

РАЗДЕЛ 6

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ С ЗАДАННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Математическая модель износа цилиндров, расчет термодинамических процессов кристаллизации и охлаждения отливки, определение оптимального химсостава чугуна обеспечены создать реальный технологический процесс получения втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания с заданной дифференцированной износостойкостью рабочей поверхности. Промышленная реализация приведенных выше разработок осуществлялась на четырех заводах: “Первомайскдизельмаш”, где отливались втулки цилиндров с дифференцированной износостойкостью при литье в песчано-глинистые формы, на Черноморском судостроительном заводе, где отливались втулки центробежным способом, на ПО “Киевтрактородеталь” и Конотопском заводе “Мотордеталь”, где изготавливались гильзы цилиндров тракторных и комбайновых двигателей.

Изготовление втулок цилиндров судовых дизелей по сравнению с изготовлением гильз тракторных двигателей имеет значительные отличия. Так, втулки цилиндров судовых дизелей имеют значительно большую массу детали, толщину стенки и как следствие – время формирования отливки более продолжительное. Если для тракторных гильз основные трудности были связаны с процессом кристаллизации и обеспечением необходимой формы графита, то для крупных судовых отливок этот вопрос не так актуален. В свою очередь, обеспечение заданной структуры металлической матрицы приобретает особую актуальность. Изготовлению каждой группы деталей присуща своя специфика.

Для судовых дизелей работа проводилась в комплексе:

- разрабатывался состав комплексно-легированного чугуна;
- разрабатывалась лигатура для получения легированного чугуна;
- разрабатывалась технология отливки втулок цилиндров в песчано-глинистые формы с переменной износостойкостью;
- разрабатывалась технология центробежной отливки втулок с заданной дифференцированной износостойкостью рабочей поверхности;
- разрабатывался химсостав, технология получения чугуна и отливки поршневых колец;
- разрабатывался химсостав чугуна, технология отливки и упрочнения поршней судовых дизелей.

6.1. Теоретические предпосылки создания технологии получения цилиндров с заданными переменными свойствами

Требования к износостойкой структуре серых чугунов для втулок цилиндров судовых дизелей, обладающих высокой износостойкостью, следующие:

- включения графита должны быть, возможно, более крупными, прямой или среднезавихренной формы;
- чугун должен быть максимально крупнозернистым;
- металлическая матрица должна состоять из сорбитообразного перлита в литом состоянии, допускается наличие отдельных включений цементита в количестве, не превышающем 2...5 % площади шлифа; феррит не допускается;
- микротвердость перлита должна быть максимально высокой.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на процесс формирования износостойкой структуры крупных отливок из серого чугуна:

графитообразование и формирование металлической матрицы. Н.Г. Гиршович [39] отмечает, что вопрос о механизме образования, природе и местонахождении зародышей графита остается наименее выясненным и наиболее спорным в теории графитизации. Рассмотрим только графитизацию в процессе первичной кристаллизации. Основными факторами в формообразовании графита будут:

- природа, строение и форма зародышей центров графитизации;
- механические факторы;
- соотношение скоростей роста граней.

В свою очередь, эти факторы находятся в зависимости от химического состава чугуна, способа выплавки, футеровки печи, времени выдержки расплавленного металла до заливки, температуры перегрева и разлива, вида и температуры изложницы и многих других.

Перегрев металла при выплавке способствует уменьшению количества зародышей и даже полному их исчезновению. Вследствие этого происходит измельчение зерна и размеров графитовых включений. Перегрев улучшает механические свойства чугуна, повышая предел прочности на растяжение, изгиб и стрелу прогиба, но ухудшает износостойкие свойства вследствие измельчения зерна и графитовых включений. Должен существовать оптимальный интервал температур выплавки, определяемый в каждом конкретном случае. Увеличение температуры перегрева способствует отбеливанию, что особенно опасно при отливке в металлические формы. Максимальную температуру выплавки следует определять как минимально допустимую для ввода необходимых легирующих элементов. В этом случае целесообразным является использование лигатур, обеспечивающих более низкую температуру выпуска металла из печи.

Укрупнения включений графита, устранения образования междендритного графита, выравнивания структуры можно добиться путем

модифицирования чугуна.

Как уже отмечалось выше, почти все легирующие элементы, за исключением титана, способствуют укрупнению графитовых включений и повышению износостойкости чугуна.

