

О ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ И РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛА ИЗЛОЖНИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В центре внимания авторов находится проблема повышения эксплуатационной стойкости изложниц, широко применяющихся в практике работы металлургических предприятий и производств, решение которой актуально и по сей день. В этой связи ими поставлена цель – выявить закономерности, связывающие режимы эксплуатации изложницы с процессами, затрагивающими структуру и свойства ее материала, влияющие на качество слитка и технико-экономические показатели его производства, в частности эксплуатационную стойкость, и по результатам наметить перспективные пути ее улучшения. Для достижения цели проведен информационно-аналитический обзор публикаций по теме в открытых источниках и в условиях действующего производства выполнена исследовательская работа по мониторингу поведения материала изложницы на протяжении эксплуатации. С использованием современного лабораторного оборудования проведена термометрия рабочего цикла чугуновой изложницы, зафиксированы проявления деградации микроструктуры и ухудшение некоторых свойств, таких как прочность на разрыв, пластичность, коэффициент линейного термического расширения. Полученные результаты позволяют наметить перспективные направления решения указанной проблемы, в частности, связанные с жидкофазной обработкой чугуна и стали как материалов, наиболее широко применяемых в качестве материала изложниц.

Ключевые слова: изложница, эксплуатация, материал, структура, свойства, деградация

Введение

Как известно, изложницами называют литые чугунные или стальные формы, в которых из жидкого металла получают слитки требуемой массы и геометрических размеров, необходимых для последующей обработки давлением [1]. Процесс эксплуатации изложниц, или их жизненный цикл, представляет собой ряд повторяющихся рабочих циклов, каждый из которых включает последовательно выполняемые операции:

- наполнение изложницы металлическим расплавом (налив);
- выдержка слитка;
- стрипперирование (извлечение слитка из изложницы, или «раздевание слитка»);
- охлаждение изложницы без слитка;
- подготовка изложницы к следующему наливу.

По сути, изложницы работают в условиях малоциклового теплового воздействия (термического удара), приводящего к градиенту температур и возникновению вследствие этого термических напряжений, окислению, обезуглероживанию и эрозии рабочих поверхностей, появлению на них сетки разгара, продольных и поперечных трещин, коробления, что приводит к потере прочности и, как результат, разрушению.

Как утверждает профессор А.В. Кукса [2] и другие исследователи этого вопроса [3], главной характерной особенностью эксплуатации изложницы являются «стремительные циклически повторяющиеся односторонние нагревы от заливаемой во внутреннюю полость жидкой стали и последующие охлаждения, включая период после извлечения затвердевшего слитка». Именно это предопределяет разрушение изложницы и выход ее из строя.

Как следствие, анализ условий эксплуатации изложниц и поведения их материала при циклически повторяющихся термомеханических нагрузках уже довольно длительное время находится в центре внимания многих ученых. Не угасает интерес к этой проблеме и сейчас.

В этой связи авторами ставилась цель работы – выявить закономерности, связывающие режимы эксплуатации изложницы с процессами, затрагивающими структуру и свойства ее материала, влияющие на качество слитка и технико-экономические показатели его производства, в частности эксплуатационную стойкость, и по результатам наметить перспективные пути ее улучшения.

Для достижения поставленной цели ими был проведен информационно-аналитический обзор публикаций по теме в открытых источниках и в условиях действующего производства выполнена исследовательская работа по мониторингу поведения материала изложницы на протяжении жизненного цикла.

Информационно-аналитический обзор

Исследователям вопроса уже достаточно давно известно о таком негативном явлении, как деградация структуры и свойств изделий из железоуглеродистых сплавов (сталь, чугун) при циклическом термоусталостном нагружении [4-8].

Все возможные причины этого явления делятся на две группы: 1) не связанные с фазовыми превращениями в ходе нагружения; 2) связанные с влиянием фазовых превращений и переходов.

К проявлениям причин первой группы относятся изменения концентрации точечных дефектов, образование, взаимодействие и перераспределение новых дислокаций и микродефектов упаковки, например под воздействием деформационных процессов, а также перераспределение химических элементов, раство-

ренных в твердой фазе, путем изменения ликвационной структуры.

