

Идрис Гарба Гусау, О. В. Акимов, А. П. Марченко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков

Компьютерно-интегрированное моделирование процессов охлаждения и кристаллизации поршней в кокиле

Рассмотрен процесс моделирования процессов охлаждения и кристаллизации металла в форме с применением технологии совместного компьютерно-интегрированного проектирования при литье поршней в кокиль.

Ключевые слова: технология литья, компьютерно-интегрированное проектирование, моделирование процессов литья, двигатель внутреннего сгорания, поршень

Введение. В современных условиях к выпускаемой продукции предъявляется ряд требований, из которых главными являются качество, низкая себестоимость и минимальное время разработки новых изделий, что может быть достигнуто с применением моделирования в рамках технологии компьютерно-интегрированного проектирования литых поршней.

Учитывая, что получение качественного поршня на этапе литья состоит из заливки расплавленного металла в форму и формирования литой детали в процессе фазового перехода при охлаждении и кристаллизации, актуальной задачей является компьютерно-интегрированное моделирование тепловых и гидродинамических процессов литья поршней.

Анализ литературных данных и постановка проблемы.

Тепловые и гидродинамические процессы литья. Тепловые и гидродинамические процессы литья значительны по своей сути и широко представлены в многочисленных работах [1-10], авторы которых являются известными исследователями в областях гидродинамики, теплофизики, физики твёрдого тела, сопротивления материалов.

По мнению авторов [1, 2], физико-химические, тепловые и гидравлические процессы, происходящие в процессе изготовления отливок, обуславливают образование литейных дефектов.

Усадочные дефекты могут возникнуть также вследствие нарушения направленности затвердевания и недостаточного питания массивных узлов отливки [3-5].

Исходя из сложности выявления размеров и мест расположений, наиболее опасными считаются скрытые дефекты газоусадочного характера, процесс образования которых начинается с этапов фазовых переходов охлаждения жидкого сплава и последующего процесса кристаллизации [6-8].

Согласно [3] взаимодействие расплава с формой при заполнении, охлаждении и кристаллизации обуславливает формирование заданных свойств литого поршня. Эта совокупность процессов изучалась как на тепловом уровне, так и на теплокинетическом. Кристаллизация расплава в литейной форме при формировании литой детали была рассмотрена в соответствии с теорией теплопроводности с учётом

теплообмена расплава с формой и кинетики роста кристаллов при охлаждении.

Основными параметрами, изучаемыми в данных исследованиях, были направленность кристаллизации и охлаждения литого поршня в форме, которые зависят от физических характеристик системы металл-форма-окружающая среда, геометрических свойств поршня, начальных условий системы и граничных условий.

Методы компьютерного моделирования литейных процессов. Есть два наиболее известных метода численного моделирования процессов затвердевания литого поршня: масштабирование и аналогирование [3, 9].

Для построения математических моделей охлаждения литого поршня в форме ранее использовались способы численного моделирования и экспериментального исследования [3, 4, 5, 9, 10]. При численном моделировании краевых задач числовые значения критериев подобия и переменных задают, а значения зависимых переменных вычисляют в сравнении с аналогированием или масштабированием, при котором все величины измеряют.

Численные методы физического моделирования затвердевания литого поршня в форме требуют применения специальных статистических методов, с помощью которых повышается точность итоговых значений измеренных величин. Использование для обработки результатов моделирования методов математического планирования многофакторных экспериментов даёт возможность уменьшить влияние случайных погрешностей, представить результаты расчёта в виде полиномиальной математической модели, но является трудоёмким процессом, занимающим большое количество времени на обработку данных [11, 12].

Существующие методы численного моделирования с использованием физических моделей литейных процессов, которые происходят в результате охлаждения отливки в форме, являются трудоёмкими, при этом варьирование различными технологическими параметрами является практически невозможным.

Для моделирования многопараметрических процессов весьма успешно используются различные специализированные интегрированные компьютерные системы (ИКС), в основу которых заложены

наиболее распространённые математические методы: конечных элементов, конечных разностей, конечных объёмов, граничных элементов [13-16].

