
ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 621.74:621.436

Л. С. Золотарь, Г. Г. Идрис, О. В. Акимов, А. Н. Горощенко,
Л. А. Салтыков

Харьковский национальный политехнический университет (ХПИ), Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЬЯ НА РАЗМЕРЫ ГАЗОУСАДОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ЛИТЫХ ПОРШНЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы изучения влияния технологических параметров литья на процесс образования литейных дефектов газоусадочного характера. С применением технологии совместного компьютерно-интегрированного проектирования получены математические модели, характеризующие влияние технологических параметров литья в кокиль на размер газоусадочных дефектов.

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

Розглянуті питання вивчення впливу технологічних параметрів литва на процес утворення ливарних дефектів газоусадкового характеру. Із застосуванням технології спільного комп'ютерно-інтегрованого проектування отримані математичні моделі, що характеризують вплив технологічних параметрів литва в кокиль на розмір газоусадкових дефектів.

Ключові слова: технологія литва, комп'ютерно-інтегроване проектування, двигун внутрішнього згорання, поршень.

The problems of studying the influence of process parameters on molding process of the formation of casting defects are presented. Mathematical models describing the influence of technological parameters of casting in a metal mold to size defects with the application of computer integrated design technology are obtained.

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

Введение

Исследование влияния размеров газоусадочных дефектов, возникающих при производстве поршней, на качество детали является важным аспектом при оценке прочностной надежности поршня. В технических требованиях существующей конструкторской документации и технических условиях к литым поршням [1-4] предусмотрено не допускать к использованию детали, которые имеют более трех-пяти (в зависимости от модели поршня) газоусадочных пор на заданных поверхностях и размеры этих дефектов не должны превышать 0,1-0,2 мм. Поэтому задача оценки

влияния технологических параметров литья на механизм образования литейных дефектов является актуальной.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Исследованию влияния технологических факторов на механизм образования литейных дефектов газоусадочного характера посвящены многочисленные работы [5-24].

Работы [5-7] относятся к анализу влияния технологических факторов литья на прочность и формирование напряжений в отливках.

Авторами [8] проведено математическое моделирование управления качеством литья в процессах формирования отливки в песчаной форме.

Методика конструкторско-технологического проектирования [9, 10] и выполняемое на ее основе компьютерно-интегрированное моделирование [10-12] позволяет учитывать влияние технологических факторов на протекание литейных процессов.

Авторы работ [13, 14] компьютерно-интегрированное проектирование поршней выполняли с целью учета влияния литейных дефектов на прочностную надежность.

Тепловая теория литья дает возможность исследовать влияние конструктивных и технологических параметров кокилей на условия формирования отливок.

С целью снижения теплового удара и перепада температур в форме и соответственно величин внутренних напряжений в ней и предотвращения, таким образом, ее разрушения, на ее поверхность наносят слой теплоизолирующего покрытия. Это покрытие также значительно влияет на кинетику теплоотвода от отливки и продолжительность ее затвердевания.

Таким образом, выбор, например, состава и толщины покрытия кокиля и толщины стенки формы, способа и режима ее охлаждения позволяет в широких пределах изменять термические условия формирования отливки.

Наиболее часто управление термическими условиями литья в кокили осуществляют через коэффициент теплопроводности, толщину покрытия и режим охлаждения кокиля. Изменяя толщину и теплопроводность огнеупорного покрытия в соответствующих частях кокиля можно создавать условия для направленного затвердевания отливки, то есть регулировать скорость ее охлаждения в отдельных местах [15-17].

Огнеупорное покрытие уменьшает интенсивность отвода теплоты от расплава и отливки пропорционально тепловой проводимости огнеупорного покрытия и разности температур поверхности отливки и поверхности кокиля.

При естественном охлаждении формы продолжительность затвердевания почти пропорциональна толщине покрытия. По мере увеличения толщины кокиля роль внешнего его охлаждения уменьшается.

Принудительное охлаждение кокиля тем эффективнее повышает скорость затвердевания и охлаждения отливки, чем меньше термическое сопротивление на ее поверхности. Поэтому принудительное охлаждение формы целесообразно сочетать с уменьшением толщины покрытия и кокиля и повышением коэффициента теплопроводности покрытия [17].

