

Ресурсосберегающая технология изготовления заготовок поршневых колец

А.Н. Крутилин

Кафедра машины и технология литейного производства
Белорусский национальный технический университет
220113 г. Минск ул.Я.Колоса 53 к.3 кв.71
Corresponding author. E-mail address: yuni.06@tut.by

Received 28.07.2010; accepted in revised form 03.08.2010

Изложение

Поршневые кольца являются одними из наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей двигателей, работающих на износ в условиях длительного воздействия знакопеременных нагрузок и повышенных температур. Ввиду несовершенства традиционных способов литья, постоянного повышения требований к качеству заготовок, необходимости экономии материальных, топливных и энергетических ресурсов, ведутся поиски новых прогрессивных технологических процессов производства высококачественных заготовок поршневых колец. В Белорусском национальном техническом университете разработан усовершенствованный способ литья погружением. Тонкостенные (5-10 мм) кольцевые одноместные формы, изготовленные из стержневой смеси, с помощью специального приспособления собирают в блоки. Заполнение и питание заготовок происходит при погружении предварительно нагретых форм в расплав через один или несколько литников, выходящих на наружную поверхность формы. Питание заготовок происходит непосредственно из ванны расплава до ее полного затвердевания, после окончания кристаллизации заготовки не затвердевший металл из питателей попадает обратно в печь. Значительно сокращаются безвозвратные потери металла, так как нет необходимости использовать большое количество отходов производства, составляющих более 50% при традиционной технологии литья. Замена традиционной технологии литья индивидуальных заготовок поршневых колец в песчано-глинистые формы на способ литья погружением позволяет при высокой производительности процесса, увеличить выход годного до 85-95%, значительно упростить и удешевить технологический процесс.

Ключевые слова: технология литья, поршневое кольцо, моделирование, рафинирование, модифицирование

1. Введение

Поршневые кольца являются одними из наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей двигателей, работающих на износ в условиях длительного воздействия знакопеременных нагрузок и повышенных температур.

Основным материалом, используемым для производства

заготовок поршневых колец, является чугун. Химический состав чугуна выбирается в зависимости от способа получения литой заготовки, требований по физико-механическим свойствам и структуре.

В настоящее время в мировой практике производства заготовок поршневых колец преобладают два способа литья. Получение индивидуальной и маслотной заготовки из серого и высокопрочного чугуна в песчано-глинистые и

оболочковые формы, и центробежный способ литья, предназначенный главным образом для получения маслотно-прочных заготовок из высокопрочного чугуна. Технологию получения индивидуальной заготовки используют для получения колец диаметром до 250 мм, от 250 до 450 мм индивидуальным и маслотно-прочным способом, свыше 450 мм предпочтение отдается маслотно-прочной заготовке.

Наилучшие показатели по физико-механическим и эксплуатационным свойствам поршневые кольца имеют в случае изготовления заготовок в максимальной степени приближающихся по конфигурации к готовому изделию. Кольца, изготовленные из профильных заготовок, характеризуются равномерным распределением свойств по периметру, обеспечивают заданную эпюру давлений и беспросветное прилегание к цилиндру.

Технологический процесс индивидуальной отливки заготовок поршневых колец стопочным методом является наиболее отработанным процессом. Припуски под механическую обработку 0,3-0,5 мм на сторону. Выход годного при индивидуальном методе литья заготовок поршневых колец не превышает 40%. Коэффициент использования металла в зависимости от типоразмера заготовок находится в пределах 0,4-0,6. К достоинствам индивидуального способа литья заготовок поршневых колец следует отнести минимальные припуски под механическую обработку, низкую трудоемкость механической обработки, высокую производительность процесса. Однако при этом способе имеет место неравномерность свойств по периметру заготовки, дефекты в виде нарушения конфигурации, газовые и усадочные раковины, неметаллические включения.

