



ОБЗОР КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРШНЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Акимов Олег Викторович, доктор технических наук, профессор
Заведующий кафедрой, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

Идрис Гарба Гусау

Аспирант, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Марченко Андрей Петрович

Проректор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: dvs@kpi.kharkov.ua

Розглянуто технологічні особливості виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) з урахуванням експлуатаційних особливостей, що формують функціональні вимоги до матеріалу поршня. Приведено рекомендації щодо вибору систем конструкторсько-технологічної підготовки виробництва поршнів, що дозволяють створювати універсальні технології сумісного комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів ДВЗ.

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

Рассмотрены технологические особенности изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с учетом эксплуатационных особенностей, формирующих функциональные требования к материалу поршня. Приведены рекомендации по выбору систем конструкторско-технологической подготовки производства поршней, позволяющих создавать универсальные технологии совместного компьютерно-интегрированного проектирования поршней ДВС.

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

1. Введение

Конструирование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с учетом существующих сегодня жестких эксплуатационных требований базируется на фундаментальных подходах, описанных в основном в работах [1–6].

Так как наиболее ответственной деталью ДВС является поршень, именно к нему предъявляется комплекс повышенных прочностных требований. Для прочностных расчетов поршней используется заданная конструкция детали из заданного материала, однако при этом недостаточно учитывается влияние технологических факторов на прочностные характеристики поршней ДВС. Результаты

расчетов и испытаний циклической прочности недостаточно точны и требуют дополнительных исследований, в которых должны быть учтены реальные литейные дефекты в теле поршня. В связи с этим разработка технологии получения поршней ДВС с использованием компьютерно-интегрированного проектирования и учетом влияния технологических факторов на прочностную надежность поршней, является актуальной научно-прикладной задачей.

2. Цель и задачи исследования

Целью обзора является определение современных тенденций в технологии проектирования

и изготовления поршней ДВС. Для достижения данной цели решались следующие задачи:

→ обзор существующих способов изготовления поршней;

→ обзор компьютерно-интегрированных систем для конструкторско-технологической подготовки производства.

3. Обзор современных тенденций в технологии компьютерно-интегрированного проектирования и изготовления поршней ДВС

3.1. Современные способы изготовления поршней. В настоящее время для изготовления поршней применяется несколько технологий, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки: литье в кокиль с использованием литейных поршневых сплавов, горячая штамповка деформируемых сплавов, реже применяется штамповка в жидкой фазе, литье под низким давлением и изотермическое прессование [7–8]. Выбор того или иного варианта, в том числе, требует учета функциональных требований к материалу поршня. Так, например, выполнение функции передачи давления газов к коленчатому валу с помощью шатуна требует от поршня высокой прочности и жесткости конструкции, а также высокой твердости материала поршня. Рассеивание теплоты сгорания, передаваемой на днище поршня, особо требует малой величины теплопоглощения, высокая теплопроводности и большой теплоемкости материала поршня и т. д. [9]. Кроме этого, выбор определяется уровнем требований к качеству материала (механическим свойствам, точности размеров, чистоте поверхности), техническими возможностями каждого из способов литья и экономическими соображениями (необходимостью изготовления отливки с минимальными затратами труда, материалов и минимальной себестоимостью) [10].

Учитывая недостатки технологии получения литой заготовки поршня в разовой песчано-глинистой форме [11], зачастую применяют литье в кокиль. Внутренняя поверхность поршня при этом формируется стержнем, который может быть цельным (моноклин) или состоять из 3–7 частей (клиньев). Наружная поверхность поршня формируется матрицей, образованной несколькими частями (обычно двумя). Иногда используется стержень, формирующий днище с камерой сгорания. Гибкость формы позволяет вносить изменения в конструкцию отливаемой детали и внедрять в отливку другие детали, такие как нирезистовые вставки или разрушаемые стержни. Готовые поршни обладают хорошими механическими свойствами и постоянными размерами [10]. В настоящее время существует два принципиально различных способа литья поршней в кокиль: литье днищем вверх и литье днищем вниз. При литье днищем