Многие авторы исследовали влияние толщины стенки кокиля на условия охлаждения отливки [7, 13, 16, 18, 19]. Теоретически и экспериментально показано, что влияние толщины стенки кокиля на процесс затвердевания отливки связано с относительными и абсолютными размерами отливки, ее формой, температурными и другими условиями процесса теплообмена.

При увеличении от нуля толщины кокиля, по сравнению с толщиной стенки отливки, время полного затвердевания металла вначале несколько возрастает (скорость затвердевания падает), что объясняется повышением термического сопротивления формы передаче теплоты от отливки к окружающей среде. Затем кривая времени полного затвердевания проходит через максимум и продолжительность затвердевания резко падает. Особенности затвердевания при довольно большой толщине стенки кокиля объясняются повышенной

Затвердевание сплавов

теплоаккумулирующей способностью формы. При больших значениях толщины стенки кокиля последняя величина практически перестает влиять на продолжительность и скорость затвердевания.

Влияние толщины стенки кокиля на формирование отливки зависит от кривизны стенки кокиля. В массивном цилиндрическом кокиле с полостью малого диаметра дивергенция температурного поля у поверхности соприкосновения с отливкой значительно больше, чем в кокиле с полостью большого диаметра [19].

Чем выше дивергенция, тем больше плоскость теплоотвода. Поэтому скорость теплоотвода в кокиль при большом диаметре отливки значительно ниже, чем при малом диаметре.

Влияние начальной температуры кокиля на термические условия формирования отливки проявляется следующим образом. В тонкостенной форме начальная температура кокиля практически не влияет на тепловой процесс. Чем больше относительная масса формы, тем заметнее роль начальной ее температуры. В условиях естественного охлаждения при $X_3/X_1 > 1$ (где X_1 и X_3 – толщины стенок отливки и кокиля соответственно), эта роль становится определяющей [9, 13, 20].

Известно, что перегрев сплава перед заливкой влияет на все виды усадки вследствие увеличения разности объемов жидкого и твердого металлов и изменения кинетики роста первичных выделений дендритов. Обычно отмечают увеличение объема усадочной раковины при одновременном возрастании пористости и грубозернистости (в этом заключается одна из причин, заставляющих ограничивать перегрев металла перед заливкой) [11, 21].

Скорость охлаждения отливки изменяет ее кристаллическое строение – форму, размеры и разветвленность дендритов, а также размер структурных составляющих. Вследствие этого с увеличением скорости охлаждения возрастает плотность сплава, увеличивается объем усадочной раковины (за счет сокращения пористости), несколько возрастает линейная усадка [17, 22].

Внешнее давление оказывает сильное влияние на перераспределение усадочных пустот между порами и раковиной. Кристаллизация при повышенном давлении используется как технологический прием для снижения пористости и повышения плотности и герметичности отливок; наружная усадка при этом несколько возрастает [17, 23].

Газонасыщенность металла обычно приводит к резкому увеличению пористости (газовой и газоусадочной), при одновременном уменьшении размеров усадочной раковины снижается также линейная усадка. Повышенное газосодержание резко ухудшает комплекс свойств металла и отливки и поэтому недопустимо [5, 7, 24].

Многочисленность и разнообразие технологических и конструктивных параметров, влияющих на механизм образования литейных дефектов газоусадочного характера и требования контроля их размеров, обуславливает необходимость выполнения исследований по оценке влияния технологических параметров литья на размеры газоусадочных дефектов в поршнях с применением технологии совместного компьютерно-интегрированного проектирования.

Цели и задачи исследования

Целью исследования является определение технологических параметров литья, наиболее существенно влияющих на размеры дефектов газоусадочного характера в поршнях двигателей с воспламенением топлива от сжатия, а также получение математических зависимостей, позволяющих регулировать размеры газоусадочных дефектов в допустимых технических требованиями пределах.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– в процессе предварительных исследований определены технологические параметры, в наибольшей степени представляющие интерес при изучении направленного затвердевания;

– для оценки влияния технологических факторов литья на размеры газоусадочных дефектов в местах их расположения, был спланирован численный эксперимент с использованием результатов моделирования в LVMFlow;

Затвердевание сплавов

– выполнено математическое моделирование, в результате которого получены зависимости размеров газосадовочных дефектов от технологических параметров литья;

– 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) выполняли с учетом требований, предъявляемых к отливкам, получаемым в кокиле с применением возможностей программ Solid Works и LVM Flow.