Способ литья маслотно-прочной заготовки используется, главным образом, для получения заготовок из высокопрочного чугуна. Маслоты отливают с радиальным припуском под механическую обработку 2,5-3,0 мм и уклоном 0,5-0,7°. Для ликвидации усадочной раковины, сверху устанавливают прилив, которая составляет до 20% общего объема заготовки, что значительно снижает выход годного литья. Металлическая основа формируется за счет термической обработки. Основными недостатками способа литья маслотно-прочных заготовок является низкий выход годного литья, повышенный расход модификатора, нестабильность микроструктуры, наличие неметаллических включений.

При центробежном способе литья маслотно-прочных заготовок отпадает необходимость в операциях по удалению литников, выпоров, приливов. Припуск на механическую обработку составляет обычно 4 мм по наружному и 3-5 мм по внутреннему диаметру. Заготовки получают отбеленной или половинчатой структуры, поэтому их подвергают высокотемпературному отжигу. После предварительной обточки и расточки маслот их разрезают на индивидуальные заготовки и подвергают термической обработке с целью получения необходимой структуры. Центробежный способ литья не позволяет получать профильные заготовки в поперечном сечении. Это приводит к неравномерному по периметру припуску на механическую обработку. Имеет место ликвация элементов, случаи получения заготовок с внутренними дефектами в виде неметаллических включений и раковин. Плотность отливки, а также структура изменяются по толщине заготовки. При центробежном способе литья

поршневых колец неоднородность распределения химических элементов по их сечению проявляется в большей степени по сравнению с литьем в стопочных песчаных формах. Существенным недостатком центробежного способа литья является низкий коэффициент использования металла (0,14-0,2), выход годного литья не превышает 85%.

Несмотря на хорошую организацию производства, соблюдение технологических параметров литья, тщательный контроль шихтовых и формовочных материалов, высокую степень механизации и автоматизации, брак при литье традиционными способами во многих случаях превышает 5 %.

Ввиду несовершенства традиционных способов литья, постоянного повышения требований к качеству заготовок, необходимости экономии материальных, топливных и энергетических ресурсов, ведутся поиски новых прогрессивных технологических процессов производства высококачественных заготовок поршневых колец.

Большой интерес представляет способ циклического литья намораживанием, разработка которого для производства различных заготовок, в том числе и маслотно-прочных заготовок поршневых колец, ведется в Могилевском институте технологии металлов [1]. Через сифонную литниковую систему, соединенную с водоохлаждаемым кристаллизатором посредством специального огнеупорного стаканчика, расплавленный металл поступает в кристаллизатор и заполняет его до определенного уровня. Затвердевание металла в кристаллизаторе происходит непрерывно в течение всего времени литья, а извлечение заготовок осуществляют циклически с заданным периодом. Формирование отливки происходит в условиях направленного теплоотвода при обильном питании фронта кристаллизации жидким металлом. Ведущая роль в процессе формирования отливки принадлежит тепловым явлениям, происходящим в процессе затвердевания и последующего охлаждения заготовки. В начальный момент скорость затвердевания расплавленного металла при попадании его на стенку водоохлаждаемого кристаллизатора достигает 2-3 мм/с. Образование газового зазора между заготовкой и кристаллизатором ведет к уменьшению скорости затвердевания до 0,5-0,8 мм/с. При извлечении заготовки из кристаллизатора, происходит перераспределение температур и изменение интенсивности охлаждения заготовки. Регулируя интенсивность охлаждения в этот период возможно получение микроструктуры, обеспечивающей необходимые физико-механические свойства заготовок. Не соблюдение оптимальных технологических параметров приводит к получению неравномерной толщины заготовок по высоте. Для стабилизации толщины стенки и уменьшения припусков под механическую обработку необходимо совершенствовать конструкцию технологической установки, оптимизировать металлургические и технологические параметры литья, а также стабилизировать температуру заливаемого металла. Разработанный технологический процесс позволяет значительно улучшить санитарно-гигиенические условия работы в литейном цехе за счет ликвидации таких операций, как формовка, выбивка и обрубка. Высокая производительность процесса при полной механизации и автоматизации всех операций, отсутствие

формовочных материалов делает этот процесс конкурентоспособным по отношению к известным способам литья маслостных заготовок.

