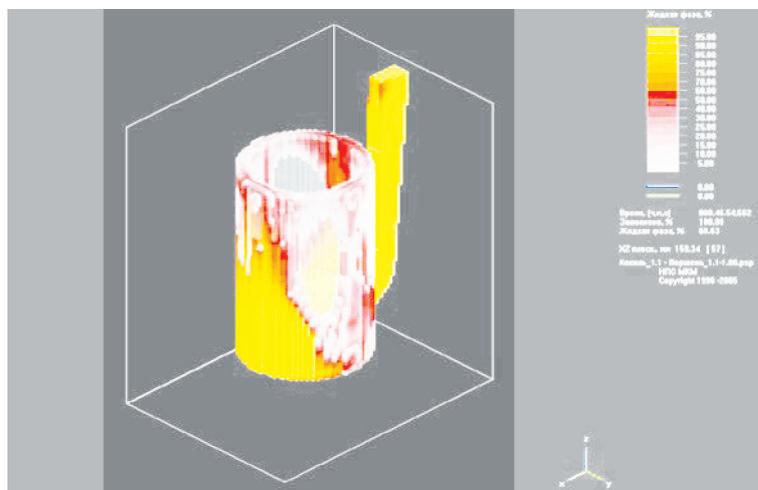


Рис. 2. Общий характер направленности кристаллизации отливки (при содержании жидкой фазы ~70 %) при  $\lambda = 0,4$  Вт/м°C

промоделирован также процесс образования дефектов усадочного характера [8], на основании анализа результатов которого стало возможным утверждать, что в случае применения «виртуального» разделительного состава с высокими теплопроводящими свойствами усадочные дефекты изменили характер локализации на рассредоточенный. Однако вероятность образования и локализация дефектов усадочного характера не изменились. Таким образом, было установлено, что применение разделительных составов с кардинально разными теплоизоляционными свойствами несущественно влияет на процесс кристаллизации отливки, а также в теле отливки формируются дефекты — усадочная пористость, локализованная в двух местах отливки.

В качестве второго этапа расчетов были выбраны 3 альтернативных пути устранения пористости, путем применения термоизолирующего кожуха, покрывающего кокиль: виртуальный материал кожуха с высокими теплоаккумулирующими свойствами ( $\lambda = 0,001 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$ ,  $S_1 = 10 \text{ мм}$ ,  $S_2 = 40 \text{ мм}$ ); материал кожуха с высокой теплопроводностью — асбестовый картон — с параметрами  $\lambda = 0,2 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$ ,  $S_1 = 10 \text{ мм}$ ,  $S_2 = 40 \text{ мм}$ ; вариант использования обоих материалов для утепления различных частей кокиля одновременно.

Принципиальная схема кокиля с необходимыми для пояснения размерами показана на рис. 3. При этом общие начальные условия оставляем прежними, а свойства и толщина разделительного слоя остаются неизменной для последующих расчетов, варьируются же свойства материала кожуха (табл. 1).

Разделительный состав, наносимый на все формообразующие поверхности:  $S = 0,3 \text{ мм}$ ;  $\lambda = 0,2 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$ .

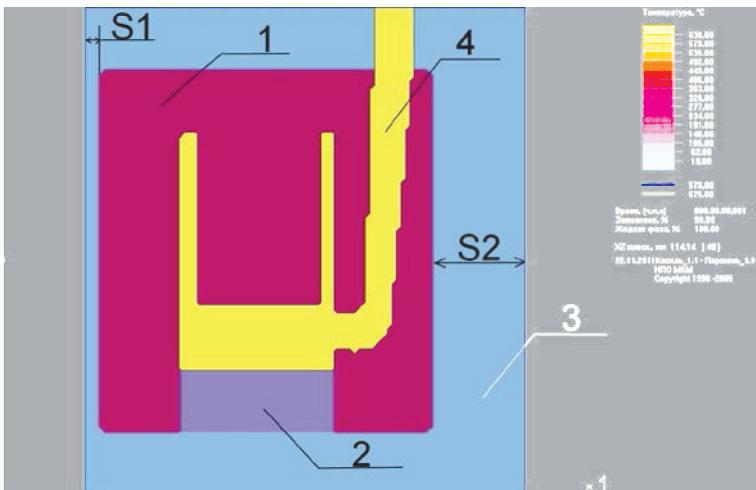


Рис. 3. Схема кокиля с теплоизолирующим кожухом:

1 — кокиль; 2 — поддон; 3 — теплоизолирующий кожух. Все три варианта были промоделированы

Таблица 2

Данные, используемые в эксперименте

№ эксперимента	Материал	$S_1$ , мм	$S_2$ , мм	$\lambda$ , Вт/м $^\circ\text{С}$
1	виртуальный	10	40	0,001
2	асбестовый картон	10	40	0,2
3	комбинированный	10	40	0,001—0,2

Графические результаты расчетов заполнения и кристаллизации и образование дефектов в отливке при использовании материала теплоизолирующего кожуха кокиля с кардинально различными экстремальными значениями коэффициента теплопроводности  $\lambda$  приведены на рис. 4 (эксперименты № 1—2).

Анализ результатов моделирования показал, что применение материалов с кардинально различными экстремальными значениями коэффициента теплопроводности для использования в качестве теплоизолирующего кожуха не пригодны, т. к. их внедрение приводит к результатам, аналогичным применению разделительных составов, рассмотренных выше.

Моделирование процесса кристаллизации и образования усадочных дефектов при использовании теплоизолирующего кожуха для кокиля, состоящий из двух равных частей, выполненных из материалов с кардинально разными экстремальными коэффициентами теплопроводности (см. табл. 1).

Графический результат моделирования влияния размещения различных материалов теплоизолирующего кожуха на расхождение температурных полей в кокиле отображен на рис. 5.

Графический результат моделирования влияния размещения различных материалов теплоизолирующего кожуха на вероятность образования дефектов отображен на рис. 6.

После анализа результатов экспериментов с применением материалов утеплителя кокиля с различными теплопроводящими свойствами было решено провести расчет процесса кристаллизации и образования дефектов с применением материала утеплителя, имеющего усредненные, по сравнению с рассмотренными выше материалами, теплопроводящими свойствами «Блоки и плиты из пеностекла FOAMGLAS®» (рис. 7):

Результат влияния выбранного способа управления кристаллизацией на формирование дефектов литья представлен на рис. 8.

## Выводы

1. Показана эффективность примененного в данной работе нового прогрессивного способа моделирования

