

## Определение мест возникновения и размеров газосуадочных литейных дефектов с применением компьютерно-интегрированного моделирования

*Рассмотрены вопросы прогнозирования газосуадочной микропористости в отливках. Разработан метод определения мест расположения и размеров дефектов в литом поршне двигателя с воспламенением топлива от сжатия с применением технологии совместного компьютерно-интегрированного проектирования при литье поршней в кокиль.*

**Ключевые слова:** технология литья, компьютерно-интегрированное проектирование, прогнозирование микропористости, двигатель внутреннего сгорания, поршень.

**В**ведение. Наиболее важным требованием при получении качественных литых поршней заданной геометрической конфигурации на начальных этапах их производства является наличие минимальных дефектов: усадочной рыхлоты, усадочных раковин, газовой пористости, горячих трещин, остаточных напряжений и деформаций.

Наиболее распространенным дефектом внутренней структуры отливок является пористость. Под пористостью обычно понимают равномерно или хаотично распределенные несплошности внутри отливки, образовавшиеся при затвердевании расплава, сильно различающиеся по форме и размеру.

Большинство поршней для двигателей с воспламенением топлива от сжатия [1-3] транспортного и специального назначения изготавливают способом литья, в основу проектирования которого заложены технологические факторы, обуславливающие возникновение газосуадочных литейных дефектов.

Размер газосуадочной пористости и количество пор, которое не допускается в поршнях, регламентируется конструкторской документацией [4-8], следовательно, при проектировании перспективных двигателей нельзя пренебрегать дефектами, влияющими на их качество и надежность. Поскольку пористость существенно снижает все без исключения механические показатели отливок, задача прогнозирования объемной доли пористости и мест возможного появления дефектов представляется весьма важной и актуальной.

*Анализ литературных данных и постановка проблемы.* Наиболее эффективным расчетным методом прогноза микропористости считается прямое моделирование процесса образования пор при затвердевании на основе использования уравнения Дарси. Однако необходимые для этого математические модели еще недостаточно точны и требуют совершенствования.

На данный момент существуют различные способы оценки и расчета пористости: *a* – критериальные полуэмпирические зависимости (критерий Ниуама, критерий Ли и т. д.) [9, 10], *b* – модели течения расплава в двухфазной зоне отливки [11, 12], *в* – модели

зарождения и роста поры [13, 14], *г* – модель клеточного автомата [15, 16].

В последнее время внимание исследователей [17-21] в основном сосредоточено на моделировании газовой пористости.

Классическая модель двухфазной зоны отливки, в которой происходит рост и развитие дендритов, такова: сквозь дендритный каркас происходит фильтрация жидкости к основанию дендритов с целью компенсации усадки расплава. Интенсивность данной фильтрации существенно зависит от параметров двухфазной зоны (ширины зоны, расстояния между осями дендритов) и физико-химических свойств расплава. Из-за наличия фазового перехода динамическое давление жидкости по мере фильтрации к основанию дендритов существенно падает. При наличии большого количества растворенных газов происходит также обогащение жидкости газами [17, 22].

Экспериментально было доказано, что для описания фильтрационного течения расплава может использоваться уравнение Дарси [23].

В процессе литья коэффициенты проницаемости и динамической вязкости не могут быть константами и должны существенно изменяться по ширине двухфазной зоны. Обычно их задают как функции доли твердой фазы. Вместе с тем зачастую коэффициент динамической вязкости многими исследователями задается как константа по всей ширине зоны. Известны данные, согласно которым коэффициент динамической вязкости можно представить в виде функции температуры [17].

Также известно следующее представление коэффициента динамической вязкости вида:

$$\mu = \mu_0 \cdot f_L^{-n}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент динамической вязкости при большом перегреве;  $f_L$  – доля жидкой фазы;  $n$  – константа [24].

Зависимость (2.1) неплохо коррелирует с известными экспериментальными данными

при  $n = 1,55$  [25, 26]. Это выражение считается его первым приближением для описания изменения вязкости по ширине двухфазной зоны.

Коэффициент проницаемости представляет собой площадь сечения, доступную для фильтрации жидкости. В случае описания фильтрации в двухфазной зоне коэффициент проницаемости дендритного каркаса не может быть постоянным по определению.

Коэффициент проницаемости напрямую зависит от параметров формирующейся микроструктуры сплава (расстояние между первичными осями дендритов, размер микрзерна и т. д.), поэтому функциональная зависимость коэффициента проницаемости должна включать параметры микроструктуры отливки.

Первую оценку коэффициента проницаемости дал Флемингс [25]. По аналогии с другими пористыми средами он предложил следующий вид зависимости:

$$K(f_s) = (1-f_s)^2 \cdot \gamma, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – параметр кристаллического строения отливки;  $f_s$  – доля твердой фазы.