Метод конечных разностей является более простым для решения гидродинамических задач, но недостаточно точным из-за особенностей прямоугольной ортогональной сетки, наложенной на прямоугольную расчётную область, в которую вписана геометрия детали [14]. Однако применительно к моделированию тепловых процессов в затвердевающих отливках является более простым и достаточно точным, при условии подготовки и возможном упрощении 3D-модели литой детали, а также корректном определении начальных условий и назначения граничных условий.

Для моделирования литья поршней двигателей наиболее применимы две моделирующие системы: ProCast и MagmaSoft. В Европе более популярна система MagmaSoft, в США – ProCast. Кроме того, определённый сегмент рынка в Европе занимают системы WinCast (ранее – Simtec) и NovaFlow (на отечественном рынке эта система имеет название LVMFlow). В Украине и СНГ лидерами по распространённости являются два системных продукта: Полигон и LVMFlow [14].

MagmaSoft – немецкий моделирующий пакет, базирующийся на методе конечных разностей, впервые позволивший моделировать сложные литейные процессы на достаточно высоком уровне. Численными методами в MagmaSoft решаются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы. Также численно решается задача прогноза макропористости и раковин, хотя используемые при этом модели носят явно упрощённый характер, не отражающий современные представления о сложном и динамическом характере структурированности сплавов в интервале затвердевания. Прогноз микропористости, структурных, механических и других характеристик литой детали проводится на уровне критериального анализа, который предполагает обработку базовых полей, рассчитанных численными методами с помощью относительно простых критериев [14, 17].

ProCast – американский конечно-элементный пакет, по объективным показателям более мощный, чем MagmaSoft, так как помимо преимуществ элементного подхода в ProCast используются более сложные и физически-универсальные модели, что существенно повышает адекватность расчётов [17, 18]. В ProCast численными методами моделируются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы, а также процессы структурообразования (кристаллизационные процессы). ProCast имеет собственный генератор конечно-элементных сеток, который можно с успехом использовать для геометрий средней сложности.

WinCast – численные решения в данной ИКС проводят на базе современного метода конечных элементов. Несмотря на то, что в WinCast имеются определённые упрощения при решении таких основных технологических задач, как тепловая (затвердевание) и усадочно-фильтрационная (образование микропористости, макропористости и раковин), на

достаточно высоком уровне моделируются деформационные процессы при охлаждении литой детали, что для ряда литейных производств является весьма привлекательным [17, 19].

В системе *Полигон* численными методами решаются задачи моделирования гидродинамических, тепловых и усадочно-фильтрационных процессов; методами критериального анализа – задачи прогноза прочности, твёрдости, структурных параметров, размыва форм и т. п. [17, 20].

В пакете *LVMFlow* используется метод конечных разностей. Однако, несмотря на все недостатки, LVMFlow можно применять для моделирования технологических процессов литья. По таким показателям, как скорость расчётов, удобство интерфейса и некоторым другим важным параметрам, LVMFlow вполне составит конкуренцию любым разностным пакетам (хотя конечно-элементные пакеты типа ProCast объективно имеют более широкий круг применимости по сложности геометрии отливок и способам литья [17, 20]).

Широкий спектр требований, предъявляемый к отливкам поршней, характер образования газоусадочных дефектов и многообразие существующих моделирующих систем обуславливает выполнение исследований по компьютерно-интегрированному моделированию тепловых и гидродинамических процессов литья поршней.

Цели и задачи исследования.

Целью исследования является выявление мест возможного расположения дефектов газоусадочного характера в поршнях двигателей с воспламенением топлива от сжатия.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

- разработка 3D-модели отливки;
- компьютерное моделирование охлаждения отливки поршня;
- анализ зон жидкой и твёрдой фаз и выявление мест возможного появления дефектов.