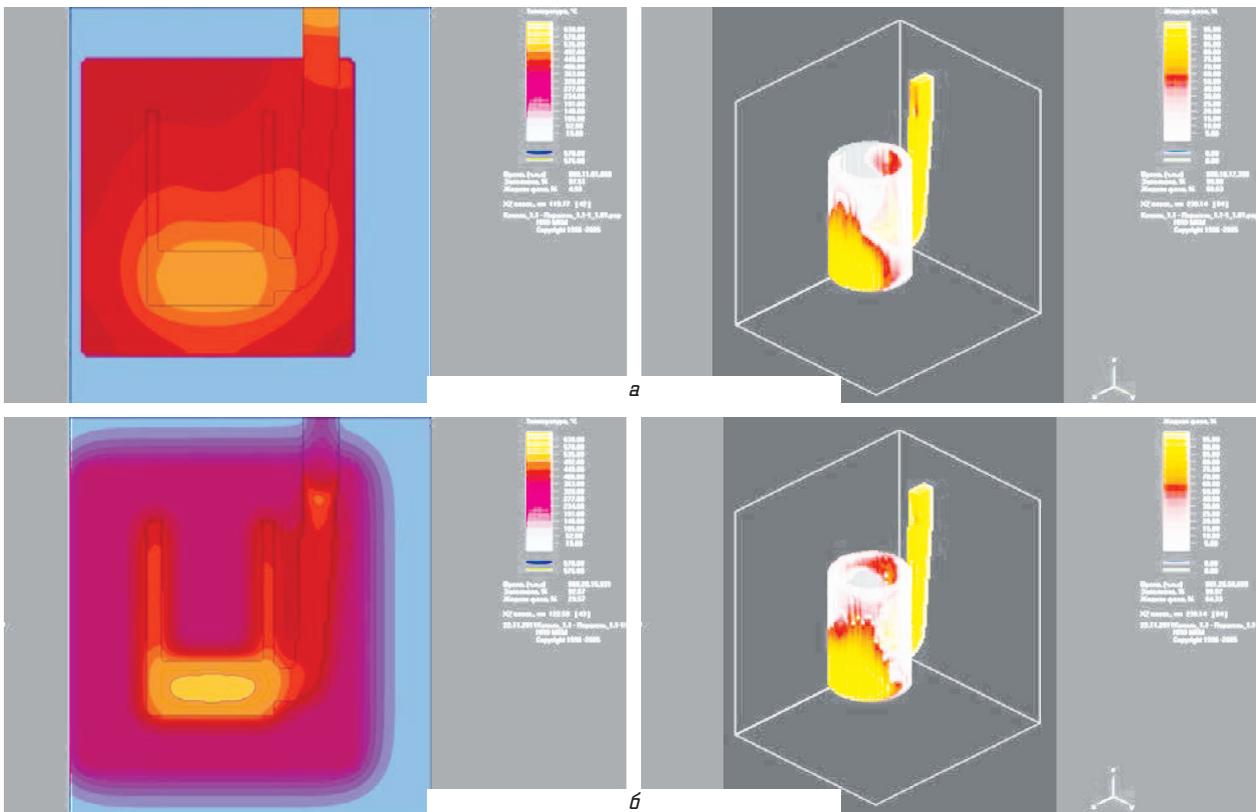


Рис. 4. Результаты моделирования при использовании виртуального (а) покрытия и асбестового картона (б)

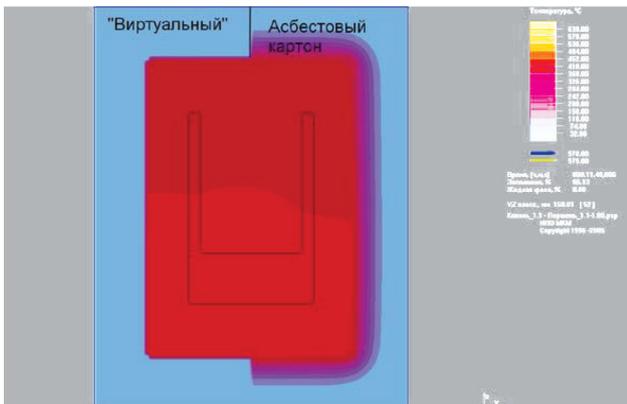


Рис. 5. Графический результат моделирования влияния размещения различных материалов теплоизолирующего кожуха на расхождение температурных полей в кокиле (сечение Z, Y)

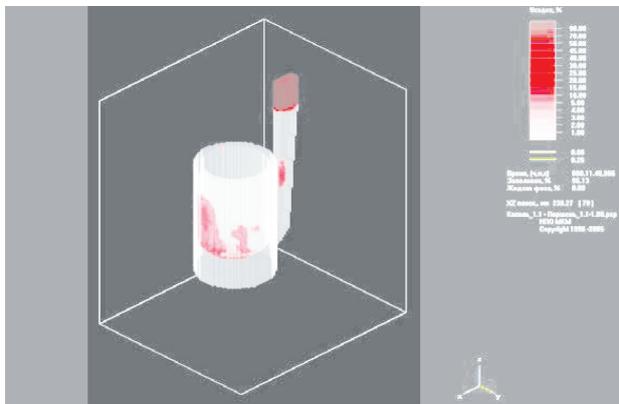


Рис. 6. Графический результат моделирования процесса образования усадочных дефектов в отливке (3D-сечение)