Признаками проявления причин второй группы выступают измельчение зерен, преимущественное растворение или выделение избыточных фаз и существенное изменение формы и размеров структурных элементов, выделяющихся из высокотемпературной фазы (аустенита) под влиянием фазовых превращений при нагреваниях железоуглеродистых сплавов выше температуры начала α - γ -превращения и последующих охлаждениях.

Многие работы ориентированы на вскрытие, объяснение механизма отрицательного влияния большого количества термоциклов, приводящих к формоизменению изделий и термоусталостному разрушению, хотя некоторые авторы отмечают, что после первых термоциклов металлические материалы упрочняются, а структурные изменения часто таковы, что улучшают качество металла [9-11].

В монографии [4], посвященной изучению формоизменений при нагреваниях и охлаждениях, указывается, что структура металлов при термоциклировании, имитирующем условия работы материалов при частых нагреваниях до полиморфных превращений, изменяется следующим образом: в начале нагревания устраняются дефекты, присутствовавшие в металле в исходном состоянии, а потом под влиянием термических напряжений происходит образование новых микродефектов структуры (дислокаций и их скоплений). В результате наблюдается разупрочнение металла на первых циклах и упрочнение, однако это упрочнение имеет место, лишь пока не исчерпается пластичность. После этого появляются микротрещины и прочность падает. Дальнейшее термоциклирование разрушает металл.

Более того, автор монографии впервые выдвинул гипотезу о том, что термоциклическое усталостное нагружение может инициировать новые механизмы деградации материала, которые не наблюдаются при изотермической усталости, в частности, приводящие к изменениям положения критических точек на диаграмме «железо-углерод» и, как следствие, сужению или расширению интервалов между ними.

Проведенные академиком А.А. Барановым с коллегами исследования структурных изменений при термоциклировании сталей и чугунов показали, что полиморфные, фазовые $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращения существенно изменяют структуру. Так, например, термоциклирование проволочных образцов из конструкционных сталей с нагревами до 900°C приводит к росту зерен, а многократное нагревание до температуры образования двухфазной ($\alpha + \gamma$)-области вызывает резкое измельчение структуры [4]. Этими же авторами отмечается и коагуляция карбидных фаз при термоциклировании.

Многие исследователи подтверждают, что при быстрых нагреваниях и охлаждениях структурные составляющие сплава, обладая разными теплопроводно-

стями, теплоемкостями, коэффициентами температурного расширения, характерными температурами и прочностными свойствами, претерпевают внутреннее микропластическое деформирование, тем самым влияя на степень упорядоченности феррита — твердого раствора углерода и других элементов в α -железе и физико-механические свойства материала в целом [12-14].

В качестве материала изложниц в подавляющем большинстве случаев применяют чугун (серый с пластинчатым графитом ЧПГ, высокопрочный с шаровидным графитом ЧШГ и с вермикулярным графитом ЧВГ) и лишь иногда углеродистую сталь.

Сложное напряженное состояние, возникающее в изложнице в условиях малоциклового температурного нагружения (в различных источниках: термоциклирование, термоусталостное нагружение), вызывает в наружных поверхностных слоях при изгибе стенок изложницы наиболее опасное двухосное растяжение, резко снижающее ее конструкционную прочность [15, 16]. Этому способствуют длительные температурные воздействия на графит и металлическую основу чугуна, приводящие к ослаблению границ зерен за счет выделения вторичных фаз (распад первичного цемента или цементита перлита, окисление графитных включений, оплавление фосфидной эвтектики и других легкоплавких составляющих, межкристаллитное окисление). Эти процессы существенно понижают пластичность и сопротивляемость чугуна разрушению. Изменения структуры и свойств чугуна изложницы вплоть до разрушения при термоциклировании зависят от формы, величины и распределения графита, неметаллических включений и наличия в материале литейных дефектов.

Изучению особенностей зарождения и развития микротрещин при термоциклировании в чугунах с различной формой графита посвящена работа [17]. Представленные в ней результаты исследований свидетельствуют о следующем.

В образцах из ЧПГ появление микротрещин было выявлено уже через 10–30 циклов нагрева-охлаждения, причем их распространение происходило от микротрещин в пластинках графита в металлическую матрицу в направлении к неметаллическим включениям и раковинам. В свою очередь, неметаллические включения, газовые раковины, усадочная пористость, а также точечные включения графита играли роль зародышей микротрещин, ускоряли их развитие и существенно снижали сопротивление разрушению при термической усталости и в итоге способствовали формированию разветвленной сетки микротрещин древовидного типа.