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

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

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

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);

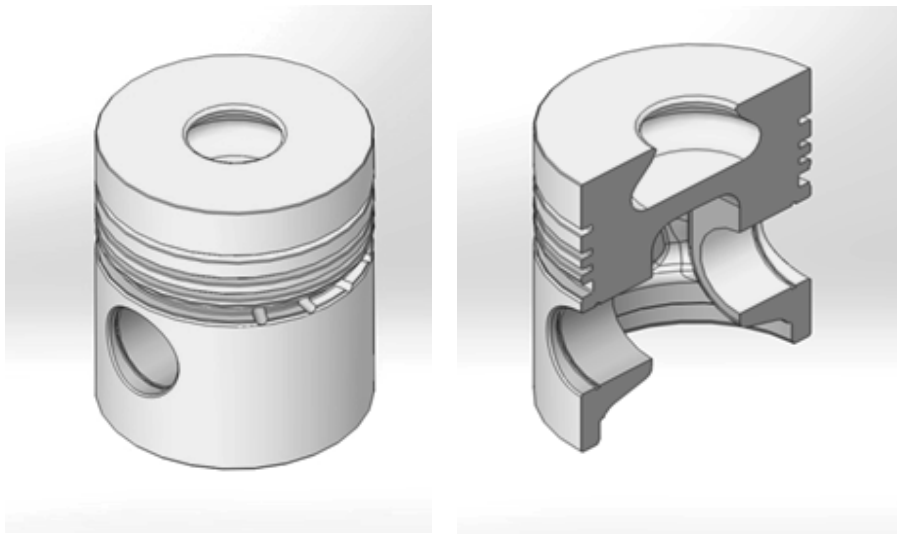


Рис. 1. 3D-модель литой детали поршня Д 240-1004021

– 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, её охлаждения различными теплоносителями:

- начальная температура технологической оснастки – 250 ± 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.

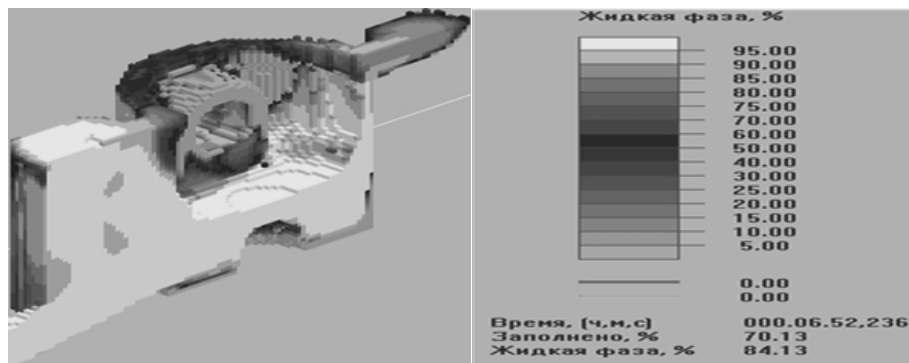
Полученные результаты инженерного моделирования представлены графически в виде направленности кристаллизации при охлаждении (переход от жидкой к твёрдой фазе).

Результаты исследований. Результаты моделирования охлаждения отливки (рис. 2) и последующий анализ зон жидкой и твёрдой фаз позволяют выявить характер направленности кристаллизации отливки. Вначале охлаждали тонкую

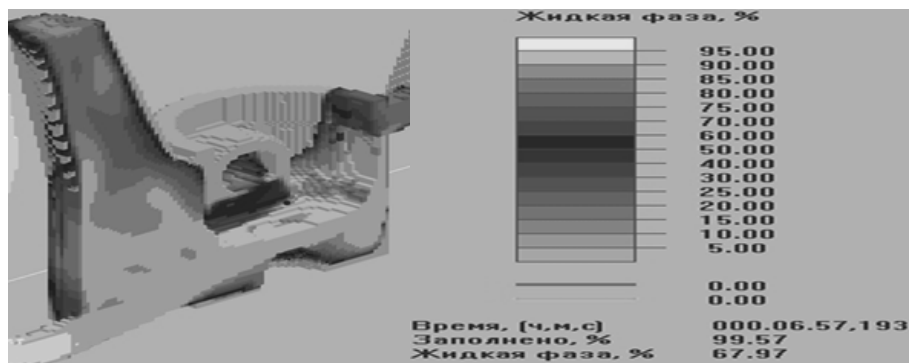
«юбку» детали поршня (рис. 2, а), далее – область пальцевых отверстий (рис. 2, б) и в последнюю очередь кристаллизовалась головка поршня (рис. 2, в).