Основным фактором, влияющим на формообразование графита, является скорость кристаллизации [17]. В случае высоких скоростей кристаллизации образуется белый чугун с полностью связанным углеродом. При очень малой скорости кристаллизации и охлаждения образуется серый ферритный чугун. Для образования чисто перлитной структуры металлической матрицы требуется точное определение термодинамических свойств формы при данном химсоставе чугуна, массе отливки, толщине стенки и температуре заливки металла. Снижение скорости кристаллизации способствует образованию в структуре равномерно распределенного графита без наличия междендритного и точечного графита.

Основные свойства металлической матрицы формируются под влиянием химического состава чугуна и скорости кристаллизации и охлаждения отливки. Как уже отмечалось, все легирующие элементы в большей или меньшей степени упрочняют перлит. Происходит образование карбидов и гомогенизация структуры, что благоприятно отражается на износостойкости чугуна [86]. Наибольшее влияние на износостойкость металлической основы оказывает степень дисперсности перлита. Лучшими свойствами обладает сорбитообразный перлит в литом состоянии. Получение такой структуры можно добиться путем ускоренного охлаждения отливки в области температур перлитного превращения.

Получение литой структуры мелкодисперсного перлита является основной задачей, так как при одной и той же дисперсности и твердости литая структура обладает более высокой износостойкостью, чем аналогичная структура чугуна, полученная в результате термообработки.

К числу наиболее существенных факторов, определяющих структуру и свойства чугуновых отливок втулок цилиндров, следует отнести способ выплавки чугуна и способ получения заготовки.

Наиболее распространенный способ выплавки чугуна, широко применяемый на отечественных двигателестроительных предприятиях, в вагранках, имеет недостатки: нестабильность химического состава и свойств получаемого чугуна, высокую насыщенность жидкого чугуна газами и др. Улучшение технологии плавки чугуна в вагранке не преодолевает присущих ей основных недостатков.

Практический опыт ведущих отечественных и зарубежных фирм показывает, что выплавку чугуна для втулок цилиндров ДВС более целесообразно проводить в индукционных и электродуговых печах. К примеру, применение индукционных печей взамен вагранки позволяет: улучшить механические свойства чугуна, снизить угар легирующих элементов, добиться точного перегрева металла до заданной температуры, обеспечивать более точное получение химического состава и свойств чугуна, снизить насыщенность металла газами. Однако стоимость чугуна из электропечи значительно выше, чем из вагранки.

Способ получения заготовок втулок цилиндров ДВС зависит, прежде всего, от размерности двигателя и серийности выпуска. Втулки цилиндров двигателей малой размерности, к примеру, автотракторных, изготавливают центробежным литьем в облицованные кокилы. Втулки среднеоборотных дизелей преимущественно отливают в песчано-глинистые формы, а малооборотных двигателей – исключительно в разовые песчано-глинистые формы.

Рассмотрим технологический процесс получения отливок втулок цилиндров на примере судового среднеоборотного дизеля типа ЧН 25/34. Заготовки втулок цилиндров отливаются в песчано-глинистые формы

вертикально вверх опорным буртом, над которым с целью создания гидростатического напора и получения плотной отливки предусматривается прибыльная часть. После выбивки и обрубки заготовки в процессе предварительной механической обработки прибыльная часть отрезается и идет на переплав. Чистовой вес втулки цилиндра, устанавливаемой на дизеле ЧН 25/34, равен 78 кг, а заливочный вес заготовки – 220 кг, причем примерно треть веса приходится на отрезаемую прибыль. Коэффициент использования металла, равный отношению чистового веса втулки к весу заготовки, составляет порядка 0,36, что является крайне низкой величиной. Помимо того, технологический процесс довольно длительный, требует наличия специальной модельной оснастки. Особую остроту приобретает сейчас необходимость регенерации отработанных формовочных смесей, расходуемых в больших количествах. Приведенные недостатки свидетельствуют об определенных несовершенствах технологического процесса получения отливок втулок цилиндров литьем в песчано-глинистые формы.

Технологический процесс получения заготовки втулок цилиндров центробежным способом лишен большинства недостатков, присущих рассмотренному процессу: обладает высокой производительностью, коэффициент использования металла выше из-за отсутствия прибыли, не требуется модельной оснастки, не требуется работ с формовочными и стержневыми смесями, поскольку отливка производится в изолированный металлический вращающийся кокиль.