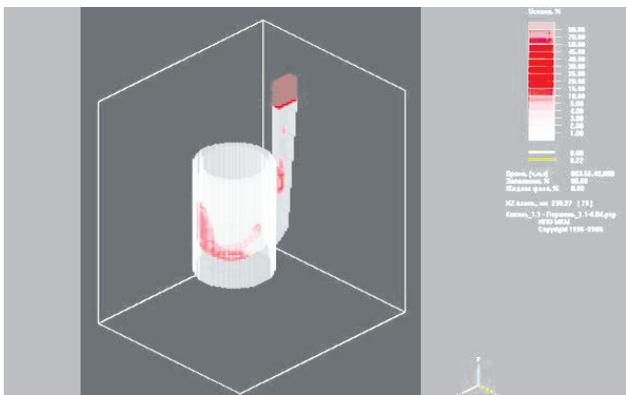


Рис. 7. Результат компьютерного моделирования процесса усадки. 3D (пеностекло:  $\lambda = 0,085 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$ ;  $S_1 = 10 \text{ мм}$ ;  $S_2 = 40 \text{ мм}$ )

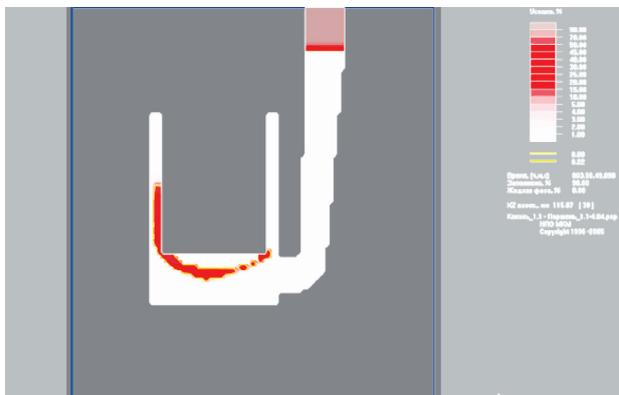


Рис. 8. Результат компьютерного моделирования влияния выбранного способа управления кристаллизацией на формирование дефектов литья (сечение X, Z)

литейных процессов с использованием методологии конструкторско-технологического проектирования.

2. Чтобы решить проблемы, связанные с кристаллизацией металла, необходимы исследования, связанные с процессами затвердевания литой детали типа «поршень». Для этой задачи может быть выбрана система автоматизированного моделирования литейных процессов LVM Flow, которая относительно данной задачи имеет определенные преимущества перед своими аналогами. К ним можно отнести: простоту постановки задачи; адекватность моделирования; относительную быстроту расчетов процессов заливки и кристаллизации (при правильной постановке задачи).

3. Показано, что направленность кристаллизации играет важнейшую роль при получении качественной литой детали. Появление дефектов усадочного характера в теле литой детали приводит к таким последствиям, как снижение механических характеристик детали, ее износостойкости, появление трещин в местах образования дефектов и т. д.

4. По результатам моделирования, выполненного в среде LVM Flow, были выявлены области предположительного образования дефектов (в программе LVM Flow модель образования усадочных дефектов базируется на теории перколяции и определяется в процентах, что показаны на шкале).

5. В процессе проведенных экспериментов по моделированию литейных процессов, протекающих при виртуальной заливке отливки типа «поршень» были исследованы различные способы влияния на направленность процесса кристаллизации отливки. В результате было рассмотрено влияние теплофизических свойств разделительных составов, а также материалов теплоизолирующего кожуха, нанесенных в различных местах кокиля, на направленность кристаллизации отливки путем аккумуляирования тепла в различных степенях.

6. Полученные результаты позволяют обозначить пути дальнейшего исследования технологии изготовления литой детали поршня «51-03-40» с целью устранения в ней выявленных дефектов, в частности планирование активного или пассивного эксперимента с построением математических моделей [3] и оптимизация технологических режимов [8–10] заливки поршней.