Проведённый анализ показал, что интервал между полным затвердеванием «юбки» поршня и головки вызывает неравномерность роста кристаллов в теле отливки, что приводит при эксплуатации к изменению механических свойств детали [1, 3, 4]. На рис. 3 показаны зоны изоляции металла при переходе из жидкой в твёрдо-жидкую и твёрдую фазы.

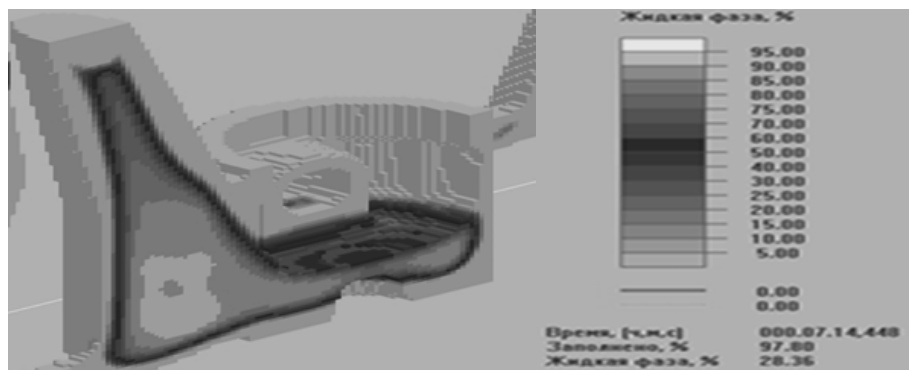
Согласно теории перколяции [21] проницаемость металла становится меньше критического значения и вследствие этого жидкая фаза изолируется от питающих частей закристаллизовавшимся металлом.