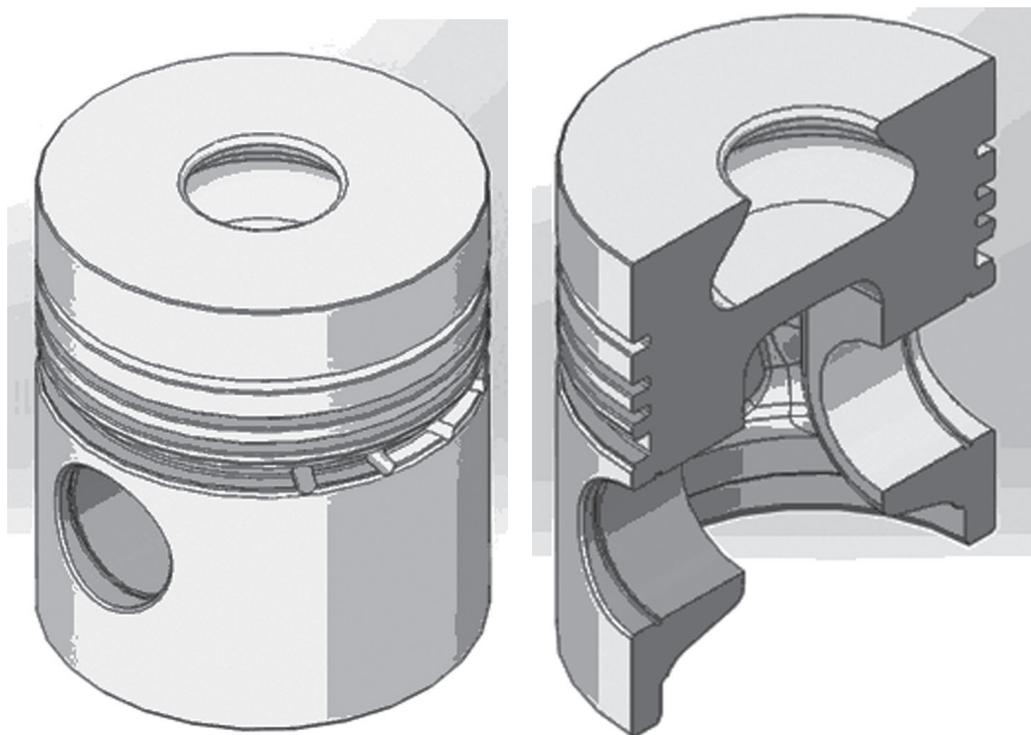


Рис. 1. 3D-модель литой детали поршня Д 240-1004021

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, С420.
 - 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 250-280 °С;
 - температура расплава перед заливкой в форму 710 °С;

Затвердевание сплавов

– 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.

Для оценки влияния технологических факторов литья на размеры газоусадочных дефектов в местах их расположения, был спланирован численный эксперимент с использованием результатов моделирования в LVMFlow.

Применение метода планирования эксперимента базируется на следующих полученных результатах:

– с помощью моделирования литейных процессов в ИКС LVM Flow, подтвержденного экспериментальным исследованием на производстве, определены места расположения газоусадочных дефектов и значения их предельных размеров;

– создана геометрическая 3D модель поршня с дислоцированными дефектами. Дефект моделировали как сферу выбранного диаметра ($\varnothing 0,3-1,3$ мм).

Используемый метод планирования эксперимента включает следующие этапы: выбор факторов планирования; выбор количества уровней возможных размеров; создание математической модели эксперимента; выбор точек планов эксперимента; обработка результатов планирования.

Характеристика процесса возникновения газоусадочных дефектов в обнаруженных местах расположения выполнена с помощью метода наименьших квадратов.

В качестве функции отклика взят диаметр дефекта в каждой из зон поршня, наиболее подверженных усадочным явлениям, а именно: I – массив бобышки под пальцевым отверстием (рис. 2, а); II – массив днища поршня под камерой сгорания (рис. 2, б) и III – область перехода от корпуса к днищу (рис. 2, в).