вверх преимущественно используется верхняя подача металла с установкой верхней прибыли — это создает более благоприятные условия для питания утолщенной части поршня — днища. Однако верхняя подача металла ограничивается высотой отливки, так как при литье высоких поршней создается опасность разбрызгивания металла, загрязнения его неметаллическими включениями и образования заворотов. Сифонный подвод металла уменьшает эффективность использования верхней прибыли. Такой способ литья может быть успешно использован только в случае простой конфигурации внутренней полости отливки. Как правило, его применяют только для мелких поршней (с диаметром до 100 мм) [12]. Большинство поршней получают литьем днищем вниз. В этом случае питание поршня обеспечивается из массивной боковой прибыли. Суммарная масса прибылей составляет обычно 40–60 % от массы поршня и зависит от его конструкции и материала. В крупных поршнях кольцевая прибыль ставится и на юбке. Питатель обычно применяют щелевой, имеющий высоту, почти равную высоте поршня. Иногда делают более низкие питатели, подводящие металл только в нижнюю часть. Стояк выполняется таким, чтобы обеспечить спокойное заполнение металлом формы и предотвратить попадание окисных плен. Распространенными являются стояки типа «гусиной шейки». Применяют также змееобразные и простые наклонные [13].

Для литья поршней из заэвтектических сплавов применяется «карандашная» литниковая система. В этом случае стояк состоит из четырех каналов, расположенных в половинках кокиля в шахматном порядке. Ввиду близкого расположения каналов (не более 2 мм) охлаждение в них замедляется. Перемычки между каналами имеют достаточную толщину (до 14 мм), чтобы противостоять выкрашиванию из-за разгара и трещин. В нижней своей части каналы соединяются общим щелевым каналом с меньшей площадью поперечного сечения. Металл в прибыль подводится по касательной, чтобы создать дополнительное торможение [12]. При литье поршней со значительно утолщенными днищами применяют кантовку кокиля при его заливке. Вначале кокиль наклоняется в сторону литника и осуществляется заливка. Затем кокиль отклоняется в противоположную сторону, происходит перераспределение кристаллизующейся жидкой массы, в результате чего исключается образование концентрированных раковин в днище [12, 14]. Однако наряду с технологическими преимуществами, литье поршней в кокиль обладает рядом недостатков, системно описанных, например, в работах [15, 16]. Варианты изготовления поршней являются применение литья под низким давлением [17] и литье под давлением [18], обеспечивающих получение отливок

с мелкозернистой структурой, однако обладающих тем недостатком, что особое внимание следует уделять вентиляции литейной формы.

Еще одной технологией изготовления поршней, похожей на литье под давлением, является жидкая штамповка. Ее отличительной особенностью является то, что прессовка проводится несколько позже — в процессе кристаллизации, когда часть металла уже стала твердой. Давление устраняет микрополости, улучшает структуру материала поршня, а значит и свойства поршня. Жидкая штамповка удобна также тем, что позволяет «залить» различные вставки и металлические детали. Она легко обеспечивает соединение тела поршня с другими металлами, например, с нирезистовыми вставками под верхнее компрессионное кольцо. Такие поршни в основном используются для дизельных двигателей, они более долговечны, выдерживают большие нагрузки. Температурные режимы аналогичны режимам литья в кокиль, хотя возрастает опасность приваривания металла к матрице при нагреве пресс — формы более 400 °С. Для алюминиевых сплавов температура матрицы не должна превышать 300 °С, рабочая температура пуансона — 350 °С. Продолжительность технологических операций должна быть минимальной. Особенно это относится к заливке и выдержке металла в пресс-форме до момента начала прессования. Силовой характер взаимодействия пуансона и пресс — формы определяет высокие требования, предъявляемые к составу и качеству смазок и покрытий, наносимых на рабочие поверхности пресс-формы [16].