а

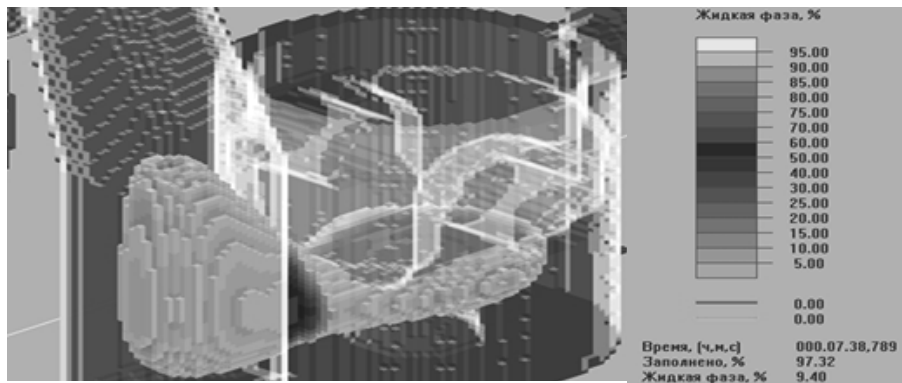


б

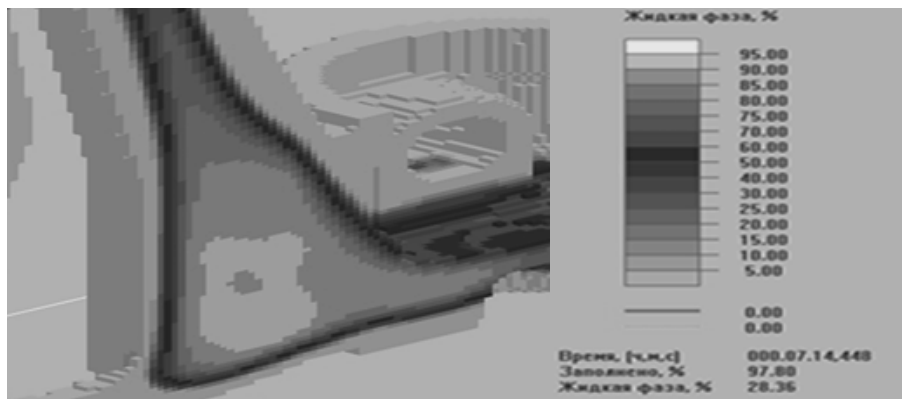


в

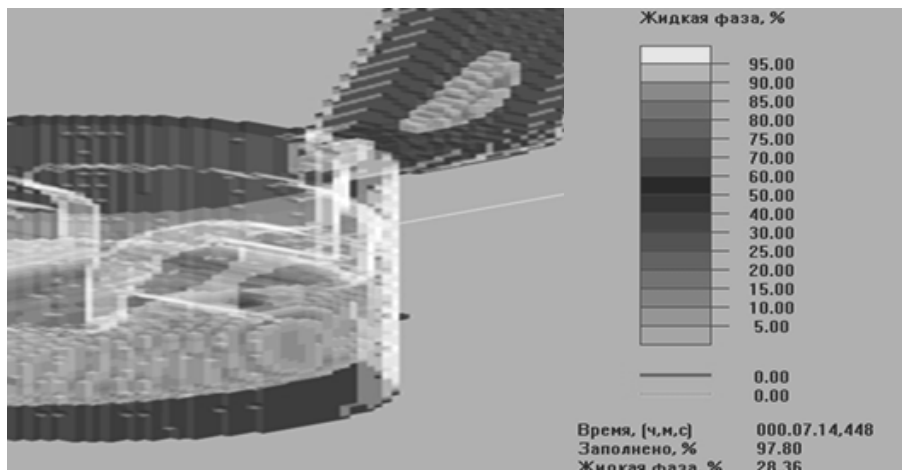
Рис. 2. Общий характер направленности кристаллизации отливки, содержание жидкой фазы, %: а – 84, б – 68, в – 28



а



б



в

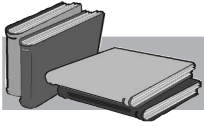
Рис. 3. Зоны изоляции металла при переходе из жидкой в твёрдо-жидкую и твёрдую фазы: а – массив корпус-днище поршня; б – массив над пальцевым отверстием; в – массив «юбки» поршня

Выводы

Моделирование охлаждения отливки поршня показало, что правильный выбор положения отливки в форме создал благоприятные условия для направленной кристаллизации.

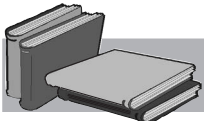
Анализ динамики охлаждения отливки, фазового перехода, связанности зон, кристаллизующихся

в последнюю очередь, позволили определить места возможного появления дефектов газоусадочного характера, которыми являются: массив корпус-днище поршня; массив над пальцевым отверстием; массив «юбки» поршня.