Предварительные исследования показали, что наибольший интерес при изучении процесса направленного затвердевания представляют такие факторы: толщина слоя огнеупорного покрытия X_1 , теплопроводность покрытия X_2 , толщина стенки кокиля X_3 и начальная температура кокиля X_4 .

Уровни факторов и интервалы их варьирования для литого поршня определены исходя из результатов инженерного моделирования литейных процессов с применением LVM Flow и экспериментальных исследований на производстве (таблица).

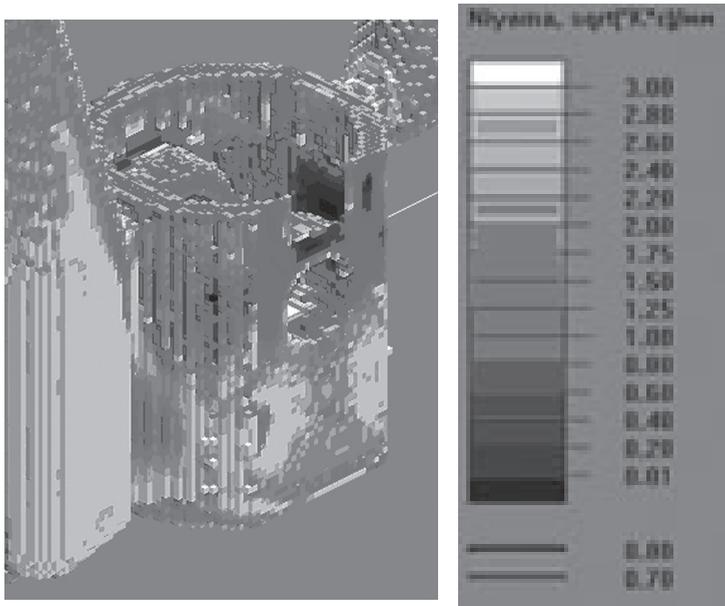
Анализ имеющихся сведений свидетельствует о том, что наибольший интерес представляют линейные эффекты и парные взаимодействия. Наиболее простой план, допускающий оценку всех коэффициентов такой модели – полный факторный эксперимент при двух уровнях факторов.

Результаты исследований

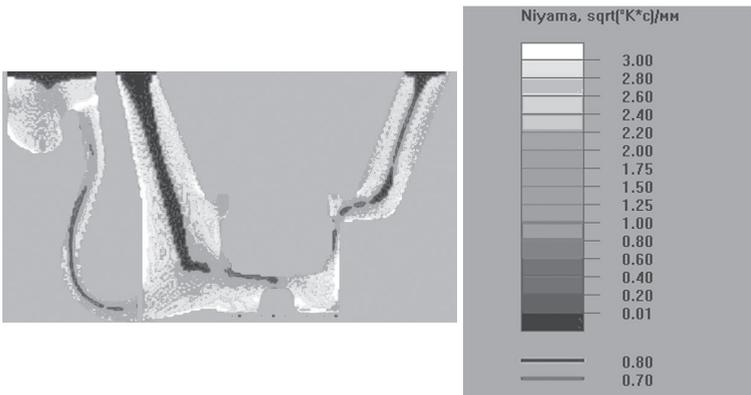
Обработка результатов эксперимента проведена с целью определения коэффициентов полинома, аппроксимирующего зависимость размеров дефектов от конструктивных и технологических факторов и для оценки адекватности полученной зависимости.

Анализ результатов эксперимента завершен интерпретацией моделей в терминах объекта исследования.

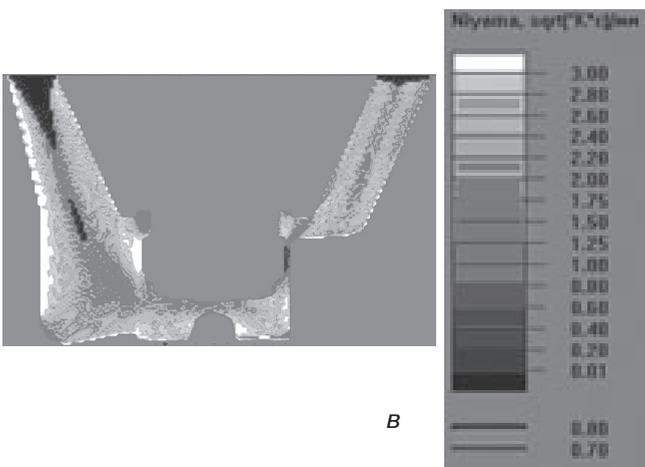
Задачу интерпретации полученных моделей решали в несколько этапов. Опыт подтвердил предположения о том, что значимыми являются не только линейные эффекты, а и некоторые парные взаимодействия, причем в рассматриваемых моделях выявлены некоторые отличия в проявлениях влияющих факторов.