Существенных указаний по алгоритму нахождения постоянной  $\gamma$  Флемингс не приводил. Вероятно, в связи с этим широкого распространения данная форма зависимости не получила.

Журавлев [24] предложил более сложную функциональную зависимость коэффициента проницаемости, связанную с микроструктурой отливки.

Наибольшее распространение для моделирования течения в двухфазной зоне получило приближение Кармана-Козени [27], которое активно используется для моделирования течения различного направления (параллельно или перпендикулярно первичным осям дендритов) в двухфазной зоне широкого спектра сплавов (от алюминиевых до никелевых):

$$K(f_L) = \frac{(f_L^3 \cdot d^2)}{180 \cdot (1-f_L)^2}, \quad (3)$$

где  $f_L$  – доля жидкой фазы;  $d$  – параметр микростроения отливки.

Согласно мнению авторов [28], невозможно создать общее кинетическое уравнение, позволяющее рассчитывать скорость фильтрации в общем случае.

Авторы [18, 19] используют для прогнозирования пористости в отливках системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПОЛИГОНСОФТ» и ProCAST, в которых степень неравновесности процесса кристаллизации может быть учтена путем задания соответствующей кривой распределения твердой фазы в интервале кристаллизации. Термодинамическая база данных CompuTherm предлагает две модели кристаллизации расплава. Прогноз пористости в отливке зависит от того, как происходит усадка сплава в интервале кристаллизации: если основная усадка сплава происходит в области больших значений  $f_L$ , где проницаемость дендритного каркаса велика, то возникающие усадочные дефекты будут ликвидироваться за счет притока рас-

плава, то есть будет формироваться усадочная раковина. Если основная усадка сплава происходит в области малых значений  $f_L$ , когда дендритный каркас уже малопроницаем, то возникающие усадочные дефекты будут формировать усадочную пористость.

Авторы [20, 21] предлагают использовать для моделирования образования газоусадочных дефектов программу автоматизированного моделирования LVMFlow, в которой значение порога протекания вводится как параметр сплава. Согласно модели образования усадочных дефектов, основанной на теории перколяции, дендритный каркас двухфазной зоны оказывает сопротивление потоку жидкости, возникающему в процессе усадки. Скорость перколяции жидкости пропорциональна градиенту давления и проницаемости каркаса [29, 30].

Если жидкая фаза изолирована в отливке во время затвердевания, то она окружена двухфазной зоной с долей твердой фазы и не может питаться жидкостью во время процесса затвердевания. В результате происходит разрыв между фазами и происходит усадка. В настоящей интегрированной компьютерной системе (ИКС) суммарную усадку рассчитывают для каждого изолированного жидкого узла, после чего распределяют по изолированному объему жидкости в зависимости от гравитационного поля, проницаемости зоны и распределения температуры. Если локализованное жидкое ядро содержит литниковую точку, то считается, что эта зона питается расплавом через литниковую точку и усадочные полости в ней не образуются.

Таким образом, сложность выявления размеров и мест расположения дефектов газоусадочного характера, процесс образования которых начинается с этапов фазовых переходов охлаждения жидкого сплава и последующего процесса кристаллизации, обуславливает выполнение исследований по компьютерно-интегрированному моделированию процесса кристаллизации и охлаждения поршней с целью выявления мест расположения и размеров газоусадочных дефектов.

*Цели и задачи исследования.* Целью исследования является выявление мест расположения и размеров дефектов газоусадочного характера в поршнях двигателей с воспламенением топлива от сжатия.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка 3D модели отливки;
- компьютерное моделирование охлаждения отливки поршня;
- анализ динамики охлаждения отливки, фазового перехода, связанности зон, кристаллизующихся в последнюю очередь;
- экспериментальные исследования литых поршней.

*Материалы и методы исследования.* В качестве исследуемой детали для компьютерно-интегрированного моделирования взят литой поршень Д 240-1004021, производимый на Харьковском предприятии ПАО «АВТРАМАТ».

В качестве инструментария для инженерного моделирования процесса литья поршней выбрана ИКС LVM Flow 2.91 (владелец лицензии – ПАО «АВТРАМАТ»).

Создание 3D-модели (рис. 1) выполнялось с учетом требований, предъявляемых к отливкам, получаемым в кокиле с применением возможностей программ Solid Works и LVM Flow.