В ряде работ предложено изготавливать заготовки поршня двигателя из алюминиевого сплава АЛ-25, отличающегося повышенной теплостойкостью, на гидравлическом прессе в пресс-форме с использованием принципа поршневого прессования. Требуемое качество поршней при этом обеспечивается последующей термообработкой: закалка в горячую воду после выдержки в течение 3 ч при 495 °С; старение при 195 °С с выдержкой в течение 6 ч, охлаждение на воздухе [19, 20]. Известен способ изготовления поршня двигателя внутреннего сгорания, который включает его формообразование штамповкой заготовки из алюминиевого сплава со структурой, содержащей упрочняющие частицы, и последующую термообработку, при этом осуществляют штамповку заготовки из алюминиевых сплавов с объемным содержанием упрочняющих частиц 25–60 % и их средним размером менее 15 мкм² при температуре 0,8–0,98 $T_{пл}$ со скоростями $5 \cdot 10^{-2}$ – $5 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ в обычном режиме или режиме сверхпластичности, по крайней мере, за один переход. Техническим результатом является изготовление поршней из силуминов штамповкой, обладающих широким спектром механических свойств в зависимости от исходной структуры

и структуры, получаемой в результате деформационной обработки [21]. Использование технологии изотермической штамповки поршней в сочетании с бескопирной обработкой резанием описано в работе [22].

Один из оригинальных способов изготовления поршней заключается в следующем. В процессе литья устанавливают контейнер с матрицей, в матрицу устанавливают заранее подготовленную вставку, заливают мерную дозу расплавленного алюминиевого сплава, прикладывают давление и выдерживают его весь период кристаллизации сплава, причем приложение давления к зеркалу расплава осуществляют путем первоначального осевого перемещения съемника с пуансоном и только после касания съемником матрицы осуществляют приложение давления за счет осевого перемещения выталкивателя, причем величина прикладываемого к расплаву давления находится в зависимости от литровой мощности двигателя [23].

Альтернативой методам литья является изотермическая штамповка твердой заготовки. В этом процессе заготовку поршня получают не отливкой расплавленного металла в кокиль, а формовкой под давлением не расплавленной, но сильно нагретой, легко деформируемой заготовки. Именно по этой дорогой технологии делает свои эксклюзивные поршни известная фирма Mahle. Исходным материалом служат алюминиевые сплавы с большим содержанием кремния АК12Д и АК18Д, для дизелей применяют гранулированный сплав 1379П. Штамповка происходит изотермически, то есть при фиксированной температуре 480–490 °С, затем выполняется термообработка [24].

Известен способ изготовления поршня, заключающийся в формообразовании штамповкой заготовки из алюминиевого сплава в режиме обычной горячей деформации. Однако температурно-скоростные режимы штамповки не оптимизированы в зависимости от количества и размеров частиц кремния и других упрочняющих частиц, как с точки зрения обеспечения необходимой пластичности материала для получения требуемой формы поршня без разрушения, так и с точки зрения достижения в сплаве максимального уровня механических свойств [25]. Более современным является способ, в котором штамповку поршней ДВС проводят в штампе, пуансон которого соответствует внутренней конфигурации поршня [26].

Кованые поршни обладают рядом характерных недостатков: процесс предполагает очень большие усилия деформирования исходной заготовки, кроме того, получаемая заготовка должна иметь простую форму без поднутрений, иначе ее нельзя будет снять с деталей штампа (пуансона или матрицы). В дополнение к этому, кованый поршень невозможно сделать с пластинами или вставками, и, наконец,

процессковки менее производительный и более дорогостоящим, что не позволяет использовать кованные поршни в массовом производстве [27].

Наконец, выбор того или иного технологического решения должен в конечном счете гарантировать получение поршней, соответствующих требованиям качества [28–34]. При этом системной характеристикой качества поршня может быть принят его ресурс как задел, на протяжении которого поршень не достигает предельного состояния с заданной вероятностью [35].

3.2. Современные системы компьютерно-интегрированного проектирования поршней ДВС.

На данный момент основой литейной технологии и механообработки является единая 3D-модель поршня, на которой осуществляется сквозное конструкторско-технологическое проектирование. Она также используется для моделирования процессов, происходящих при заливке, обработке и рабочих режимах ДВС. Далее проводится моделирование процесса производства литого поршня с помощью систем различного уровня, после анализа полученных результатов моделирования вносятся изменения в 3D-модели детали и отливки. Причем при внесении некоторых поправок в 3D-модель детали, связанных с литейными дефектами, производятся повторные конструкционные расчеты НДС поршня с дальнейшим внесением поправок в конструкцию. Такой метод проектирования обеспечивает постоянное и полное взаимодействие технических подразделений, отвечающих за выпуск качественного изделия. Взаимодействие осуществляется на основе 3D-модели, в которую вносятся поправки и автоматически учитываются в электронных документах, выпускаемых подразделениями. Для прочностных расчетов поршней используется определенная геометрическая конфигурация детали из заданного конструкционного материала, но без учета реальных технологических факторов, возникающих в процессе литья [36]. Результаты существующих экспериментальных исследований распространяются на группу физически подобных процессов — физическое моделирование. Существует два наиболее известных метода численного моделирования процессов затвердевания литого поршня: масштабирование и аналогирование [37, 38]. Для построения математических моделей расчета охлаждения литого поршня в форме используются способы численного моделирования и экспериментального исследования [37–41]. 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. Согласно требованиям, предъявляемым к конструкторско-технологическому проектированию, для создания универсальной техноло-