а



б



в

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

Уровни и интервалы варьирования факторов

Параметры	Факторы			
	толщина слоя огнеупорного покрытия, X_1 , м	теплопроводность покрытия X_2 , Вт/м·К	толщина стенки кокиля, X_3 , м	начальная температура кокиля X_4 , К
Основной уровень	0,0004	1,1	0,04	423
Интервал варьирования I_i	0,0002	0,8	0,02	130
Верхний уровень $X_{i \max}$	0,0006	1,90	0,06	553
Нижний уровень $X_{i \min}$	0,0002	0,3	0,02	293

Результаты исследований представлены в виде математических зависимостей, характеризующих влияние технологических параметров на размер газоусадочных дефектов.

Модель $Y_I = 5,81 \cdot 10^{-4} - 0,8125 \cdot 10^{-4} x_1 - 0,6875 \cdot 10^{-4} x_2 - 0,8125 \cdot 10^{-4} x_1 x_2 + 3,1875 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 - 0,8125 \cdot 10^{-4} x_1 x_4 - 1,4375 \cdot 10^{-4} x_2 x_3 - 2,288 \cdot 10^{-4} x_3 x_4 - 1,313 \cdot 10^{-4} x_1 x_2 x_3 x_4$ описывает влияние конструктивных и технологических параметров литья на процесс образования газоусадочных дефектов в массиве бобышки под пальцевым отверстием. Из четырех факторов, линейно влияющих на функцию отклика в этой зоне, выделились два: толщина слоя огнеупорного покрытия x_1 и теплопроводность покрытия x_2 , причем толщина слоя огнеупорного покрытия, судя по количественной оценке коэффициентов, оказалась наиболее сильно влияющим фактором. Характер влияния обоих факторов x_1 и x_2 одинаков: увеличение их значений ведет к уменьшению отклика (размера газоусадочных дефектов). Толщина стенки кокиля x_3 и начальная его температура x_4 в выбранных интервалах варьирования не оказывают значимого влияния на отклик (коэффициенты a_3 и a_4 – незначимы), но влияние этих факторов весьма сильно проявилось в парных взаимодействиях. В данном случае, эффекты совместного влияния превосходят даже линейные.

Модель $Y_{II} = 7,38 \cdot 10^{-4} - 1,75 \cdot 10^{-4} x_2 - 1,875 \cdot 10^{-4} x_1 x_2 + 1,875 \cdot 10^{-4} x_1 x_4 + 1,625 \cdot 10^{-4} x_1 x_2 x_3 x_4$ описывает влияние параметров литья на образование газоусадочных дефектов в массиве днища поршня под камерой сгорания. Из четырех факторов, линейно влияющих на функцию отклика, выделился один – теплопроводность покрытия кокиля x_2 , причем повышение теплопроводности покрытия кокиля ведет к уменьшению размеров газоусадочных дефектов. Толщина слоя огнеупорного покрытия x_1 , толщина стенки кокиля x_3 и начальная температура кокиля x_4 в выбранных интервалах варьирования не оказывают значимого влияния на отклик, однако влияние факторов x_1 и x_4 весьма сильно проявилось в парных взаимодействиях. Эффекты совместного влияния факторов x_1 и x_2 , а также x_1 и x_4 превосходят линейный эффект, а фактор толщина стенки кокиля x_3 заметно проявляется во взаимодействии четырех факторов.