Однако, установка и технологическая оснастка для реализации способа достаточно сложна и не универсальна. Переход с одного типоразмера заготовок на другой вызывает большие трудности и требует значительных затрат. Существенной проблемой является выбор оптимального материала и конструкции соединительного стакана, который в значительной степени определяет стабильность процесса литья и качество заготовок.

Одним из наиболее перспективных для получения заготовок поршневых колец является способ литья, заключающийся в погружении песчаных форм в расплав.

Представляет интерес идея, высказанная А. Sutherland и в последствии запатентованная в ряде стран на способ литья, названный "Иммерсионной технологией заливки" (ICT-Immersion Casting Technique)" [2].

Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях Белорусского национального технического университета, выявили существенные недостатки иммерсионного способа литья. При погружении форм происходило интенсивное выделение газов в расплавленный металл, а также намораживание металла на наружной поверхности формы. Несмотря на некоторые недостатки, предлагаемый технологический процесс характеризуется существенным снижением трудоемкости, улучшением условий труда, значительным уменьшением расхода формовочных материалов, сокращением производственных площадей, полным исключением опочного и ковшевого хозяйства.

В Белорусском национальном техническом университете разработан усовершенствованный способ литья погружением [3], принципиальная схема процесса представлена на рис.1.

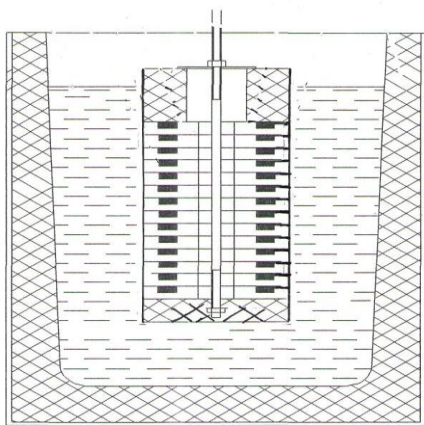


Рис. 1. Принципиальная схема процесса

Тонкостенные (5-10 мм) кольцевые одноместные формы, изготовленные из стержневой смеси, с помощью специального приспособления собирают в блоки. Заполнение и питание заготовок происходит при погружении предварительно нагретых форм в расплав через один или несколько литников, выходящих на наружную поверхность формы. Питание заготовок происходит непосредственно из

ванны расплава до ее полного затвердевания, после окончания кристаллизации заготовки не затвердевший металл из питателей попадает обратно в печь.

Совершенствование и разработка комплексной ресурсосберегающей технологии литья затрагивает все стадии изготовления, начиная от теоретического анализа процесса формирования заготовок в характерных для способа условиях, до чисто практических вопросов, связанных с использованием процесса в производстве.

Из многолетнего опыта предприятий, которые занимаются производством заготовок поршневых колец, известно, что такая тонкостенная отливка как кольцо, к которой предъявляются жесткие требования по механическим и эксплуатационным свойствам, весьма чувствительна к изменениям и колебаниям технологических параметров и режимов.

Основными факторами, оказывающими влияние на стабильность процесса и качество получаемых заготовок, являются температура расплава и формы.

На протяжении достаточного длительного времени, на основании экспериментальных исследований определены оптимальные технологические параметры процесса при литье заготовок из серого низколегированного и высокопрочного чугуна.

Экспериментальные исследования в силу сложности происходящих в процессе затвердевания процессов не позволяют определить количественные взаимосвязи между технологическими параметрами процесса. В настоящее время достаточно быстро можно определить влияние технологических факторов на процесс формирования отливки. В связи с этим, несомненный интерес представляет компьютерное моделирование процесса, позволяющее определить взаимосвязь технологических параметров на формирование отливки. Использование численных методов расчета позволяет получить, в некоторой степени, адекватную картину процесса, труднодостижимую при использовании экспериментальных или аналитических методов.