Отливка втулок судовых и тепловозных дизелей центробежным способом освоена на заводах “Русский дизель” (Санкт-Петербург), АО “Румо” (Нижний Новгород). К примеру, на заводе АО “Румо” применяется следующая технология. Во вращающийся кокиль засыпается формовочная смесь, затем с помощью специальной гладилки выравнивается, приобретая форму наружной поверхности отливки втулки. Назначение смеси

в данном случае двойко: во-первых, препятствовать появлению отбела на наружной поверхности, во-вторых, создавать заданную конфигурацию отливки, уменьшающую припуски на механическую обработку. Уплотнение смеси внутри кокиля и придание ему заданной формы может осуществляться накатными роликами.

Основным недостатком рассмотренного технологического процесса следует признать наличие хотя и незначительного, но все же трудоемкого комплекса формовочных работ и повышенного припуска на механическую обработку, а также большую величину остаточных напряжений в отливке. Величина остаточных напряжений полученных отливок такова, что она не всегда снимается низкотемпературным отпуском. В результате этого в процессе эксплуатации возникает коробление втулок, увеличивается их износ, возможен задир. Применение же низкотемпературного отжига приводит к сильному снижению твердости и износостойкости чугуна.

Рассмотрим более подробно характерные особенности формирования отливок, получаемых центробежным способом из доэвтектических чугунов, идущих на изготовление втулок ДВС.

Микроструктура втулок в тех случаях обеспечивает высокую износостойкость, когда представляет собой перлитную матрицу высокой степени дисперсности и средние по разветвленности колонии графита. Получение в центробежных отливках такой структуры сопряжено с рядом сложностей. При соприкосновении расплава чугуна с поверхностью металлического кокиля разность температур между расплавом и поверхностью достигает величины порядка 1000 °С. В результате этого кристаллизация происходит с высокой скоростью, вследствие чего – появление в структуре междендритного графита, что снижает антифрикционные характеристики чугуна. Скорость охлаждения все еще остается высокой и после кристаллизации отливки, поэтому последующие структурные

превращения происходят в метастабильном состоянии с появлением в структуре чугуна цементита, занимающего значительную часть площади шлифа. На наружной поверхности отливки, соприкасающейся с кокилем, микроструктура может состоять полностью из цементита. Желанием снизить скорость охлаждения до величин, обеспечивающих получение оптимальной микроструктуры, продиктовано решение наносить на поверхность кокиля формовочную смесь, как это имеет место на заводе “Русский дизель”.

При подаче жидкого металла во вращающийся кокиль каждая частица, находящаяся в металле, подчинена законам вращательного движения. Неметаллические частицы, погруженные в жидкость и вращающиеся вместе с ней, находятся под действием силы гидростатического давления, направленной к оси вращения и равной центробежной силе, развиваемой вытесненным объемом жидкости. Наиболее плотный металл оказывается на периферии отливки, а менее плотный – на внутренней (рабочей) части поверхности втулок цилиндров.

У центробежных отливок по сечению наблюдается градиент плотности и сегрегация элементов.

Теплообмен между отливкой и кокилем происходит:

- теплоизлучением (этот процесс особенно интенсивен в первый момент после заливки, когда температура нагрева металла велика);
- теплоотдачей воздуху, поступающему с торца в кокиль;
- теплоотдачей с поверхности кокиля.

Наибольшее количество тепла, отводимого от расплава, приходится на теплоотдачу с поверхности кокиля, поэтому затвердевание отливки начинается от ее наружной поверхности (зона соприкосновения с кокилем) и направлено вовнутрь. Охлаждение внутренней поверхности менее интенсивно, поэтому встречный наружному фронт кристаллизации формируется позже. При их соприкосновении образуется пояс раковин,

расположение которого по сечению отливки, при прочих равных условиях, зависит, прежде всего, от интервала запаздывания начала формирования внутреннего фронта кристаллизации и скорости его продвижения. Чем позже он возникает, тем ближе к внутренней поверхности будет расположен пояс раковин, и наоборот. Следовательно, изменение интенсивности теплоотдачи от наружной и внутренней поверхностей может позволить регулировать процесс формирования фронтов кристаллизации и развитие процессов затвердевания отливок.

Микроструктуре центробежных отливок свойственны свои закономерности изменения по сечению:

- зона с мелкокристаллическим строением толще, чем в стационарных отливках;
- столбчатые кристаллы нередко наклонены в сторону вращения.

Чугун – сплав, структура которого находится в зависимости от скорости охлаждения. При высокой скорости охлаждения графит не успевает выделиться из сплава и получается метастабильная структура, образуется белый чугун. Изменение скорости кристаллизации чугуна по сечению отливки приводит к тому, что в одной отливке одновременно существуют участки с различной формой графита и структурой металлической основы, так как на образование структуры металлической основы решающее влияние оказывает кинетика эвтектического превращения, характер которой в значительной степени зависит от скорости затвердевания и охлаждения отливки в каждой точке.