Модель $Y_{III} = 11,375 \cdot 10^{-4} + 2,25 \cdot 10^{-4} x_2 + 3,625 \cdot 10^{-4} x_1 x_2 - 2 \cdot 10^{-4} x_1 x_4 - 2,5 \cdot 10^{-4} x_3 x_4$ описывает влияние конструктивных и технологических параметров литья на процесс образования газоусадочных дефектов в области перехода от корпуса к днищу. Из четырех факторов, линейно влияющих на функцию отклика, выделился один: теплопроводность покрытия x_2 , причем, судя по знаку коэффициента, характер зависимости функции отклика от соответствующего фактора иной, чем в моделях Y_I и Y_{II} : повышение теплопроводности покрытия в этой области влечет увеличе-

ние размеров газоусадочных дефектов. Толщина слоя огнеупорного покрытия x_1 , толщина стенки кокиля x_3 и начальная температура кокиля x_4 в выбранных интервалах варьирования не оказывают значимого влияния на отклик, хотя их влияние весьма сильно проявляется в парных взаимодействиях: эффект совместного влияния факторов x_1 и x_2 превосходит даже линейный эффект, а эффект взаимодействия факторов x_1 и x_3 несколько уступает всем остальным значимым эффектам.

Места расположения и размеры газоусадочных дефектов, выявленные в результате экспериментального исследования, подтверждают результаты компьютерно-интегрированного моделирования.

Установленные зависимости дают возможность регулировать размеры газоусадочных дефектов в допустимых технических требованиями пределах изменением технологических параметров литья.

Выводы

- Наибольший интерес при изучении процесса направленного затвердевания представляют толщина слоя огнеупорного покрытия, теплопроводность покрытия, толщина стенки кокиля и начальная температура кокиля.
- Выполнено математическое моделирование, в результате которого получены зависимости размеров газоусадочных дефектов от технологических параметров литья.
- Установленные зависимости дают возможность регулировать размеры газоусадочных дефектов в допустимых технических требованиями пределах изменением технологических параметров литья.



Список литературы

1. Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия: ГОСТ 20000-88. – URL: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim.
2. Дизели автомобильные. Общие технические условия: ГОСТ 23465-79. – URL: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750_avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim.
3. Автомобильные транспортные средства. Поршни алюминиевые двигателей. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 53558 – 09. – URL: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim.
4. Дизели автомобильных транспортных средств. Общие технические условия: ГОСТ Р 51998-2002. – URL: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim.
5. *Альохін В. І., Белогуб О. В., Акімов О. В.* Аналіз впливу технологічних дефектів на міцність литих поршнів ДВЗ //Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 1.
6. *Пензев П. С. и др.* Анализ качества литого блок-картера автомобильного дизеля 4ДТНА1 с использованием инженерного моделирования //Двигатели внутреннего сгорания. – 2015. – № 2.
7. *Акимов О. В. и др.* Анализ технологических факторов, существенно влияющих на формирование напряжений в литых деталях машин //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6 (7). – С. 43-47.
8. *Кравченко В. П. и др.* Математическое моделирование управления качеством литья в процессах формирования отливки в песчаной форме
9. *Акимов О. В.* Применение методов конструкторско-технологического проектирования деталей ДВС в моделировании литейных процессов изготовления автомобильных поршней //Цветные металлы. – 2010. – № 8.
10. *Алехин В. И. и др.* Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС //Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 2.
11. *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.