Характерной особенностью заполнения тонкостенных заготовок является быстрая потеря расплавом теплоты перегрева. Вследствие теплового взаимодействия со стенками формы происходит рост твердой корки на внутренней поверхности формы и разогрев формы потоком расплава, что оказывает существенное влияние на время и скорость затвердевания.

Для проведения теоретического анализа использовали профессиональную американско-швейцарскую систему компьютерного моделирования литейных процессов «ProCast». Модуль теплового расчета системы моделирования позволяет рассчитывать выделение скрытой теплоты кристаллизации энтальпийным методом с учетом задаваемого спектра выделения твердой фазы, что дает возможность с достаточной степенью адекватно рассчитать затвердевание для различных сплавов и способов литья.

На рис.2 представлено принятое изменение количества твердой фазы в зависимости от температуры расплава для высокопрочного чугуна Вч 60. Химический состав (%): С 3,53; Si 2,88; Mn 0,34; Cu 0,64; S 0,06; P 0,017; Mg 0,05.

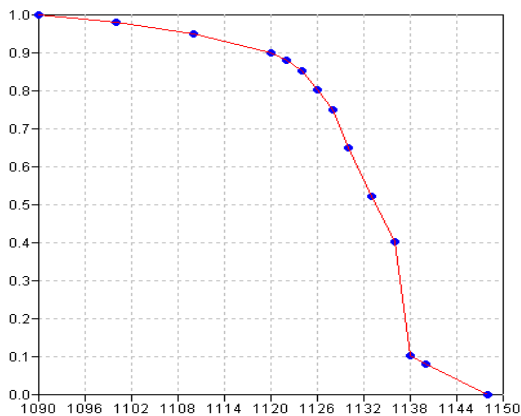


Рис. 2. Изменение количества твердой фазы в зависимости от температуры расплава

Для чугунов следует формулировать модель учета абсолютного количества выделяющейся теплоты от параметров затвердевания и кристаллизации, так как эта величина зависит от хода охлаждения. Наибольшую достоверность обеспечивает экспериментальное определение спектра тепловыделения, которое можно получить путем пересчета на тепловыделение опытной температурной кривой полученной в конкретных условиях литья. Применительно к тонкостенной заготовке поршневого кольца получение экспериментальной температурной кривой достаточно трудно. Если использовать традиционную методику записи температурной кривой с помощью термопар, на результаты экспериментов большое влияние оказывает не только инерционность термопары, но и в большей степени влияние самой термопары на процесс кристаллизации заготовки.

С целью экспериментального исследования процессов кристаллизации заготовок разработана методика бесконтактного измерения, в основу которой положен принцип 4-х плечного трансформаторного измерительного моста. Его отличительной особенностью является наличие индуктивно связанных плеч в диагонали источника питания высокой частоты. Для того, чтобы мост был уравновешенным, параметры катушек (плеч моста), подбирали таким образом, чтобы напряжения во вторичных обмотках трансформатора были равны по величине и фазе падением напряжения в плечах моста. Разработанный трансформаторный измерительный мост обеспечивает практически постоянную чувствительность при измерении в широком диапазоне частот с погрешностью до 1%. Максимальная чувствительность схемы получена при частоте 26 кГц и напряжении 10 в, схема позволила фиксировать не только процесс затвердевания, но и структурные превращения, происходящие в заготовке в процессе охлаждения.

В качестве объекта для проведения расчета выбрано кольцо с наружным диаметром $d_n=110$ мм, $d_{nn}=100$ мм и высотой $\delta=3$ мм. На рис. 3 представлена расчетная схема процесса.