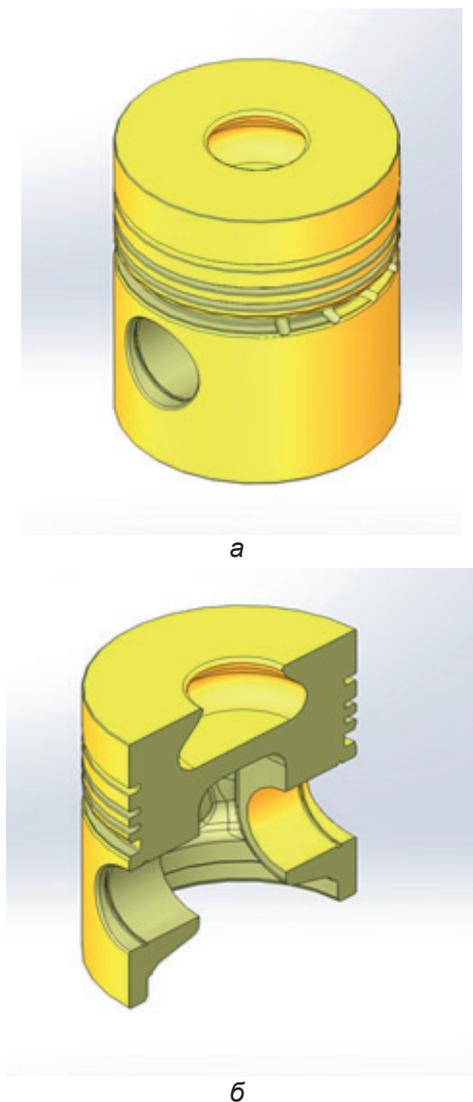


Рис. 1. 3D-модель литой детали поршня Д 240-1004021

Граничные условия и исходные данные для моделирования задавали в следующей последовательности:

1) 3D-импорт (конвертирование файла в формат \*.stl) и создание конечно-разностной модели;

2) назначение материала для отливки и технологической оснастки, а также разделительного покрытия, наносимого на поверхности оснастки:

– материал отливки поршня – АК12М2МгН ГОСТ 1583-93 (ДСТУ 2839-94);

– материал технологической оснастки – Сталь 20, СЧ20;

– на формообразующие части кокиля нанесена кокильная краска толщиной – 0,2 мм, которая имеет теплопроводность  $\lambda = 1,90$  Вт/м·К.

3) назначение начальной температуры расплава и технологической оснастки, ее охлаждения различными теплоносителями:

– начальная температура технологической оснастки –  $250 \pm 280$  °С;

– температура расплава перед заливкой в форму – 710 °С;

– водяное охлаждение с исходной температурой воды – 20 °С;

4) назначение общего времени цикла производства одной отливки:

– общее время одного цикла составляет – 62 с (из технологических данных ПАО «АВТРАМАТ»).

С помощью модуля 3D-импорта, встроенного в ИКС LVMFlow, модель поршня с литниково-питающей системой и кокилем конвертировалась в конечно-разностную модель.

Установленные параметры ячеек: размер ячейки – 1,3 мм; количество ячеек – 3 563 430 шт.

Для прогнозирования микропористости и газоусадочной пористости используется критерий Niyama, который является надежным инструментом для простых отливок, но в случае отливок со сложной геометрией его использование требует более тщательного анализа результатов моделирования. Критерий Niyama показывает направленность процесса кристаллизации и определяется выражением:

$$Niyama = \frac{G}{\sqrt{\dot{T}}}, \quad (4)$$

где  $G$  – это температурный градиент в К/мм;  $\dot{T}$  – скорость охлаждения в К/сек [9].

Обе величины оцениваются в конце затвердевания, и в результате расчета получается поле значений критерия Niyama в отливке.

Полученные результаты инженерного моделирования представлены графически в виде отображения расположения газоусадочных дефектов.

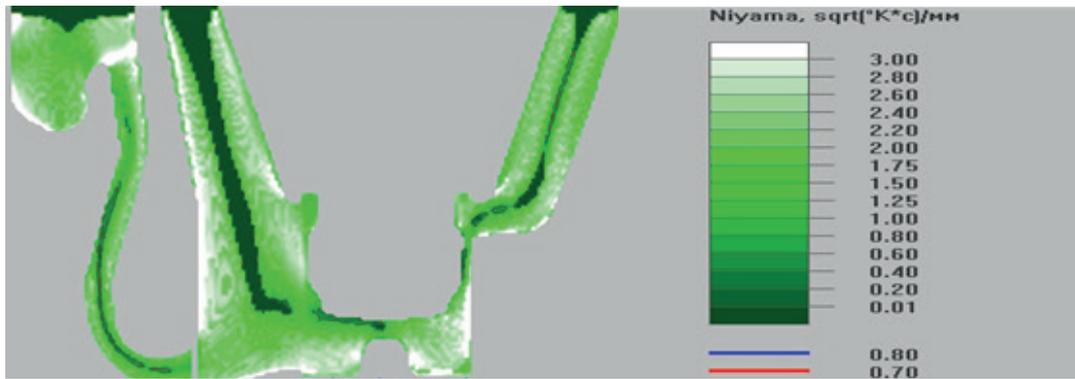
*Результаты исследований.* Графически места расположения дефектов, согласно данному критерию, представлены на рис. 2.