ЛИТЕРАТУРА

1. Галдин Н. М. Цветное литье: справочник / Д. Ф. Чернега, Д. Ф. Иванчук ; под. ред. Н. М. Галдина. – М. : Машиностроение, 1989. – 528 с.
2. Акимов О. В. Научные основы конструкторско-технологического проектирования литых деталей ДВС: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 Харьковский политехнический ин-т, нац. техн. ун-т. – Х. : НТУ "ХПИ", 2008
3. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки : в 2-х частях. – Ч.1. – М. : Машиностроение, 1976. – 328с.
4. Анисович Г. А. Затвердевание отливок. – Минск : Наука и техника, 1960. – 436 с.
5. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. – Л. : Машиностроение, 1976. – 216 с.
6. Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М., Бибиков Е. Л. Производство отливок из сплавов цветных металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 416 с.
7. Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М. Литейное производство цветных и редких металлов: учебное пособие для вузов. – Металлургия, 1982.
8. Алехин В. И., Белогуб А. В., Марченко А. П., Акимов О. В. Моделирование мест проявления дефектов усадочного характера при проектировании литых деталей ДВС. Металл и литье Украины. — 2010. — № 12. — с. 27-30.
9. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. – М. : Машгиз, 1960. – 436 с.
10. Вейник А. И. Тепловые основы теории литья. – М. : Машгиз, 1962. – 382 с.
11. Грачев Ю. П., Плаксин Ю. М. Математические методы планирования экспериментов – М. : ДеЛи принт, 2005.
12. Кубланов М. С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов: учебное пособие. Часть II. / М. С. Кубланов – [3-е изд.]. – 2014.
13. Розин Л. А. Метод конечных элементов // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – №. 4. – С. 120-127.
14. Тихомиров М. Д., Комаров И. А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей // Литейное производство. – 2002. – №. 5. – С. 22-28.
15. Смирнов Е. М., Зайцев Д. К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2004. – №. 2. – С. 36.
16. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике. – М. : Изд. Мир, 1982.
17. Тихомиров М. Д. Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов: материалы научно-практического семинара «Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности». – 2004.
18. HU H. et al. Application of the software ProCAST in the casting of solidification simulation [J] // Materials Science and Technology. – 2006. – Т. 3. – С. 019.
19. Vajss K., Ogorodnikova O. M., Popov A. V. Computerized engineering analysis of castings in the WinCast Program. Metalcasting industry trends // Liteinoe Proizvodstvo(Russia). – 2002. – Т. 7. – С. 25-26.
20. Турищев В. Моделирование литейных процессов: что выбрать? // Литейное производство. – 2005. – №. 11. – С. 54-55
21. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.



REFERENCES

1. Galdin N. M, Chernega D. F., Ivanchuk D. F. (1989). Tsvetnoie lit'e: spravochnik (Ed. by N. M. Galdina). [Color Casting]. Moscow: Mashinostroiieniie. [in Russian].
2. Akimov O. V. (2008). Nauchnye osnovy konstruktorsko-tekhnologicheskogo proektirovaniia litykh detalei DVS. [Scientific bases of design and technological design of the internal combustion engine of casting parts]. Doctor's thesis: 05.05.03. Kharhov: NTU "HPI". [in Russian].
3. Balandin G. F. (1976). Osnovy teorii formirovaniia otlivki. [Fundamentals of the theory of formation of castings]. Part 1. Moscow: Mashinostroiieniie. [in Russian].
4. Anisovich G. A. (1960). Zatverdevaniie otlivok. [Solidification of castings]. Minsk: Nauka i tekhnika. [in Russian].
5. Guliaev B. B. (1976). Teoriia liteinykh protsessov. [Theory of casting processes]. L.: Mashinostroiieniie. [in Russian].
6. Kurdiymov A. V., Pikunov M. V., Chursin V. M., Bibikov E. L. (1986). Proizvodstvo otlivok iz splavov tsvetnykh metallov. [Production of castings from non-ferrous alloys]. Moscow: Metallurgiiia. [in Russian].
7. Kurdiymov A. V., Pikunov M. V., Chursin V. M. (1982). Liteinoie proizvodstvo tsvetnykh i redkikh metallov: uchebnoe posobie dlia vuzov. [Foundry of non-ferrous and rare metals]. Metallurgiiia. [in Russian].
8. Alekhin V. I., Belogub A. V., Marchenko A. P., Akimov O. V. (2010). Modelirovaniie mest proiavlenniia defektov usadochnogo kharaktera pri proektirovanii litykh detalei DVS. [Modeling places manifestation shrinkage type defects in the design of the internal combustion engine of cast parts]. Metall i lit'e Ukrainy. № 12, pp. 27-30. [in Russian].
9. Veinik A. I. (1960). Teoriia zatverdevaniia otlivki. [The theory of solidification of cast]. Moscow: Mashgiz. [in Russian].
10. Veinik A. I. (1962). Teplovyie osnovy teorii lit'ia. [Heat molding theory basics]. Moscow: Mashgiz. [in Russian].
11. Grachev Yu. P., Plaksin Yu. M. (2005). Matematicheskie metody planirovaniia eksperimentov. [Mathematical methods for design of experiments]. Moscow: DeLiprint. [in Russian].
12. Kublanov M. S. (2014). Matematicheskie modelirovaniie. Metodologiiia i metody razrabotki matematicheskikh modelei mekhanicheskikh sistem i protsessov: uchebnoie posobie. [Math modeling. Methodology and methods of development of mathematical models of mechanical systems and processes]. Part II. [3-d Ed.]. [in Russian].
13. Rozin L. A. (2000). Metod konechnykh elementov. [Finite element technique]. Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal. Vol. 6, № 4, pp. 120-127. [in Russian].