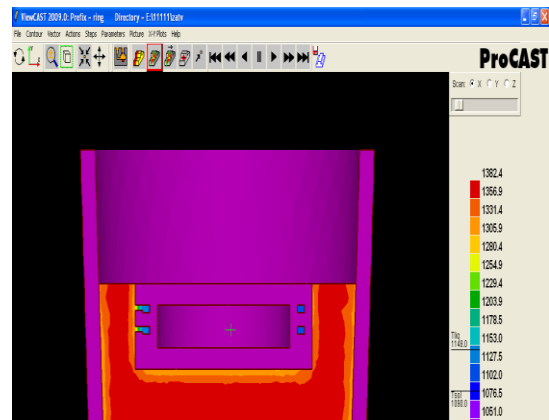


Рис. 3. Расчетная схема процесса

Коэффициент теплопередачи между отливкой и формой приняли равным $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

На первом этапе проведен анализ влияния толщины формы на процесс затвердевания отливки. Расчеты проведены для форм с толщиной стенки 3, 5 и 10 мм при различных температурах расплава в двух сечениях отливки: в месте подвода расплава в форму и напротив питателя. Предварительные эксперименты, проведенные в лабораторных условиях, показали, что при толщине формы 3 мм очень часто имеют место случаи разрушения стержней в процесс заполнения формы расплавом. Использование форм с толщиной стенки 10 мм экономически нецелесообразно, т.к. увеличение толщины больше 5 мм не оказывает существенного влияния на время затвердевания заготовок. В связи с этим все дальнейшие расчеты и эксперименты проведены для форм с толщиной стенки 5 мм.

Основное требование, предъявляемое к заготовкам – получение необходимой структуры чугуна твердостью 96-114 HRB и равномерностью ее по периметру заготовки. Очевидно, что в области температур выше 900°C необходимо снижение интенсивности охлаждения заготовки, для того чтобы исключить затвердевание расплава в процессе заполнения формы и образование отбела в структуре чугуна, в связи с этим представляет интерес предварительный нагрев формы.

На рис 4. Представлены расчетные данные процесса затвердевания отливки при температуре заливаемого металла 1380°C и температуры формы 200°C . Время затвердевания отливки составляет от 2,5 до 3 с, в зависимости от выбранного расчетного сечения. Очевидно, что с увеличением температуры расплава и температуры формы время полного затвердевания отливки возрастает. Представляет интерес сопоставить расчетные данные с экспериментальными.

Для исследования процессов кристаллизации заготовок разработана методика бесконтактного измерения, в основу которой положен принцип 4-х плечного трансформаторного измерительного моста. Его отличительной особенностью является наличие индуктивно связанных плеч в диагонали источника питания высокой частоты. Для того, чтобы мост был уравновешенным, параметры катушек (плеч моста) подбирали таким образом, чтобы напряжения во вторичных

обмотках трансформатора были равны по величине и фазе падениям напряжения в плечах моста. Разработанный трансформаторный измерительный мост обеспечивает практически постоянную чувствительность при измерении в широком диапазоне частот с погрешностью до 1%. Максимальная чувствительность схемы получена при частоте 26 кГц и напряжении 10 в, схема позволила фиксировать не только процесс затвердевания, но и структурные превращения, происходящие в заготовке в процессе охлаждения.

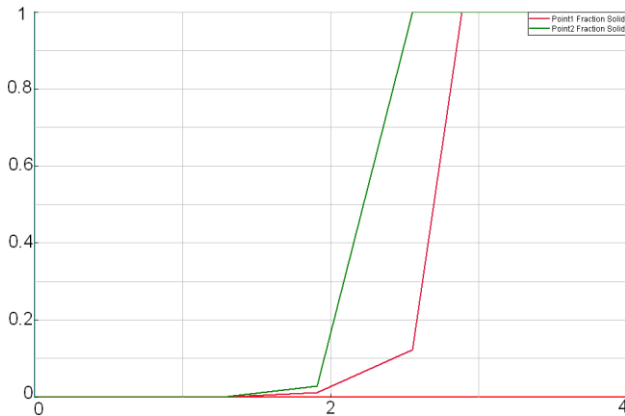


Рис. 4. Расчетные данные процесса кристаллизации отливки

Экспериментальные исследования показали, что при температуре заливаемого металла 1380°C и температуре формы 200°C время полного затвердевания кольца приблизительно на 15-20% меньше. С увеличением температуры формы разница между расчетными и экспериментальными данными возрастает.