В ЧШГ эту негативную роль играли оксиды железа и сернистые включения магния и формировалась сетка микротрещин, часто в форме черных пятен или вырожденных сфероидов. При этом зарождение трещин было зафиксировано в крупных включениях свободного цемента или на границе раздела цемента с перлитом.

Поведение ЧВГ в условиях термоусталостного нагружения оказалось аналогичным поведению ЧШГ. При этом была выявлена интересная закономерность: микротрещины во включениях графита вермикулярной формы появляются тем позднее, чем большее значение имеет коэффициент их формы. При низком значении коэффициента формы трещины образуются на концах включений (как в пластинчатом графите) и инициируют развитие трещин в матрицу с максимальной скоростью. Максимальная длина микротрещин для чугунов с пластинчатым, вермикулярным и шаровидным графитом подчиняется соотношению 5:3:1, а сопротивление термической усталости соответственно 1:1,25÷1,4:1,6÷1,8. Получается, что в сравнении с ЧПГ ЧВГ имеет сопротивление термической усталости на 25-40%, а ЧШГ на 60-80% выше.

Авторы работы [18] выяснили, что с точки зрения обеспечения конструкционной жесткости деталей ферритные нелегированные чугуны с шаровидной и вермикулярной формами графита и серый легированный чугун с перлитной структурой практически равноценны. Большая толщина и закругленность графитовых пластин в ЧВГ уменьшают концентрацию внутренних напряжений по границам «графит-матрица», что обуславливает более высокие прочностные свойства, чем у ЧПГ, при одинаковой металлической основе. Высокие пластические свойства ЧШГ и ЧВГ позволяют при кратковременных механических нагрузках предохранить материал от аварийного разрушения за счет пластической деформации. С повышением температуры длительная прочность перлитного чугуна с вермикулярной формой графита остается несколько выше, чем ферритного, хотя за счет постепенного распада перлита эта разница уменьшается.

При исследовании влияния количества тепловых циклов на возникновение и развитие трещин было установлено, что трещины быстрее зарождаются и распространяются в ЧВГ с перлитной металлической основой. В перлитном ЧШГ также наблюдается раннее появление трещин, но их рост вначале замедлен, а затем ускоряется, приводя к концу испытаний к наибольшей длине образовавшихся трещин. Позже возникают и медленнее распространяются трещины в ферритном ЧВГ, что обусловлено как температурной стабильностью ферритной матрицы, так и ее высокой пластичностью. В этих условиях ЧПГ менее стоек в сопротивлении к зарождению и развитию термоусталостных трещин из-за более быстрого внутреннего окисления вдоль пластин графита.

В статье [19] говорится о выявленной ее авторами зависимости между энергией динамического разрушения и температурой для ЧВГ и ЧШГ с различным содержанием перлита, а также корреляции между комплексным параметром, объединяющим сопротивление разрушению и твердость, и сопротивлением усталостному разрушению для ЧВГ, имеющих перлитную и ферритную структуру. Установлено, что для

ЧВГ с преимущественно ферритной структурой (20% перлита) предел усталости составляет 173 МПа, а относительный предел усталости – около 0,45. При перлитной структуре (97% перлита) эти величины составляют соответственно 194 МПа и 0,37. Авторами отмечается, что эти свойства близки к аналогичным показателям для ЧШГ.