гии совместного компьютерно-интегрированного проектирования поршней ДВС используются специализированные ИКС [42–45]. Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) поршней ДВС используются наиболее распространенные конечно-элементные САЕ-системы: ANSYS, ABAQUS, MSC/NASTRAN, COSMOS/M. Наибольшее распространение получили системы ANSYS и COSMOS/M.

COSMOSWorks — мощный и простой в использовании программный комплекс для проведения инженерных расчетов, позволяет решать любые инженерные задачи [46, 47]. Использование интегрированного решения SolidWorks и COSMOSWorks позволяет эффективно решать различные задачи: линейный статический анализ, тепловой анализ, совместный термостатический анализ, расчет сборок с использованием контактных элементов, нелинейные расчеты, оптимизация конструкции, определение долговечности конструкции. Продукт COSMOSWorks Professional не создает контактных элементов между деталями в автоматическом режиме, требует задавать каждый контактный элемент типа «узел — узел» или «узел — поверхность» вручную.

Программный комплекс ANSYS относится к числу лидеров, как и многие другие САЕ-пакеты, для математического моделирования различных физических процессов использует метод конечных элементов [48–55]. В состав программного комплекса инженерного анализа ANSYS Workbench Products входит программный модуль FE Modeler, предназначенный для редактирования сетки КЭ. При его использовании появляется возможность транслировать данные входного файла NASTRAN или данные из расчетной модели Design Simulation в данные входного файла ANSYS input file.

Для моделирования литья поршней ДВС наиболее распространены две моделирующие системы: ProCast и MagmaSoft. По данным производителей, на каждую из этих систем за период около 10 лет было приобретено достаточно большое количество лицензий по всему миру [56]. В Европе более популярна система MagmaSoft, в США более популярна система ProCast. Кроме того, определенный сегмент рынка в Европе занимают системы WinCast (ранее называлась Simtec) и NovaFlow (на отечественном рынке эта система имеет название LVMFlow). В Украине и СНГ лидером по распространенности является также два системных продукта: Полигон и LVMFlow. Например, в России количество лицензий на Полигон превышает все остальные литейные системы вместе взятые, включая ProCast, MagmaSoft и другие менее известные.

MagmaSoft — моделирующий пакет, базирующийся на методе конечных разностей. 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 упрощенный 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 [56, 57].

ProCast — американский конечно-элементный пакет, по объективным показателям более мощный, чем MagmaSoft, т. к. помимо собственно преимуществ элементного подхода, в ProCast используются более сложные и физически-универсальные модели, что существенно повышает адекватность расчетов. В ProCast численными методами моделируются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы, а также процессы структурообразования (кристаллизационные процессы). Следует отметить, что последний фактор является очень важным, так как процесс структурообразования очень сложен и требует сам по себе учета огромного числа технологических параметров литья [58–62]. ProCAST позволяет прогнозировать микроструктуру большинства многокомпонентных сплавов, используя модель, объединяющую макроанализ процесса теплопереноса во всех частях отливки с зарождением и ростом зерен; производить моделирование, заключающееся в объединении численных методов с термоанализом для определения граничных условий и теплофизических свойств отливки и формы; производить расчет остаточных напряжений и деформаций по специальному алгоритму, обеспечивающему анализ контакта между отливкой и формой.

WinCast — несмотря на то, что в пакете имеются определенные 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 в процессе охлаждения литой детали, что для ряда литейных производств является весьма привлекательным.

Полигон — в данном конечно-элементном пакете численными методами решаются задачи моделирования гидродинамических, тепловых и усадочно-фильтрационных процессов. Методами критериального анализа решаются задачи прогноза прочности, твердости, структурных параметров, размыва форм и т. п.