Расхождение данных, возможно, связано не только с неточностью заданного изменения количества твердой фазы в зависимости от температуры, в конкретных условиях литья, но и принятыми постоянными теплофизическими характеристиками, коэффициентами теплопроводности и теплоемкости в зависимости от температуры расплава. Кроме того, кристаллизационные параметры сплава зависят не только от тепловых условий процесса формирования, но и от состава чугуна, природы шихтовых материалов, условий выплавки, рафинирования, модифицирования расплава и т.д.

Для традиционных способов литья тонкостенных заготовок пористость является одним из основных видов брака, особенно при литье одианных заготовок из высокопрочного чугуна. Проведенное математическое моделирование показало, что при оптимальных тепловых условиях формирования, дефекты усадочного происхождения в отливках, как из серого, так и высокопрочного чугуна, отсутствуют. Экспериментальные исследования подтвердили, что в отливках отсутствуют не только усадочная пористость, но и ситовидная пористость в поверхностных слоях отливки, которую обычно связывают с влиянием формовочных материалов, используемых в технологических процессах.

Для получения высококачественных заготовок из высокопрочного чугуна основное внимание необходимо уделить предварительной подготовке расплава. Одним из

наиболее простых способов, с технологической точки зрения, является рафинирование расплава в процессе индукционной плавки чугуна. Интенсивное перемешивание металла со шлаком и эмульгирование шлака в металле, под действием электродинамического воздействия, сопровождается уменьшением толщины диффузионного слоя каждой из фаз, увеличением поверхности их соприкосновения. Порционное введение рафинирующих добавок в печь в процессе расплавления шихты, позволяет обеспечить непрерывное рафинирование жидкого металла. Степень десульфурации при плавке чугуна обычно превышает 90 %. При использовании индукционных тигельных печей с кислой футеровкой следует учитывать, что проведение в них технологических операций по десульфурации расплава нерационально, так как вследствие взаимодействия шлаков с футеровкой стойкость ее существенно снижается. Повышение затрат на основную (магнезитовую, доломитовую) футеровку окупается снижением затрат на высококачественную шихту и модифицирование. Обеспечение более полного удаления из расплава неметаллических включений и газов, позволяет повысить структурную однородность сплава по сечению литой заготовки.

Проведение рафинирующей обработки расплава, перед разливкой чугуна в индукционной раздаточной печи, позволяет значительно снизить количество сфероидизирующего модификатора, необходимое для получения чугуна с шаровидным графитом, а, следовательно, повысить качество получаемых заготовок. Применительно к данной технологии отработаны параметры комплексного рафинирующего воздействия на расплав (десульфурация и раскисление) в сочетании с модифицированием расплава графитизирующими и сфероидизирующими модификаторами, обеспечивающими получение высококачественных заготовок.

Вследствие минимального интервала времени между модифицированием и заполнением формы расплавом, входящие в состав лигатуры графитизирующие элементы дают наибольший эффект. Кристаллизация сплава идет преимущественно с образованием аустенитно-графитной эвтектики, что также оказывает положительное влияние на снижение брака по пористости.

Особенность предложенных технологических решений состоит в том, что в них процессы рафинирования и модифицирования расплава можно проводить комплексно, в одной технологической операции. При этом построении технологии появляется дополнительная возможность повышения результативности металлургической обработки расплава не только за счет повышения степени очистки его от неметаллических загрязнений, но и путем оптимизации процессов модифицирования.

Таким образом, за счет активного воздействия на скорость затвердевания и охлаждения в различные периоды формирования отливки предлагаемый технологический процесс обеспечивает получение заготовок без структурно-свободных карбидов с требуемым уровнем физико-механических свойств без применения энергоёмкой термической обработки. Оптимальные тепловые условия формирования обеспечивают равномерность твердости по периметру заготовки. Физико-механические свойства и

микроструктура удовлетворяют требованиям технических условий на поршневые кольца. Возможно получение одинарных литых заготовок из высокопрочного чугуна доэвтектического состава свободных от дефектов усадочного происхождения. Значительно сокращаются безвозвратные потери металла, так как нет необходимости использовать большое количество отходов производства, составляющих более 50% при традиционной технологии литья. Замена традиционной технологии литья индивидуальных заготовок поршневых колец в песчано-глинистые формы на способ литья погружением позволяет при высокой производительности процесса, увеличить выход годного до 85-95%, значительно упростить и удешевить

технологический процесс.