Все более широкое применение в практике получения качественных отливок находят легкоплавкие синтетические шлаки. Химическое взаимодействие между исходными шлаками, серой и кислородом приводит к образованию неметаллических включений, на которые действуют выталкивающие силы. Необходимым условием всплытия неметаллических

включений на внутреннюю поверхность отливки является хорошее смачивание, т.е. контакт неметаллических включений с металлом и шлаком. В шлаках растворяется азот и водород. В ряде случаев шлаки способствуют раскислению (кальций). Для улучшения рафинирования чугунов создают специальные перемешивающие устройства, увеличивающие площадь соприкосновения расплава и шлаков. Продукты взаимодействия обладают малой плотностью и температурой плавления на 100...600 °С меньше чугуна.

Скорость охлаждения в эвтектическом интервале надо замедлить, чтобы превращения происходили полностью в стабильной системе, и целесообразно достигнуть созданием защитного теплоизоляционного покрытия на поверхности кокиля. Технологически это может быть осуществлено созданием теплоизоляционной оболочки из песчано-глинистых смесей (завод “Русский дизель”, АООТ “Румо”). Такое решение действительно позволяет получать отливки с износостойкими структурами. Вместе с тем рассмотренному решению присущи и недостатки: наличие двух фронтов кристаллизации в центробежной отливке приводит к появлению усадочной пористости в ее центральной части, примерно на 1/3 от внутренней поверхности. Поры могут попасть на рабочую поверхность втулки цилиндра. Это недопустимо, поэтому их стремятся сосредоточить в припуске под механическую обработку, увеличивая его и заливочный вес. Такое решение не реализует возможности центробежной отливки как способа снижения материалоемкости заготовки.

Помимо того, применение песчано-глинистых покрытий кокиля требует дополнительных технологических операций формовки и сушки покрытия в кокиле. На заводе “Русский дизель” эти подготовительные операции занимают треть рабочего времени. Более технологичным способом нанесения защитных термоизоляционных покрытий на поверхность кокиля следует признать нанесение смеси пульвербакелита и кварцевого песка, которое не

требует таких подготовительных операций и может быть совмещено с операцией нагрева кокиля. Но этот процесс сопровождается выделением большого количества токсичных газов.

Чтобы сосредоточить усадочные раковины на внутренней поверхности заготовки, избежав их появления на рабочей поверхности, и тем самым снизить заливочный вес заготовки, представляется целесообразным применять рафинирующие синтетические шлаки. Как правило, они имеют более низкую температуру плавления и затвердевают последними. Шлаки легкоплавки, активно взаимодействуют с серой. Если в кокиль одновременно с металлом поступит этот шлак, то под действием центробежных сил в силу своей меньшей плотности он будет находиться на внутренней поверхности расплава, препятствуя его непосредственному соприкосновению с воздухом. Температура плавления шлака ниже, чем у чугуна, шлак закристаллизуется последним в отливке. Следовательно, наличие легкоплавкого шлака на поверхности расплава изменяет интенсивность теплоотвода, создавая тем самым благоприятные условия для получения направленной кристаллизации отливки, способствующей концентрации пор и раковин усадочного происхождения в сравнительно небольшом поясе вблизи внутренней поверхности отливки.

Для создания в чугунной отливке графита нужной формы и размеров необходим ряд условий:

- наличие центров графитизации, которыми выступают либо частицы графита, либо близкие ему по размерам кристаллической решетки металлы (магний, церий);
- соответствие скорости охлаждения расплава скорости диффузии атомов углерода (из пересыщенного раствора) при данных путях диффузии к графитовым центрам.

При центробежной отливке необходимо, помимо уменьшения скорости охлаждения, создавать дополнительные центры графитизации. Для более ясного понимания процесса следует учесть, что графитизация протекает в несколько стадий (речь идет о доэвтектических чугунах):

- первая, во время эвтектической кристаллизации;
- вторая, промежуточная, – выделение графита из переохлажденного расплава.