12. *Алехин В. И.* Моделирование литейных процессов при изготовлении автомобильных поршней // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Цветные металлы». – 2010. – №. 8. – С. 81-83.
13. *Алехин В. И.* и др. Моделирование мест проявления дефектов усадочного характера при проектировании литых деталей ДВС // Металл и литье Украины. – 2010.
14. *Альохін В. І.* Комп'ютерно-інтегроване проектування поршнів двз з урахуванням впливу ли варних дефектів на міцнісну надійність : дис. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2013.
15. *Краснокутский Е. А.* The simulation of crystallization in a metal mold cast parts // Technology audit and production reserves. – 2012. – Т. 1. – №. 1 (3). – С. 3-8.
16. *Савченко Ю. Э.* Use of computer-integrated systems and technology in the production of pistons // Technology audit and production reserves. – 2012. – Т. 1. – №. 1 (3). – С. 8-13.
17. *Пономаренко О. И., Тренев Н. С.* Computer modeling of crystallization processes as a reserve of improving the quality of pistons of ICE // Technology audit and production reserves. – 2013. – Т. 6. – №. 2 (14). – С. 36-40.
18. *Садоха М. А.* Определение технологических параметров производства отливок поршней высоконагруженных дизельных двигателей // Литье и металлургия. – 2011. – №. 3 (62) Спецвыпуск.
19. *Колокольцев В. М., Синицкий Е. В., Савинов А. С.* Моделирование температурных полей при получении отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2015. – № 3 (51).
20. *Садоха М. А.* Исследование технических параметров кокилей для получения отливок поршней // Литье и металлургия. – 2011. – № 3 (62) Спецвыпуск.
21. *Акімов О. В.* Совершенствование технологических процессов изготовления литых деталей роторов для повышения эксплуатационных характеристик тягового электропривода // Проблемы машиностроения. – 2014. – Т. 16. – № 5. – С. 7-12.
22. *Садоха М. А., Мельников А. Я.* Энергосбережение при производстве отливок из алюминиевых сплавов // Литье и металлургия. – 2008. – № 2.
23. *Котлярский Ф. М.* Влияние давления на характер газоусадочных дефектов в непропитываемых узлах отливок // Процессы литья. – 2013. – № 1. – С. 29-32.
24. *Котлярский Ф. М.* Взаимодействие отливок из алюминиевых сплавов с металлической формой // Процессы литья. – 2014. – № 1. – С. 27-35.



References

1. Dizeli traktornye i kombaynovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya: GOST 20000-88 [*Diesels of tractors and combines. General technical specifications: GOST 20000-88*]. Available : http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim. [in Russian].
2. Dizeli avtomobilnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya: GOST 23465-79 [*Diesels of cars. General technical specifications: GOST 23465-79*]. Available: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim. [in Russian].
3. Avtomobilnye transportnye sredstva. Porshni aluminievye dvigateley. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy: GOST 53558-09 [*Motor vehicles. The aluminum pistons of engines. General technical requirements and test methods: GOST 53558-09*]. Available : http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim. [in Russian].
4. Dizeli avtomobilnykh transportnykh sredstv. Obshchie tekhnicheskie usloviya: GOST 51998-2002 [*Diesels of motor vehicle. General technical specifications: GOST 51998-2002*]. Available : http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim. [in Russian].
5. *Alekhin V. I., Belogub O. V., Akimov O. V.* (2012) Analiz vplyvu tekhnolohichnykh defektiv na mitsnist lytykh porshniv DVZ [*Analysis of the impact of technological defects on the cast piston strength DVZ*]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya, no. 1. [in Ukrainian].
6. *Penzev P. S.* et al. (2015) Analiz kachestva litogo blok-kartera avtomobilnogo dizelya 4DTNA1 s ispolzovaniem inzhenerenogo modelirovaniya [*Analysis of the quality of cast blok-karter automotive diesels 4DTNA1 with using engineering simulation*]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya, no. 2. [in Russian].
7. *Akimov O. V.* et al. (2015) Analiz tekhnologicheskikh faktorov, sushchestvenno vliyayushchikh na formirovanie napryazheniy v litykh detal'yakh mashin [*Analysis of the technological factors that*