Температурный градиент отражает интенсивность теплоотвода. Высокий температурный градиент свидетельствует о значительном различии температуры между двумя ближайшими расчетными точками в текущий момент времени, и наоборот, малая величина свидетельствует об однородности температурного поля в локальном объеме. Температурный градиент вычисляют при затвердевании в каждом узле отливки при прохождении точки Niyama на кривой охлаждения. Нулевое значение данного параметра свидетельствует об отсутствии направленной кристаллизации в локальном объеме и повышенной опасности появления здесь пористости. Более того, данный параметр стремится к нулю в тех областях, где мал температурный градиент – в центре тонких стенок.

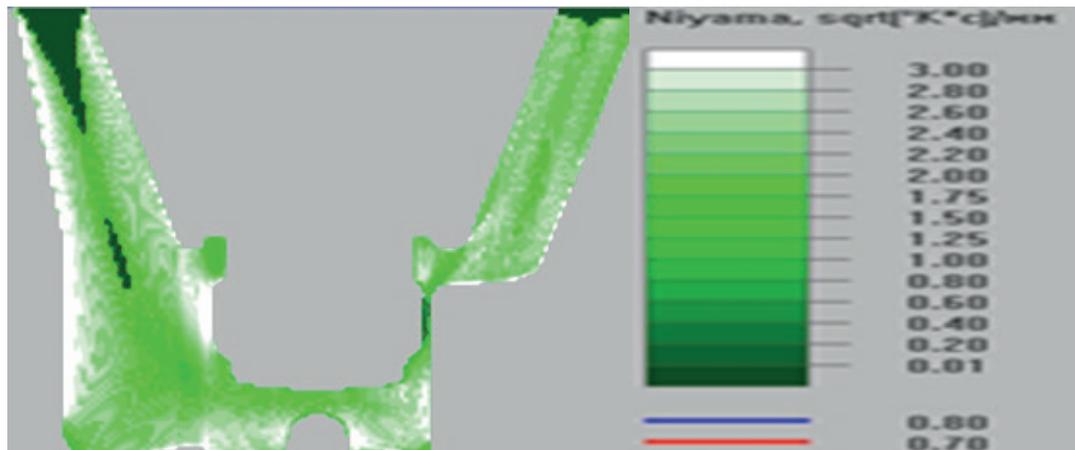
Анализ мест расположения дефектов показал, что наиболее подверженными усадочным явлениям являются:

– массивы бобышки под пальцевым отверстием с величиной области рассеивания газоусадочной пористости 1-1,5 мм<sup>2</sup>;

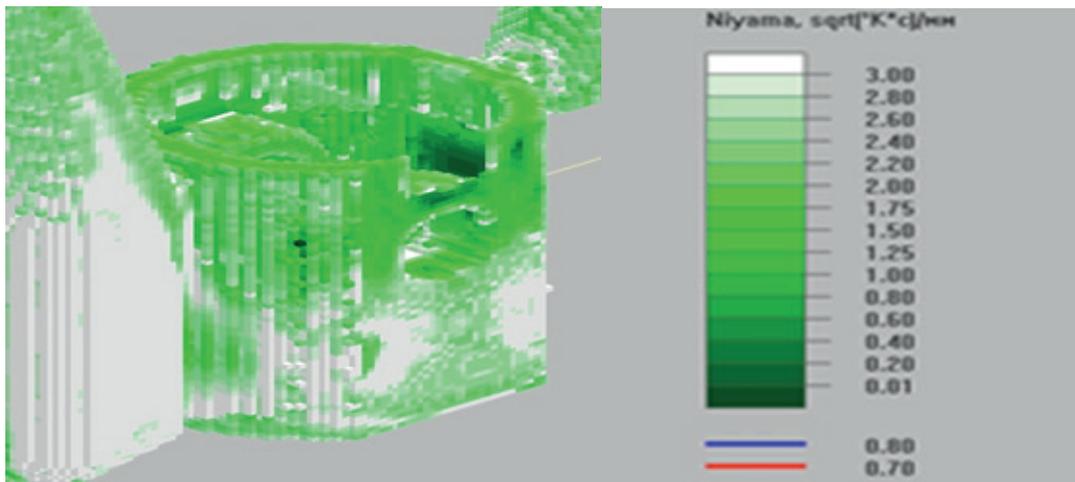
– днище поршня под камерой сгорания с величиной области рассеивания газоусадочной пористости 0,6-0,8 мм<sup>2</sup>;



а



б



в

**Рис. 2.** Места расположения дефектов газоусадочного характера согласно критерию Niyama: а – массив днища поршня; б – массив корпуса поршня; в – массив бобышки

– область перехода от корпуса поршня к днищу, внутри детали с величиной области рассеивания газоусадочной пористости 0,6-0,8 мм<sup>2</sup>.