14. Tikhomirov M. D., Komarov I. A. (2002). Osnovy modelirovaniia liteinykh protsessov. Chto luchshe – metod konechnykh elementov ili metod konechnykh raznostei. [Fundamentals of modeling of foundry processes. Which is better - the finite element method or finite difference method]. Liteinoie proizvodstvo. № 5, pp. 22-28. [in Russian].
15. Smirnov E. M., Zaitsev D. K. (2004). Metod konechnykh ob'emov v prilozhenii k zadacham gidrogazodinamiki i teploobmena v oblastiah slozhnoi geometrii. [Finite volume method as applied to fluid dynamics and heat transfer in complex geometry areas]. Nauchno-tehnicheskiiye vedomosti SPbGPU. № 2, pp. 36. [in Russian].
16. Brebbia K., Uoker S. (1982). Primeneniie metoda granichnykh elementov v tekhnike. [Application of boundary element method in engineering]. Moscow: Izd. Mir. [in Russian].
17. Tikhomirov M. D. (2004). Sravnitel'nyi obzor naiboleie izvestnykh sistem komp'iuternogo modelirovaniia liteinykh protsessov: materialy nauchno-prakticheskogo seminara "Novye podkhody k podgotovke proizvodstva v sovremennoi liteinoi promyshlennosti". ["New approaches to pre-production in modern foundry industry"]. [in Russian].
18. HU H. et al. (2006). Application of the software ProCAST in the casting of solidification simulation. [J]. Materials Science and Technology. Vol. 3, p. 019.
19. Vaiss K., Ogorodnikova O. M., Popov A. V. (2002). Computerized engineering analysis of castings in the WinCast Program. Metal casting industry trends. Liteinoie Proizvodstvo (Russia). Vol. 7, pp. 25-26.
20. Turishchev V. (2005). Modelirovaniie liteinykh protsessov: chto vybrat'? [Simulation of casting processes: what to choose?]. Liteinoie proizvodstvo. № 11, pp. 54-55. [in Russian].
21. Tarasevich Yu. Yu. (2002). Perkoliaciia: teoriia, prilozheniia, algoritmy. [Percolation theory, applications, algorithms]. Moscow: Editorial URSS. [in Russian].

Анотація

Ідріс Гарба Гусау, Акімов О. В., Марченко А. П.

Комп'ютерно-інтегроване моделювання процесів охолодження і кристалізації поршнів у кокілі

Rozglyanuto proces modelyuvannya procesiv oholozhennia i kristalizatsii metalu v formi iz zastosuvanniam tekhnologii spil'nogo komp'iuterno-integrovanoogo proektuvannya pri litta porshniv u kokil'.

Ключові слова

технологія лиття, комп'ютерно-інтегроване проектування, моделювання процесів лиття, двигун внутрішнього згорання, поршень

Summary

Idris Garba Gusau, Akimov O., Marchenko A.

Computer-Integrated simulation of the process of cooling and crystallization of pistons in chill

It was considered the process of simulation cooling and crystallization of metal in the form by using concerted technology of computer-integrated design when moulding pistons in chill.

Keywords

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

Поступила 10.04.2016