LVMFlow — пакет прикладных программ, использующий метод конечных разностей и специализирован для моделирования технологических

процессов литья. По таким показателям, как скорость расчетов, удобство интерфейса и некоторым другим важным параметрам, LVMFlow вполне может составлять конкуренцию любым разностным западным пакетам, хотя конечно-элементные пакеты типа ProCast объективно имеют более широкий круг применимости по сложности геометрии отливок и способам литья [56, 57].

4. Выводы

1. Литье в кокиль следует признать наиболее простым технологическим процессом, позволяющим получать поршни из сплавов с низким коэффициентом линейного расширения. Жидкая штамповка поршней предпочтительнее, чем горячая штамповка, так как позволяет получать бездефектные, плотные заготовки с мелкодисперстной структурой материала поршня (аналогично горячештампованным). Кроме этого, в данном процессе можно использовать литейные поршневые сплавы с низким коэффициентом линейного расширения. В совокупности это обеспечивает высокие эксплуатационные свойства поршней по сравнению с кокильными заготовками, а также значительное сокращение расхода материала. Метод горячей штамповки может быть рекомендован для производства поршней, к которым предъявляются особые требования по прочности: поршни высоконагруженных бензиновых двигателей (авиация, автоспорт) и тронки составных поршней крупных дизельных двигателей. Для высоконагруженных поршней дизельных двигателей весьма приемлемым является кокильное литье при условии максимально возможного предотвращения пористости в массивных частях отливок. Остальные из указанных способов получения поршневых заготовок обеспечивают высокое качество поршней, но отличаются большой сложностью технологического процесса и меньшим коэффициентом использования металла.

2. Для моделирования процессов литья поршней ДВС целесообразно использование пакета прикладных программ компьютерного моделирования LVMFlow. Обоснованием этого может служить ориентация пакета на конечно-разностные алгоритмы расчета, обеспечивающие стабильную работу расчетной станции при относительно малом потреблении ее аппаратных ресурсов, удобства интерфейса, скорости расчетов и малой стоимости пакета программ. Однако при этом нужно учитывать, что применение конечно-разностных численных моделей требует точного назначения начальных и граничных условий, а также создания конечно-разностной сетки. Для инженерного моделирования теплового и напряженно-деформированного состояния литых поршней ДВС может

быть рекомендован комплекс ANSYS, обладающий высоким взаимодействием с существующими CAD и CAE системами, имеющий полное взаимодействие с Workbench Products и классическим

ANSYS, а также достаточно большое количество математических решателей, позволяющих быстро и качественно проводить расчеты в Workbench Products.