Величина размеров дефектов, найденных нами в указанных зонах, составляет от 0,3 до 1,3 мм.

Из результатов инженерного моделирования тепловых и гидродинамических процессов литья поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) следует, что дефекты газоусадочного характера могут являться концентраторами усталостного разрушения в конструктивных элементах детали, а значит, могут оказать влияние на прочностную надежность в процессе эксплуатации.

Экспериментальные исследования литых поршней в условиях производства проведены на ПАО «АВТРАМАТ» и являются необходимыми для верификации результатов компьютерно-интегрированного моделирования мест расположения, размеров возникающих технологических дефектов и отладки технологического процесса производства.

При производстве опытной партии литых поршней Д 240-1004021 (2000 шт.) выдержаны следующие условия:

– температура металла перед заливкой в форму  $T_{мет} = 710-720$  °С;

– время цикла  $\tau_{\text{цикла}} = 55-65$  с;  
 – водяное охлаждение центрального стержня, формирующего внутреннюю поверхность детали.

Для алюминиевых поршней двигателей Д 240-1004021 преобладающим видом литейных дефектов является газоусадочная пористость, которая влияет на качество и прочностную надежность. Подтверждением этого являются результаты дефектовки поршня модели 240-1004021 (таблица).

Места расположения и размеры газоусадочных дефектов, выявленные в результате экспериментального исследования, подтверждают результаты компьютерно-интегрированного моделирования. Совместное решение задач моделирования и экспериментального исследования на производстве позволяет наиболее точно спрогнозировать образование газоусадочных дефектов при литье поршней двигателей с воспламенением топлива от сжатия.

Согласно методу определения мест расположения и размеров дефектов в литом поршне проведено моделирование и исследован процесс направленности кристаллизации поршня в форме, выявлены места расположения дефектов в различных частях детали, которые были подтверждены результатами экспериментальных исследований.

## Выводы

Разработан метод определения мест расположения и размеров дефектов в литом поршне двигателя с воспламенением топлива от сжатия.

Определено, что наиболее эффективным методом прогнозирования микропористости считается прямое моделирование процесса образования пор при затвердевании на основе использования уравнения Дарси, однако необходимые для этого математические модели еще недостаточно точны и требуют совершенствования.

Выяснено, что образование газоусадочных дефектов соответствует модели, основанной на теории перколяции.

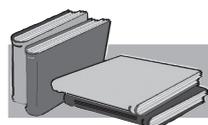
## Дефекты, полученные в результате разбраковки опытной партии

Тип дефекта	Месторасположение дефекта	Количество отбракованных деталей
Газоусадочная пористость	на юбке с противоположной стороны от заливки	189
	на юбке со стороны заливки	8
	в теле днища поршня	23
Итого		220
Усадочные раковины	на юбке с противоположной стороны от заливки	5
	на юбке со стороны заливки	5
	в теле днища поршня	2
Итого		12
Всего		232

Анализ результатов моделирования мест расположения дефектов показал, что наиболее подверженными усадочным явлениям являются: массивы бобышки под пальцевым отверстием, днище поршня под камерой сгорания, область перехода от корпуса поршня к днищу.

Выполнены экспериментальные исследования в условиях производства по уточнению размеров и мест образования газоусадочных дефектов для опытной партии поршней Д 240-1004021 в количестве 2000 шт.

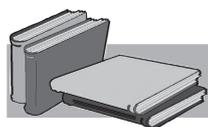
Совместное применение компьютерно-интегрированного моделирования и экспериментального исследования на производстве позволило определить места образования и размеры газоусадочных дефектов ( $\varnothing 0,3-1,3$  мм).



## ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. / В. Н. Луканин, И. В. Алексеев, М. Г. Шатров и др.; Под ред. В. Н. Луканина и М. Г. Шатрова. – М.: Высшая школа, 2007. – Кн. 2: Динамика и конструирование: учебник для вузов. – 2007. – 400 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания: учебник для вузов по специальности «Строительные и дорожные машины и оборудование» / А. С. Хачиян, К. А. Морозов, В. Н. Луканин и др.; под ред. В. Н. Луканина. – М.: Высшая школа. – 1985. – 311 с.
3. Платонов В. Н., Малькевич А. В. Влияние материала и метода изготовления заготовок алюминиевых поршней на их прочность // Двигателестроение. – 1982. – № 8. – С. 26-29.
4. Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия: ГОСТ 20000-88. – Режим доступа: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim)
5. Дизели автомобильные. Общие технические условия: ГОСТ 23465-79. – Режим доступа: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim)
6. Автомобильные транспортные средства. Поршни алюминиевые двигателей. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 53558 – 09. – Режим доступа: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim)
7. Дизели автомобильных транспортных средств. Общие технические условия: ГОСТ Р 51998-2002.– Режим доступа: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim)

8. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия: ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). – Введ. 01.01.1996. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 49 с.
9. Поляков С. и др. Новый критерий для оценки вероятности образования микропористости в отливках // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013. – № 8.
10. Пензев П. С. и др. Анализ качества литого блок-картера автомобильного дизеля 4ДТНА1 с использованием инженерного моделирования // Двигатели внутреннего сгорания. – 2015. – № 2.
11. Черепанов А. Н., Попов В. Н., Максимов Л. Н. Кинетика формирования переходной зоны и газоусадочной пористости при неравновесной кристаллизации сплавов // Известия: Металлы. – 1984. – № 4-6. – С. 69.
12. Луцкич П. Е., Рафальский И. В. Расчет двухфазной зоны в интервале кристаллизации алюминиевых сплавов с использованием термического анализа // Литье и металлургия. – 2012. – № 1 (64).
13. Васильев Л. С. Механизм зарождения пор и микротрещин вблизи дислокационных скоплений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2004. – № 27.
14. Монастырский В. П. Модель образования усадочных дефектов в отливках из никелевых жаропрочных сплавов // Proceedings of the 8th Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification. – 2010. – С. 89-96.
15. Малинецкий Г. Г., Степанцов М. Е. Клеточные автоматы для расчета некоторых газодинамических процессов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1996. – Т. 36. – № 5. – С. 137-145.
16. Лобанов А. И. Модели клеточных автоматов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2. – №. 3. – С. 273-293.
17. Pequet Ch., Gremaud M. and Rappaz M. Modeling of Microporosity, Macroporosity, and Pipe-Shrinkage Formation during the Solidification of Alloys Using a Mushy-Zone Refinement Method. Applications to Aluminum Alloys. //Metallurgical and Materials Transactions A, v.33A, July 2002 pp. 2095-2106.
18. Carlson K. D., Lin Z., Hardin R., Beckermann C. Modeling of Porosity Formation and Feeding Flow in Steel casting. // Proceedings of the 56th SFSA Technical and Operating Conference, Paper No. 4.4, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2002.
19. Монастырский В. П., Монастырский А. В., Левитан Е. М. Разработка технологии литья крупногабаритных лопаток ГТД для энергетических установок с применением систем «Полигон» и Procast // Литейное производство. – 2007. – № 9. – С. 29-34.
20. Тихомиров М. Д. Влияние гидродинамических процессов на адекватность прогнозирования пористости в СКМ ЛП «ПОЛИГОНСОФТ»: труды 4-й международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» / под ред. проф. Белова В. Д. – М.: ИД Медпрактика, 2007. – 280 с.
21. Алехин В. И., Акимов О. В., Марченко А. П. Компьютерное моделирование процессов при производстве литых деталей двигателя // Международный научно-технический журнал «Литейное производство. – 2010. – № 9. – С. 31-33.
22. Акимов О. В. Совершенствование технологических процессов изготовления литых деталей роторов для повышения эксплуатационных характеристик тягового электропривода // Проблемы машиностроения. – 2014. – Т. 16. – № 5. – С. 7-12.
23. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки: в 2-х частях: ч. 1. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
24. Вейник А. И. Тепловые основы теории литья. – М.: Машгиз, 1962. – 382 с.
25. Журавлев В. А. Численное исследование кристаллизации сплавов с позиций квазиравновесной диаграммы состояния // Известия Академии наук СССР: Металлы. – 1976. – С. 31.
26. Флемингс М. К. Процессы затвердевания, пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 424 с.
27. Семенов Б. И., Куштаров К. М. Производство изделий в твердо-жидком состоянии / Б. И. Семенов, К. М. Куштаров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э.Баумана, 2010. – 223 с.
28. Duncan A. J., Han Q., Viswanathan S. Measurement of Liquid Permeability in the Mushy Zones of Aluminium-Copper Alloys. Metallurgical and materials transactions, v.30B, August 1999, pp.745-750
29. Поппель С. И. Поверхностные явления в расплавах / С. И. Поппель. – М.: Металлургия, 1994. – 440 с.
30. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
31. Stauffer D. Introduction to Percolation Theory / D. Stauffer, A. Aharony. – London : Taylor and Fransis, 1994. – 192 p.