Говоря об изменениях структуры и свойств материала изложницы в процессе эксплуатации, недопустимо обходить вниманием явление так называемого роста чугуна, который в наибольшей степени проявляется у перлитного серого чугуна (признаки роста у ЧПГ фиксируются уже при 400°C) и оказывает существенное влияние на величину возникающих термических напряжений. Причины этого явления – графитизация при нагреве и накопление растворенного углерода на новых центрах графитизации при охлаждении, а также выделение газов из твердого раствора в поры (например, переход водорода из атомарного состояния в молекулярное или проникновение кислорода внутрь изделия), приводящее к окислению металлической матрицы чугуна особенно по границам включений графита или по границам зерен [20]. При неблагоприятных условиях, например термоциклировании, рост чугуна может достигнуть до 30% от первоначального объема и выше. Рост особенно велик, когда имеют место неодновременные фазовые превращения железа в различных слоях металла при частых колебаниях температуры. Это приводит к объемным изменениям, создающим сжимающие и растягивающие напряжения, обуславливающие возникновение микротрещин. Микротрещины сами увеличивают объем чугуна и далее по цепочке служат добавочными каналами для окисления металлической основы агрессивными газами. В итоге, вследствие объемной деформации и неравномерного приращения объема, в изложнице создаются предпосылки для коробления и зарождения и развития трещин. Механические свойства чугуна при этом сильно понижаются: он становится мягким и менее прочным.

Белорусские исследователи (А.Н. Крутилин с коллегами [18]) отмечают негативную роль цементита в структуре чугуна, поскольку теоретически 0,1% связанного в цементит углерода вызывает при распаде перлита увеличение объема примерно на 0,18%. Как следствие, распад перлита в условиях термоциклирования материала изложницы приводит к увеличению размеров до 1,5% и значительно ускоряется с ростом температуры под воздействием динамических нагрузок.

Наименее устойчив к росту серый чугун – ЧПГ. Это можно объяснить тем, что структура графитовых включений в нем часто имеет разветвленный характер (пластинки графита связаны между собой), что создает благоприятные условия для проникновения в чугун кислорода и внутреннего окисления. В нелегированном ЧШГ распад перлита происходит при 450°C, а при 500°C резко ускоряется, что дает рост чугуна на 0,4-0,5%. У ферритных чугунов рост практически не

наблюдается. У ЧВГ, как и у ЧШГ, большая в сравнении с ЧПГ устойчивость к внутреннему окислению может быть объяснена тем, что частички графита не связаны в разветвленную сеть.

Известно, что ЧШГ при комнатной температуре хорошо противостоит трещинообразованию вследствие своей высокой прочности и большой пластичности. Однако в условиях даже малоциклового термоусталостной нагрузки при высоких скоростях охлаждения из-за меньшей в сравнении с ЧПГ теплопроводности и высокого модуля упругости на охлаждаемой поверхности изложниц из ЧШГ возникают существенные растягивающие напряжения, которые, несмотря на высокую прочность и пластичность ЧШГ, приводят к быстрому возникновению трещин, и термостойкость ЧШГ оказывается меньше, чем у ЧПГ.

Автор работы [8] убедительно доказала, что одним из основных механизмов деградации структуры изделий из конструкционных углеродистых и низколегированных сталей в условиях термоциклических нагрузок и проявляющимся в протекании процессов деформационного старения является сфероидизация перлита вплоть до его вырождения в цементит.

Механизм усталостного разрушения в малоциклового области был изучен по результатам опытов на техническом железе еще Коффином [21], которым установлено, что процесс жесткого нагружения может быть разделен на три стадии. Первая характеризуется упругопластической деформацией, в процессе которой наблюдается образование пор и дробление кристаллических блоков. Начало второй стадии сопровождается образованием на поверхности образца разветвленной системы микротрещин, а с увеличением числа циклов трещины становятся шире. Эта стадия по продолжительности занимает 95% общей долговечности. В завершающей третьей стадии упругопластическая деформация локализуется, зарождается магистральная трещина, которая распространяется вплоть до разрушения.

Таким образом, в результате работы в условиях малоциклового температурного нагружения (термического удара) в изложнице возникают и развиваются трещины термической усталости, что приводит к потере прочности ее конструкции и в конечном итоге – к разрушению. Возникновение и развитие трещин происходит в наиболее напряженных местах по мере накопления числа циклов местной пластической деформации.

Как известно, разрушение является заключительной стадией почти всякой развивающейся деформации [22]. Оно может быть неполным и полным (хрупкие и пластические разрушения при кратковременном, длительном статическом или усталостном нагружении и т.п.). Материалу изложницы, как большинству реальных материалов, присуще одновременно и упругое и пластическое состояние, поэтому и характер разрушения при эксплуатации изложницы может быть как хрупким, так и пластическим.