- significantly affect the formation of stresses in the cast machine parts]. Vostochno–Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, no. 6 (7), pp. 43-47. [in Russian].
8. Kravchenko V. P. et al. Matematicheskoe modelirovaniye upravleniya kachestvom litya v protsessakh formirovaniya otlivki v peschanoy forme [*Mathematical modeling of the casting quality control in the formation of a sand mold casting*]. [in Russian].
 9. Akimov O. V. (2010) Primeneniye metodik konstruktorskotekhnologicheskogo proektirovaniya detaley DVS v modelirovanii litynykh protsessov izgotovleniya avtomobilnykh porshney [*Using the methods of engineering and technological design of the engine components in the simulation of casting processes of automotive pistons production*]. Tsvetnye metally, no. 8. [in Russian].
 10. Alekhin V. I. et al. (2009) Kompyuternointegrirovannoye modelirovaniye litynykh protsessov v avtomobilnykh porshnyakh na osnove konstruktorsko–tekhnologicheskoy metodiki proektirovaniya detaley DVS [*Computer integrated casting simulation in automotive pistons on the basis of design and technological methods of designing parts DVS*]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya, no. 2. [in Russian].
 11. Alekhin V. I., Akimov O. V., Marchenko A. P. (2010) Kompyuternoye modelirovaniye protsessov pri proizvodstve litykh detaley dvigatelya [*Computer modeling of processes in the production of cast parts engine*]. Mezhdunarodnyy nauchnotekhnicheskyy zhurnal «Liteynoye proizvodstvo», no. 9, pp. 31-33. [in Russian].
 12. Alekhin V. I. (2010) Modelirovaniye litynykh protsessov pri izgotovlenii avtomobilnykh porshney [*Simulation of casting processes for making automotive pistons*]. Yezhemesyachnyy nauchnotekhnicheskyy i proizvodstvennyy zhurnal «Tsvetnye metally», no. 8, pp. 81-83. [in Russian].
 13. Alekhin V. I. et al. (2010) Modelirovaniye mest proyavleniya defektov usadochnogo kharaktera pri proektirovanii litykh detaley DVS [*Modeling places manifestation shrinkage type defects in the design of cast parts*]. Metall i lite Ukrainy. [in Russian].
 14. Alekhin V. I. (2013) Kompiuterno-intehrovane proektuvannya porshniv dvz z urakhuvanniam vplyvu lyvarnykh defektiv na mitsnisnu nadiinist [*Computer integrated design pistons for the effect of casting defects on the strength reliability*]. PhD Thesis: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». [in Ukrainian].
 15. Krasnokutskiy Ye. A. (2012) The simulation of crystallization in a metal mold cast parts. Technology audit and production reserves, T. 1, no. 1 (3), pp. 38. [in English].
 16. Savchenko Yu. E. (2012) Use of computerintegrated systems and technology in the production of pistons. Technology audit and production reserves, T. 1, no.1 (3), pp. 8-13. [in English].
 17. Ponomarenko O. I., Trenev N. S. (2013) Computer modeling of crystallization processes as a reserve of improving the quality of pistons of ICE. Technology audit and production reserves, T. 6, no. 2 (14), pp. 36-40. [in English].
 18. Sadokha M. A. (2011) Opredeleniye tekhnologicheskikh parametrov proizvodstva otlivok porshney vysokonagruzhennykh dizelnykh dvigateley [*Determination of technological parameters of production of castings of pistons heavy duty diesel engines*]. Lite i metallurgiya (spetsvypusk), no. 3 (62). [in Russian].
 19. Kolokoltsev V. M., Sinitskiy Ye. V., Savinov A. S. (2015) Modelirovaniye temperaturnykh poley pri poluchenii otlivok [*Modeling of temperature fields in the preparation of castings*]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova, no. 3 (51). [in Russian].
 20. Sadokha M. A. (2011) Issledovaniye tekhnicheskikh parametrov kokiley dlya polucheniya otlivok porshney [*Investigation of the technical parameters of molds for casting pistons*]. Lite i metallurgiya, (spetsvypusk), no. 3 (62). [in Russian].
 21. Akimov O. V. (2014) Sovershenstvovaniye tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya litykh detaley rotorov dlya povysheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik tyagovogo elektroprivoda [*Improving technological processes to making the cast parts of rotors to improve operating characteristic of the traction electric drive*]. Problemy mashinostroeniya, T. 16, no. 5, pp. 7-12. [in Russian].
 22. Sadokha M. A., Melnikov A. Ya. (2008) Energoberezheniye pri proizvodstve otlivok iz alyuminievykh splavov [*Energy savings in the production of castings made of aluminum alloys*]. Lite i metallurgiya, no. 2. [in Russian].
 23. Kotliarskii F. M. (2013) Vliyaniye davleniya na kharakter gazousadochnykh defektov v nepropityvaemykh uzlakh otlivok [*The effect of pressure on the nature of gas shrinkage defects in not impregnation nodes castings*]. Protsesty litya, no. 1, pp. 29-32. [in Russian].
 24. Kotliarskii F. M. (2014) Vzaimodeystviye otlivok iz alyuminievykh splavov s metallicheskoy formoy [*Interaction of castings of aluminum alloys with metal shape*]. Protsesty litya, no. 1, pp. 27-35. [in Russian].

Поступила 21.11.2016