## REFERENCES

1. Lukanin V. N., Alekseev I. V., Shatrov M. G. et al. (2007). Dvigateli vnutrennego sgoraniia: v 3 kn., Kniga 2: Dinamika I konstruirovaniie: uchebnik dlia vuzov. [Internal combustion engines: in 3 books, Book 2: Dynamics and construction: Reference book]. Moscow: Vysshiaia shkola, 400 p. [in Russian].
2. Khachiian A. S., Morozov K. A., Lukanin V. N. et al. (1985). Dvigateli vnutrennego sgoraniia: uchebnik dlia vuzov po special'nosti «Stroitel'nye i dorozhnye mashiny i oborudovanie». [Internal combustion engines: the textbook for higher education institutions «Structural and road machines and the equipment»]. Moscow: Vysshiaia shkola, 311 p. [in Russian].
3. Platonov V. N., Mal'kevich A. V. (1982). Vliianie materiala i metoda izgotovleniia zagotovok aliuminievykh porshnei na ikh prochnost'. [Influence of material and method of manufacture of preparations of aluminum pistons on their durability]. Dvigatelistroenie. № 8, pp. 26-29. [in Russian].
4. GOST 20000-88. Diesel engines of tractor and combine type. Common technical specifications. – Retrieved from: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim) [in Russian].
5. GOST 23465-79. Diesel engines of automotive type. Common technical specifications. – Retrieved from: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim) [in Russian].
6. GOST 53558-09. Automobile vehicles. Pistons aluminum engines. Common performance specification and test methods. – Retrieved from: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim) [in Russian].

7. GOST P 51998-2002. Diesels of automobile vehicles. Common technical specifications. – Retrieved from: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim) [in Russian].
8. GOST 1583-93. Aluminum and foundry alloys. Kiev, Gosstandart Ukrainy, 1995. 49 p. [in Russian].
9. Poliakov S. et al. (2013). Novyi kriterii dlia ocenki veroiatnosti obrazovaniia mikroporistosti v otlivkakh. [New criterion for assessment of probability of formation of microporosity in mold pieces]. Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie, no 8. [in Russian].
10. Penzev P. S. et al. (2015). Analiz kachestva litogo blok-kartera avtomobil'nogo dizelia 4DTNA1 s ispol'zovaniem inzhenernogo modelirovaniia. [The analysis of quality of a cast block case of the automobile diesel 4DTNA1 with use of engineering model operation]. Dvigateli vnutrennego sgoraniia, no 2. [in Russian].
11. Cherepanov A. N., Popov V. N., Maksimov L. N. (1984). Kinetika formirovaniia perekhodnoi zony i gazosadochnoi poristosti pri neravnovesnoj kristallizacii splavov. [Kinetics of formation of the transition zone and gas-shrinkage porosity at a nonequilibrium crystallization of alloys]. Izvestiia: Metally, no 4-6, p. 69. [in Russian].
12. Lushchik P. E., Rafal'skii I. V. (2012). Raschet dvukhfaznoi zony v intervale kristallizacii aliuminievykh splavov s ispol'zovaniem termicheskogo analiza. [Calculation of a two-phase zone in a crystallization interval of aluminum alloys with use of a thermal analysis]. Lit'e i metallurgii, no 1 (64). [in Russian].
13. Vasil'ev V. S. (2004). Mekhanizm zarozhdeniia por i mikrotreshchin vblizi dislokacionnykh skoplenii. [The mechanism of origin of a time and microcracks near dislocation congestions]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serii Fiziko-matematicheskie nauki. No 27. [in Russian].
14. Monastyrskii V. P. (2010). Model' obrazovaniia usadochnykh defektov v otlivkakh iz nikelevykh zharoprochnykh splavov. [Model of formation of shrinkable defects in mold pieces from nickel high-temperature alloys]. Proceedings of the 8th Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification, pp.89-96. [in Russian].
15. Malineckii G. G., Stepanov M. E. (1996). Kletochnye avtomaty dlia rascheta nekotorykh gazodinamicheskikh processov. [Cellular automata for calculation of some gasdynamic processes]. Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoi fiziki, Vol. 36, no 5, pp. 137-145. [in Russian].
16. Lobanov A. I. (2010). Modeli kletochnykh avtomatov. [Models of cellular automata]. Komp'iuternye issledovaniia i modelirovanie, Vol. 2, no 3, pp. 273-293. [in Russian].
17. Pequet Ch., Gremaud M. and Rappaz M. Modeling of Microporosity, Macroporosity, and Pipe-Shrinkage Formation during the Solidification of Alloys Using a Mushy-Zone Refinement Method. Applications to Aluminum Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, v.33A, July 2002 pp. 2095-2106. [in English].
18. Carlson K. D., Lin Z., Hardin R., Beckermann C. (2002). Modeling of Porosity Formation and Feeding Flow in Steel casting. Proceedings of the 56th SFSA Technical and Operating Conference, Paper No. 4.4, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL. [in English].
19. Monastyrskii V. P., Monastyrskii A. V., Levitan E. M. (2007). Razrabotka tekhnologii lit'ia krupnogabaritnykh lopatok GTD dlia energeticheskikh ustanovok s primeneniem sistem «Poligon» i Procast. [Development of technology of casting of large-size shovels of GTD for power stations with use of the Ground and Procast systems]. Liteinoe proizvodstvo, no 9, pp. 31-33. [in Russian].
20. Tikhomirov M. D. (2007). Vliianie gidrodinamicheskikh processov na adekvatnost' prognozirovaniia poristosti v SKMLP «POLIGONSOFT»: trudy 4-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii «Progressivnye liteinye tekhnologii», pod red. prof. Belova V. D. Moscow: ID Medpraktika, 280 p. [in Russian].
21. Alekhin V. I., Akimov O. V., Marchenko A. P. (2010). Komp'iuternoe modelirovanie processov pri proizvodstve litykh detalei dvigatelia. [Computer model operation of processes by production of cast details of the engine]. Mezhdunarodnyi nauchno-tehnicheskii zhurnal "Liteinoe proizvodstvo", no 9, pp. 31-33. [in Russian].
22. Akimov A. V. (2014). Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh processov izgotovleniia litykh detalei rotorov dlia povysheniia ekspluatatsionnykh kharakteristik tiagovogo elektroprivoda. [Perfecting of technological processes of manufacture of cast details of rotors for increase of production characteristics of the traction electric drive]. Problemy mashinostroeniia, Vol.16, no 5, pp.7-12. [in Russian].
23. Balandin G. F. (1978). Osnovy teorii formirovaniia otlivki: v 2-h chastiakh: ch. 1. [Bases of the theory of formation of mold piece: in 2 parts: p.1.]. Moscow: Mashinostroenie, 328 p. [in Russian].
24. Veinik A. I. (1962). Teplovye osnovy teorii lit'ia. [Thermal bases of the theory of casting]. Moscow: Mashgiz, 382 p. [in Russian].
25. Zhuravlev V. A. (1976). Chislennoe issledovanie kristallizacii splavov s pozicii kvaziravnovesnoj diagrammy sostoianiia. [Numerical research of a crystallization of alloys from positions of a quasi-equilibrium constitution diagram]. Izvestiia Akademii nauk SSSR: Metally, p. 31. [in Russian].
26. Flemings M. K. (1979). Processy zatverdevaniia, perevod s angl. [Hardening processes, trans. from English]. Moscow: Mir, 424 p. [in Russian].
27. Semenov B. I., Kushtarov K. M. (2010). Proizvodstvo izdelii v tverdozhidkom sostoyanii. [Production of items in liquid-solid state]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, 223 p. [in Russian].
28. Duncan A. J., Han Q., Viswanathan S. (August 1999). Measurement of Liquid Permeability in the Mushy Zones of Aluminium-Copper Alloys. Metallurgical and materials transactions, v.30B, pp.745-750. [in English].
29. Poppel' (1994). Poverkhnostnye yavleniia v rasplavakh. [The surface phenomena in melts]. Moscow: Metallurgii, 440 p. [in Russian].
30. Tarasevich Yu. Yu. (2002). Perkoliaciia: teoriia, prilozheniia, algoritmy. [Percolation: theory, applications, algorithms]. Moscow: Editorial URSS, 112 p. [in Russian].
31. Stauffer D., Aharony A. (1994). Introduction to Percolation Theory. London : Taylor and Fransis, 192 p. [in English]