В работе [15] автором предлагается закономерности процесса разрушения чугунной изложницы рассматривать отдельно для докритического, критического и закритического состояний. Разрушение в докритическом состоянии связывают с прерывистым (дискретным) строением реального материала, нарушением правильности строения (структуры) материала. Включения графита в чугуне, по его мнению, можно квалифицировать как полости, а линии сдвига – как микротрещины. Они являются нарушением правильности строения, субмикро- и микросплошности в объеме одного зерна или нескольких соседних зерен.

В процессе разрушения он различает:

- превращения исходной дефектности структуры последовательно в субмикро-, микро- и макроскопические нарушения сплошности – каверны и трещины и их докритическое развитие;

- наступление критического (неустойчивого) состояния и закритическое (взрывное) развитие магистральных трещин до полного разделения тела.

Для эксплуатации чугунных изложниц характерно закритическое (реже критическое) развитие хрупких трещин.

Завершая описание важнейших для понимания и достижения цели работы процессов деградации структуры и свойств материала изложницы, следует отметить, что оно в целом вписывается в так называемую деформационную (малоцикловую) теорию усталости [23], согласно которой разрушение наступает в момент исчерпания ресурса пластичности, вследствие накопления пластической деформации в каждом цикле. В ней в центре внимания находится величина деформации. Эта теория относится к той области циклических нагрузок, где они лежат выше динамического предела текучести $\sigma_{0,2}$, частота нагружения невысока и составляет от долей герца до нескольких герц, а разрушение происходит после сравнительно малого числа циклов.

Согласно этой теории, при циклическом нагружении в системе координат «деформация – напряжение» формируется петля гистерезиса, а физическая сущность малоциклового усталости материала основана на эффекте Баушингера – эффекте снижения пределов пропорциональности, упругости и текучести материала в результате изменения знака нагружения [24].

Исследовательская часть

В условиях действующего производства АО «РУСПОЛИМЕТ» проводили мониторинг изменений структуры материала изложницы – чугуна с пластинчатой формой графита СЧ15. Объектом исследования служила изложница типа К13С (кузнечная, сифонная, в сборке с турбостопом глуходонная), уширенная сверху, эксплуатируемая в комплекте с прибыльной надставкой и керамическим турбостопом на вакуумно-индукционной печи ВИП-4,6 (производитель – фирма INTECO) в цехе специальной электрометаллургии ПАО «РУСПОЛИМЕТ» для получения слит-

ков массой 1,3 т из сплава на никелевой основе ХН50ВМТЮБ (ЭП648). Норматив эксплуатационной стойкости подобных изложниц, установленный на предприятии, составляет 20 наливов.

На первом этапе выполняли термометрию рабочего цикла изложницы. Замеры температуры вели контактными термопарами (термопреобразователь ТП-N 0303.1-И-3-10000 Никробель с верхним пределом диапазона измерений 1200°C), установленными с одной стороны на двух уровнях (верх и низ) по высоте изложницы в середине стенки, а также зонах внутренней и внешней поверхностей, с интервалом 1 мин в течение рабочего цикла. Для измерений использовали безбумажный самописец марки LOGOSCREEN nt (производство фирмы JUMO GmbH & Co. KG, Германия) с TFT-дисплеем, CompactFlash-картой и USB-интерфейсом и 18 измерительными каналами. Результаты термометрии представлены на рис. 1.

Определили, что характер температурно-временных зависимостей изложницы К13С вполне соответствует графику типового термического цикла изложницы, представленного в монографии профессора Э.С. Зальцмана [25]. По ним определили, что максимальная температура внутренней поверхности в период термоудара в верхней ее части составила $T_{ПВmax} = 656^{\circ}\text{C}$, а в нижней части $T_{ПВmax} = 642^{\circ}\text{C}$. Наибольшая скорость (интенсивность) прогрева стен-

ки изложницы наблюдается в течение первого часа после ее заливки металлическим расплавом, затем она уменьшается. Максимальная средняя температура стенки изложницы была зафиксирована в конце периода прогрева и в верхней части оказалась равной $T_{срmax} = 590^{\circ}\text{C}$, а в нижней части – соответственно $T_{срmax} = 570^{\circ}\text{C}$, что несколько превышает температурный порог циклической вязкости СЧ15, равный, по некоторым данным, 550-560°C. В это же время наблюдался и максимальный температурный перепад ΔT_{max} по толщине стенки, достигающий 200°C.