Литература

1. Чайнов, Н. Д. Конструирование двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский; под ред. Н. Д. Чайнова. — М.: Машиностроение, 2008. — 495 с.
2. Двигуни внутрішнього згорання [Текст] : у 6 т. / ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. — Харків: Прапор, 2004. — Т. 1: Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. — 384 с.
3. Двигуни внутрішнього згорання [Текст]: у 6 т. / під ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. — Харків: Прапор, 2004. — Т. 2: Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. — 288 с.
4. Двигуни внутрішнього згорання [Текст]: у 6 т. / під ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. — Харків: Прапор, 2004. — Т. 4: Основи САПР ДВЗ. — 336 с.
5. Двигуни внутрішнього згорання [Текст]: у 6 т. / під ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. — Харків: Прапор, 2004. — Т. 6: Надійність ДВЗ. — 324 с.
6. Абрамчук, Ф. И. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности [Текст] / Ф. И. Абрамчук, А. П. Марченко, Н. Ф. Разлейцев; под ред. А. Ф. Шеховцова. — К.: Техника, 1992. — 272 с.
7. Лобанов, В. К. Материаловедческие аспекты выбора технологии изготовления поршней ДВС [Текст] / В. К. Лобанов, Е. В. Чуйкова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2009. — Вып. 46. — Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/Materialovedcheskie-aspektu-vybora-tehnologii-izgotovleniya-porshney-dvs#ixzz2rbiqJ4d>
8. Акимов, О. В. Научные основы конструкторско-технологического проектирования литых деталей ДВС [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / О. В. Акимов. — Х.: НТУ «ХПИ», 2008. — 315 с.
9. Николаенко, А. В. Комплексный подход к созданию и организации производства поршней дизельных двигателей из быстрозакристаллизованных заэвтектических силуминов [Текст] / А. В. Николаенко, Ю. Г. Калпин, Т. С. Басюк, В. Г. Бузинов, П. А. Петров, А. Г. Задерей, В. Ю. Конкевич, Т. И. Лебедева, А. А. Плешанов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2013. — № 3. — Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-podhod-k-sozdaniyu-i-organizatsii-proizvodstva-porshney-dizelnyh-dvigatelay-iz-bystrzakristallizovannyh>
10. Курдюмов, А. В. Производство отливок из сплавов цветных металлов [Текст] / А. В. Курдюмов. — М.: Металлургия, 1986. — 504 с.
11. Кузьмин, Б. А. Технология металлов и конструкционные материалы [Текст] / Б. А. Кузьмин и др. — М.: Машиностроение, 1981. — 325 с.
12. Вейник, А. И. Литье в кокиль [Текст] / А. И. Вейник. — М.: Машиностроение, 1980. — 415 с.
13. Гинни, Э. Ч. Технология литейного производства: Специальные виды литья [Текст] / Э. Ч. Гинни. — М.: Академия, 2005. — 352 с.
14. Устройство для отлива поршней из алюминиевого сплава. Полезная модель 102551 Российская Федерация, МПК⁷ B22D15/02 [Текст] / Дуковский Л. М. — №2010130754. — Режим доступа: <http://poleznayamodel.ru/model/10/102551.html>
15. Галдин, Н. М. Цветное литье [Текст]: справочник / Н. М. Галдин, Д. Ф. Чернега, Д. Ф. Иванчук и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 239 с.
16. Курдюмов, А. В. Литейное производство цветных и редких металлов [Текст] / А. В. Курдюмов, М. В. Пикун, В. М. Чурсин. — М.: Металлургия, 1982. — 496 с.
17. Устройство для получения отливки поршня. Пат. 2418651 Российская Федерация, МПК⁷ B22D18/04 [Текст] / Малышев В. И. — № 2009103682/02; заявл. 04.02.2009; опубл. 20.05.2011. — Режим доступа: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2418651>
18. Титов, Н. Д. Технология литейного производства [Текст] / Н. Д. Титов, Ю. А. Степанов. — М.: Машиностроение, 1974. — 400 с.
19. Сергеев, П. С. Штамповка жидких цветных металлов и сплавов [Текст] / П. С. Сергеев. — Л.: Судпромгиз, 1957. — 587 с.
20. Батышев, А. И. Совмещенные способы литья и прессования [Текст] / А. И. Батышев. — М., 1971. — 48 с.
21. Способ изготовления поршня двигателя внутреннего сгорания. Пат. 2176943 Российская Федерация, МПК⁷ C22F1/04, B21K1/18 [Текст] / Кайбышев О. А. Трифионов В. Г. — № 99105048/02; заявл. 12.03.1999; опубл. 20.12.2001. — Режим доступа: <http://ru-patent.info/21/75-79/2176943.html>
22. Способ горячей штамповки полых изделий. Патент № 2262408 RU, МПК⁷ B21K21/00, B21K29/00, B21J5/02 [Текст] / Петров П. А, Перфилов В. И. — № 2004114912/02; заявл. 18.05.2004; опубл. 20.10.2005. — Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2262408>