#### Литература

1. Титов Н. Д. Технология литейного производства [Текст] / Н. Д. Титов, Ю. А. Степанов. — М. : Машиностроение, 1985. — 404 с.
2. Могилев В. К. Справочник литейщика [Текст] / В. К. Могилев, О. И. Лев. — М. : Машиностроение, 1988. — 274 с.
3. 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. — X. : Технологический Центр. — 2006. — № 3/1. — С. 47–50.
4. Алёхин В. И. Моделирование мест проявления дефектов усадочного характера при проектировании литых деталей ДВС [Текст] / В. И. Алёхин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Металл и литье Украины. — Киев. — 2010. — № 12. — С. 27–30.
5. Алёхин В. И. Компьютерное моделирование процессов при производстве литых деталей двигателя [Текст] / В. И. Алёхин, О. В. Акимов, А. П. Марченко // Международный научно-технический журнал «Литейное производство». — Москва. — 2010. — № 9. — С. 31–33.
6. Алёхин В. И. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС [Текст] / В. И. Алёхин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Научно-технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания». — Харьков : НТУ «ХПИ». — 2009. — № 2. — С. 101–104.
7. Алёхин В. И. Моделирование литейных процессов при изготовлении автомобильных поршней [Текст] / В. И. Алёхин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Цветные металлы». — Москва. — 2010. — № 8. — С. 81–83.
8. Коваленко Б. П. Оптимизация состава холоднотвердеющих смесей (ХТС) с пропиленкарбонатом [Текст] / Б. П. Коваленко, Д. А. Дёмин, А. Б. Божко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — X. : Технологический Центр. — 2006. — № 6. — С. 59–61.
9. Дёмин Д. А. Оптимизация технологического процесса в цехе предприятия [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — X. : Технологический Центр. — 2005. — № 6. — С. 48–59.
10. Дёмин Д. А. Оптимизация технологических режимов [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — X. : Технологический Центр. — 2006. — № 2/1(20). — С. 32–35.

#### КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЛИТОЇ ДЕТАЛІ В КОКІЛІ

Е. О. Краснокутський

У статті наведені результати комп'ютерного моделювання процесу кристалізації в литих деталях типу «поршень» при

використанні різних тепло ізолюючих покриттів кокилю. На основі отриманих результатів зроблено висновок про можливість оптимізації параметрів якості поршня шляхом ефективного управління процесами кристалізації.

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

*Євген Олександрович Краснокутський, магістрант кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*

## THE SIMULATION OF CRYSTALLIZATION IN A METAL MOLD CAST PARTS

**E. Krasnokutskiy**

The results of computer simulation of the crystallization process in cast parts of the «piston» by using different insulating

coating die Based on the obtained results suggest the possibility of optimizing the parameters of the quality of the piston through the effective management of processes of crystallization.

**Keywords:** computer modeling, mold, molded part, insulating coating.

*Evgeniy Krasnokutskiy, student of foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*

### Адрес для переписки:

61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21  
 Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»  
 Механико-технологический факультет  
 E-mail: litvo11@kpi.kharcov.ua

УДК 621.74

Ю. Э. Савченко\*

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРШНЕЙ

*В статье приведены результаты компьютерного моделирования усадки и формирования усадочных дефектов в литых деталях типа «поршень» при использовании различных термоизолирующих покрытий кокиля. На основании полученных результатов сделан вывод о важности подбора материала теплоизолирующего покрытия для снижения усадочных дефектов.*

**Ключевые слова:** литая деталь, покрытие, компьютерно-интегрированная технология.

### 1. Введение

Современное состояние вопроса о проектировании деталей ДВС и САПР технологической подготовки производства на одном из определяющих этапах производства деталей ДВС, — изготовления отливок деталей двигателей, — не позволяет говорить об эффективном управлении качеством. Причина этого — не изученность многих процессов, протекающих в процессе формирования отливки, и определяющих, в конечном счете, реальную, а не теоретически спроектированную конструкцию детали.

Поэтому актуальной представляется проблема разработки методологии проектирования деталей ДВС с использованием компьютерно-интегрированных систем и технологий.

Известные западные производители достаточно длительное время при проектировании, техно-

логической подготовке и производстве поршней используют компьютерные технологии. Отечественные производители поршней начали использовать компьютерно-интегрированные технологии для решения научных и производственных задач сравнительно недавно [1, 2].

### 2. Цель исследования и постановка задачи

В данной работе рассматривается решение проблем по обеспечению качества литых деталей ДВС на примере типа «поршень». Данная деталь была спроектирована в упрощенном виде для простоты анализов результатов ряда экспериментов, выявляющих влияние свойств изолирующего материала кокиля и разделительных составов на процесс образования литейных дефектов. В соответствии

\* Работа выполнена под руководством профессора Акимова О. В.