## Анотація

Золотарь Л. С., [Идріс Гарба Гусау], Акімов О. В., Богдан В. В., Золотарева А. В.  
Визначення місць виникнення і розмірів газоусадочних ливарних дефектів із застосуванням комп'ютерно-інтегрованого моделювання

*Розглянуто питання прогнозування газоусадочної мікропористості у виливках. Розроблено метод визначення місць розташування і розмірів дефектів у литому поршні двигуна із займанням палива від стискання із застосуванням технології спільного комп'ютерно-інтегрованого проектування при литті поршнів в кокіль.*

## Ключові слова

*Технологія лиття, комп'ютерно-інтегроване проектування, прогнозування мікропористості, двигун внутрішнього згорання, поршень.*

## Summary

Zolotar' L., [Idris Garba Gusau], Akimov O., Bogdan V., Zolotareva A.  
Determination of places of formation and the sizes of gas-shrinkable casting defects with application of the computer integrated simulation

*The questions of prediction of gas-shrinkable microporosity in castings have been reviewed. The method of definition of the locations and the sizes of defects in the cast piston of the engine with inflaming of fuel at compression by using concerted technology of computer-integrated design when moulding pistons in chill has been developed.*

## Keywords

*Casting technology, computer-integrated design, simulation of casting processes, the internal combustion engine, the piston.*

Поступила 15.11.16