23. Способ изготовления поршня двигателя внутреннего сгорания. Пат. 2156371 Российская Федерация, МПК⁷ F02F3 [Текст] / Цырульник Ю. А., Коротеев С. В. — № 99126859/06; заявл. 28.12.1999; опубл. 20.09.2000. — Режим доступа: <http://ru-patent.info/21/55-59/2156371.html>
24. Калпин, Ю. Г. Разработка обобщенной теории и технологии объемной изотермической штамповки [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Ю. Г. Калпин. — М.: МАМИ, 1986. — 131 с.
25. Калпин, Ю. Г. Изотермическая штамповка поршней из сплава АЛ25 [Текст] / Ю. Г. Калпин, Г. В. Гершман, В. А. Кобяков // Кузнечно-штамповочное производство. — 1979. — № 2. — С. 12–14.
26. Способ изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания. Пат. 2063836 Российская Федерация, МПК⁷ B23P15/10, B21K1/18 [Текст] / Каковин В. М. — № 94036858/08; заявл. 29.09.1994; опубл. 20.07.1996. — Режим доступа: <http://ru-patent.info/20/60-64/2063836.html>
27. Хорошие поршни для хороших моторов [Текст] // Моторный центр АВ-Инжиниринг. — Режим доступа: http://www.ab-engine.ru/rec_piston.html
28. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения [Текст]: ГОСТ 15467-79. — Введ. 1987. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 25 с.
29. МакЛинн Дж. Превращение качества в надежность или почему надежность не становится качеством с течением времени [Текст] / Дж. МакЛинн // Эффективное обучение эффективности. — Режим доступа: <http://www.classs.ru/stati/menejment1/nadejnost.html>
30. Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия [Текст]: ГОСТ 20000-88. — Режим доступа: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim
31. Дизели автомобильные. Общие технические условия [Текст]: ГОСТ 23465-79. — Режим доступа: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim
32. Автомобильные транспортные средства. Поршни алюминиевые двигателей. Общие технические требования и методы испытаний [Текст]: ГОСТ 53558-09. — Режим доступа: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim
33. Дизели автомобильных транспортных средств. Общие технические условия [Текст]: ГОСТ Р 51998-2002. — Режим доступа: http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim
34. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) [Текст]. — Введ. 01.01.1996. — К.: Госстандарт Украины, 1995. — 49 с.
35. Пелих, С. Г. Аналіз і синтез ливарних систем [Текст]: навч. пос. / С. Г. Пелих, М. М. Литвиненко. — Х.: Основа, 1994. — 172 с.
36. Білогуб, О. В. Науково-технічні основи інтегрованого проектування і виробництва тонкостінних поршнів ДВС [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / О. В. Білогуб. — Х.: НТУ «ХПІ», 2011. — 140 с.
37. Вейник, А. И. Теория затвердевания отливки [Текст] / А. И. Вейник. — М.: Машгиз, 1960. — 436 с.
38. Баландин, Г. Ф. Основы теории формирования отливки : в 2-х ч. [Текст] / Г. Ф. Баландин. — М.: Машиностроение, 1976. — Ч. 1. — 328 с.
39. Вейник, А. И. Тепловые основы теории литья [Текст] / А. И. Вейник. — М.: Машгиз, 1962. — 382 с.
40. Анисович, Г. А. Затвердевание отливок [Текст] / Г. А. Анисович. — Минск: Наука и техника, 1960. — 436 с.
41. Гуляев, Б. Б. Теория литейных процессов [Текст] / Б. Б. Гуляев. — Л.: Машиностроение, 1976. — 216 с.
42. Стандарты по управлению качеством и обеспечению качества. Ч. I. Руководящие указания по выбору и применению. ДСТУ ISO 9000-1-95 [Текст]. — Введ. 11.09.95. — К.: Госстандарт Украины, 1995. — 23 с.
43. Стандарты по управлению качеством и обеспечению качества. Ч. II. Руководящие указания по применению ДСТУ ISO 9001-95, ДСТУ ISO 9002-95, ДСТУ ISO 9003-95. ДСТУ ISO 9000-2-96 [Текст]. — Введ. 27.11.96. — К.: Госстандарт Украины, 1997. — 28 с.
44. Системы качества. Модели обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании. ДСТУ ISO 9001-95 [Текст]. — Введ. 07.01.94. — К.: Госстандарт Украины, 1995. — 16 с.
45. Системи управління якістю. Настанови щодо поліпшення діяльності : ДСТУ ISO 9004-2001 [Текст]. — Введ. 27.07.2001. — К.: Держстандарт України, 2001. — 70 с.
46. Дударева, Н. Ю. Самоучитель SolidWorks 2006 [Текст] / Н. Ю. Дударева, С. А. Загайко. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 336 с.
47. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст] / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2004. — 432 с.
48. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров : справ. пособие [Текст] / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 512 с.
49. Жеков, К. С. Современные аналитические возможности ANSYS [Текст] / К. С. Жеков // САПР и графика. — 1998. — № 9. — С. 50–54.
50. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS [Текст] / К. А. Басов. — М.: ДМКПресс, 2006. — 248 с.
51. Ткачук, Н. А. Структура специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных пространственных конструкций [Текст] / Н. А. Ткачук, В. И. Кохановский, К. Е. Быба, Н. Н. Ткачук, И. В. Артемов // Механіка та машинобудування. — 2006. — № 1. — С. 57–79.