Литература

- [1] Sutherland A. The development of the immersion casting technique for piston ring casting. The British Foundryman, 1977, №70, №9, 255-263
- [2] В.И.Тутов, Г.И. Столярова и др. Метод получения индивидуальной отливки поршневого кольца. Республиканский межведомственный сборник Металлургия №12 Минск, 1978 г с.45-47.

Resource-saving technology for manufacturing billets for piston's rings

A. N. Krutilin

Belarusian National Technical University

Summary

Piston's rings are one of the most critical parts of heavy-duty engines for wear-work in conditions of prolonged exposure of alternating loads and high temperatures. Currently in the world production of billets for piston's rings is dominated by the two methods of casting: production of individual and oiling billets of gray and ductile cast iron in green-sand mold and shell mold and centrifugal casting method (intended primarily for oiling billets of ductile iron); the technology for individual production billets for piston's rings with a diameter up to 250 mm, from 250 to 450 mm with individual and oiling ways, over 450 mm - preference of oiling billet. The best parameters of physical-mechanical and operational characteristics piston's rings are in the case of manufacture of billets to the maximum extent approaching the configuration to the finished product. The rings made of shaped billets are characterized by uniform distribution of properties from the perimeter, provide a given diagram of pressures and full fit to the cylinder. Because of deficiencies of traditional methods of casting, continuous quality requirements for billets, the need for economy of material, fuel and energy resources, are finding new progressive technological processes of production of high-quality billets for piston's rings. One of the most promising for piston rings billet is a method of casting consists of immersing the sand molds into the melt. It is interesting idea, expressed by A. Sutherland and subsequently patented in several countries in the way of casting method, called "immersion pouring technology" (ICT-Immersion Casting Technique) [1]. Experiments, conducted in the laboratory of the Belarusian National Technical University, have identified significant shortcomings of immersion method of casting. When forms are immersing, have an intensive gassing in molten metal, and freezing of the metal on the out surface of the form. But despite some shortcomings, the proposed process is characterized by a significant reduction of laboriousness, improved working conditions, a significant decreasing of molding materials, decreasing of production areas, complete except flasks and ladles. In the Belarusian National Technical University was developed an improved method of casting immersion [2], schematic diagram of the process was shown in Figure 1. Thin ring single mould (5-10 mm), core sand - made, collect by means of a special device to the blocks. Pouring and filling billets are being when preheated moulds immersing in melt metal through one or more gatings, leaving the outer surface of the mould. Filling billet is directly from the molten pool until its complete solidification, after finishing of billet's crystallization, non - solidified metal from the gatings goes back into the oven. For a long time, based on experimental investigation are identified optimal technological parameters of the process of casting billets of low-alloyed gray and ductile iron. Through the minimum time between the modification and pouring moulds of melt, graphitized items, in ligatures, have the greatest effect. Crystallization of the alloy is mainly running with the formation of austenite-graphite eutectic, which also has a positive effect on reducing marriage to porosity. Due to the active influence on the rate of solidification and cooling at different periods of the formation of the casting, provides technological process provide to obtaining billets without structurally - free carbides with the requisite level of physical and mechanical properties without the using of energy-intensive heat treatment. Optimal thermal conditions for the formation provide uniformity of hardness on the perimeter of billet. Physical-mechanical properties and microstructure satisfy the technical requirements for piston's rings. Possibility to obtain a single cast billets of ductile iron with hypoeutectic composition, free shrinkage defects. Significantly reduces the deadweight loss of the metal, because there is no need to use big quantity of waste of production, accounting more than 50% with the traditional casting technology. Replacing the traditional casting technology of individual billets of piston's rings in the green-sand moulds with casting by immersion, allows high-performance process, increase the yield of up to 85-95%, make technological process simplified and cheaper.