Таким образом, для получения отливок из серого чугуна с заданными свойствами при литье центробежным способом целесообразно выполнить следующие технологические мероприятия:

- провести модифицирование чугуна лигатурой на основе РЗМ;
- ввести в ковш легкоплавкий синтетический шлак, который при транспортировке защищает зеркало металла, а при поступлении в кокиль он перемешивается с расплавом чугуна, рафинирует его, сосредотачиваясь затем на внутренней поверхности отливки;
- нанести на поверхность кокиля теплоизоляционное покрытие на основе пульвербакелита;
- управлять термодинамическими процессами кристаллизации и охлаждения отливки.

Кроме этого, принудительное управляемое охлаждение центробежной отливки с внутренней стороны благоприятно сказывается на характере остаточных напряжений в детали. При принудительном охлаждении на внутренней поверхности создаются сжимающие остаточные напряжения, благоприятно сказывающиеся на износостойкости рабочей поверхности. Сжимающие напряжения также благоприятны с точки зрения прочности втулки. Создается как бы “преднапряженное” состояние, и возможно уменьшение толщины стенки втулки, уменьшение ее веса и снижение термических напряжений в детали.

Предложенным комплексом технологических мероприятий представляется возможным получить отливки заготовок втулок ДВС, лишенные недостатков ранее рассмотренных технологических процессов центробежной отливки втулок цилиндров.

Рассмотрим особенности формирования структуры и свойств заготовок, получаемых литьем в песчано-глинистые формы.

С целью получения плотной структуры в отливке предусматривается прибыль высотой 200...300 мм. Наличие прибыли еще больше увеличивает отношение длины к диаметру заготовки, что уменьшает долю тепла, отводимого через стержень при охлаждении отливки. Различный теплоотвод со стороны внешней и внутренней поверхности заготовки втулки обуславливает неравномерность скоростей кристаллизации и охлаждения в отдельных точках отливки. Пониженные скорости кристаллизации и охлаждения на внутренней поверхности цилиндрической отливки приводят к огрублению перлита и снижению твердости. Разница в твердости внутренней и наружной поверхности достигает до 30 НВ. Наличие двух фронтов кристаллизации с различной скоростью роста корки приводит к образованию усадочных дефектов в районе $1/3$ толщины отливки со стороны внутренней поверхности [180], т.е. в рабочей зоне. Как видим, при отливке втулок цилиндров в песчано-глинистые формы, как и при центробежной, вследствие различных условий кристаллизации чугуна на внутренней и наружной поверхности в рабочей зоне цилиндра формируется структура чугуна с наиболее низким качеством. Наличие микропористости в сочетании с крупнопластинчатым перлитом обуславливает низкую износостойкость втулок цилиндров, отлитых в песчаные формы.

С целью выравнивания свойств отливки по всему сечению применяется искусственное охлаждение в зоне пониженного теплоотвода [5; 53; 188]. Г.А. Анисович рекомендует [5] при отливке в песчано-глинистые формы

выравнивать скорость охлаждения отливки постановкой специальных охлаждающих трубчатых элементов. В качестве теплоносителя используется воздух, водо-воздушная смесь или вода. К недостаткам этого метода можно отнести опасность применения воды и малую эффективность использования воздуха. Хорошие результаты данный способ отливки может дать при получении крупных заготовок втулок цилиндров крейцкопфных дизелей, когда масса заготовки достигает нескольких тонн и возможно увеличение скорости охлаждения в несколько раз.

Как видно, требования к формированию износостойкой структуры чугуна крайне противоречивы: для получения оптимальной формы и размеров графита требуется медленное охлаждение, а для получения мелкодисперсной структуры металлической матрицы – повышенные скорости охлаждения. В реальных условиях отливки втулок цилиндров эти противоречия еще больше обостряются, так как при кристаллизации, вследствие большого перепада температур, между формой и жидким металлом скорость кристаллизации велика, а по мере охлаждения отливки происходит нагрев формы, теплоперепад и скорость охлаждения резко снижается.

На основании изложенного можно заключить:

1. Для обеспечения оптимальных скоростей охлаждения отливки и формирования износостойкой структуры требуется управление термодинамическими процессами формирования отливки в каждой ее точке с момента заливки металла в форму до выбивки заготовки.

2. Для образования в структуре чугуна крупных включений графита, исключения появления точечного и междендритного графита необходимо медленное охлаждение отливки в период кристаллизации до температур перлитного превращения, невысокий перегрев металла при выплавке, введение легирующих и модифицирующих добавок.

3. Для получения в структуре чугуна металлической основы сорбитообразного перлита требуется введение легирующих элементов и ускоренное охлаждение в области температур перлитного превращения.

4. Увеличение микротвердости перлита достигается путем легирования и повышения его дисперсности.