52. Ткачук, Н. А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания [Текст] / Н. А. Ткачук, Г. Д. Гриценко, А. Д. Чепурной, Е. А. Орлов, Н. Н. Ткачук, С. Т. Бруль // Механика та машинобудування. — 2006. — № 1. — С. 57–79.
53. Ткачук, Н. А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения [Текст] / Н. А. Ткачук, С. Т. Бруль, А. Н. Малакей, Г. Д. Гриценко, Е. А. Орлов // Механика та машинобудування. — 2005. — № 1. — С. 184–194.
54. Леонтьев, В. В. Сходимость и точность метода конечных элементов при решении плоской упругой и упруго-пластической задач в FEMLAB [Текст] / В. В. Леонтьев // Вестник СевГТУ. — 2008. — Вып. 88. — С. 26–30.
55. Петриченко, Р. М. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: алгоритмы прикладных программ [Текст] / Р. М. Петриченко, С. А. Батулин, Ю. Н. Исаков и др. — Л.: Машиностроение, 1990. — 328 с.
56. Тихомиров, М. Д. Основы моделирования литейных процессов. Сравнение метода конечных элементов и метода конечных разностей [Текст] / М. Д. Тихомиров, И. А. Комаров. // Литейное производство. — 2002. — № 5. — С. 22–28.
57. Тихомиров, М. Д. Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования [Текст] / М. Д. Тихомиров // Литейное производство. — 2004. — № 5. — С. 24–30.
58. Demin, D. A. Optimization of the method of djustment of chemical composition of flake graphite iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. — 1995. — Vol. 7–8. — P. 42–43.
59. Demin, D. A. Change in cast iron's chemical composition in inoculation with a Si-V-Mn master alloy [Text] / D. A. Demin // Litejnoe Proizvodstvo. — 1998. — Vol. 6. — P. 35.
60. Demin, D. A. Complex alloying of grey cast iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. — 1998. — Vol. 10. — P. 18–19.
61. Коваль, О. С. Исследование параметров микроструктуры синтетического чугуна с целью повышения его качества [Текст] / О. С. Коваль // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — Т. 5, № 3(19). — С. 27–30. doi: 10.15587/2312-8372.2014.28108
62. Дёмин, Д. А. Технологический аудит процесса модифицирования чугуна для отливок автомобильной и дорожной техники [Текст] / Д. А. Дёмин, О. С. Коваль, В. О. Костик // Технологический аудит и резервы производства. — 2013. — Т. 5, № 1(13). — С. 58–63. — Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/18398/16149>
63. Акимов, О. В. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование материалов для блок-картера ДВС [Текст] / О. В. Акимов, А. П. Марченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2008. — Т. 5, № 1(35). — С. 52–57.

Abstract. The technological features of manufacture of pistons of internal combustion engines (ICE) taking into account the operational characteristics that form the functional requirements of the piston material are considered. It is shown that the chill casting of pistons is recommended for alloys with a low coefficient of linear expansion, and the liquid forging of pistons is preferable to the hot forging since it allows to obtain defect-free, dense billets with the fine structure of the piston material. For the heavy-loaded diesel engine pistons, chill casting is acceptable, provided the maximum possible porosity prevention in massive parts of castings.

For the simulation of the casting processes of ICE pistons, it is advisable to use the LVMFlow package since it is focused on the finite-difference computation algorithms, ensuring stable operation of the computational station at a relatively low consumption of its hardware resources, ease of interface, computation speed and low cost of the software package. For the engineering simulation of the thermal and the stress-strain state of the ICE cast pistons, the ANSYS complex that has a high interaction with existing CAD and CAE systems having full interaction with WorkbenchProducts and well-known ANSYS, as well as a large number of mathematical solvers, allowing to quickly and accurately conduct computations in the WorkbenchProducts can be recommended.

Keywords: internal combustion engine, piston, computer-integrated design.