На втором этапе исследований в лаборатории Исследовательского центра АО «РУСПОЛИМЕТ» на образцах изучали микроструктуру материала изложницы до ее ввода в эксплуатацию и после вывода из эксплуатации по причине недопустимых размеров сетки трещин разгара на рабочей поверхности. Образец №1 был вырезан из тела изложницы до ввода ее в эксплуатацию, образец №2 – после вывода изложницы из эксплуатации (изложница выдержала 30 наливов). Фотографии микроструктуры образцов №1 и 2 до травления представлены на рис. 2, 3. Микроструктуру чугуна фиксировали при помощи комплекса программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел Thixomet по ГОСТ 3443-87, ГОСТ 1778-2022 и ГОСТ 5639-82.

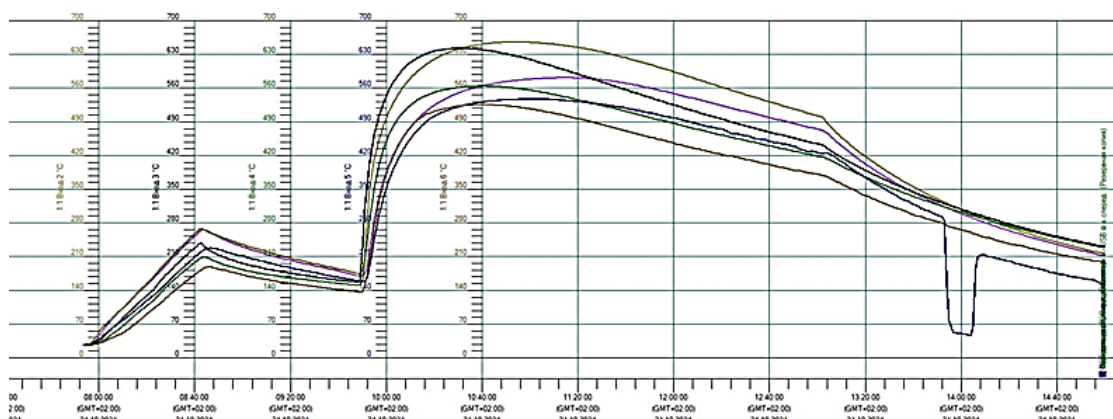


Рис. 1. Температурно-временные кривые $T(t)$ рабочего цикла изложницы К13С (снимок со шкалы прибора; резкий скачок вниз на одной из кривых связан с несанкционированным выходом термопары в верхней части изложницы из гнезда прибора)

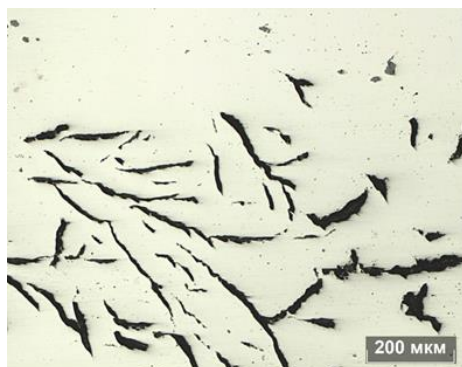


Рис. 2. Образец №1 ($\times 100$)



Рис. 3. Образец №2 ($\times 100$)

По результатам цифровой обработки серии снимков микроструктуры при различных увеличениях были получены характеристики микроструктуры:

– Образец №1

ПГф1-ПГр5-ПГд750-Пт2-П85(Ф15)-Пд0,5-ФЭЗ-ФЭп20000-ФЭр1-ФЭр2

Структура чугуна с пластинчатым графитом прямолинейной формы длиной 120-850 мкм; распределение включений графита – веточное; на всей площади шлифа фиксируются неметаллические включения (по морфологическим признакам силикатного, сульфидного типов и отдельные глобулы нитридов); металлическая основа неоднородная с четко выраженным дендритным строением: состоит из феррита и зернистого перлита; перлит в количестве ~85%; фосфидная эвтектика тройная мелкозернистая в виде отдельных включений равномерного распределения и на некоторых участках в виде разорванной сетки.

– Образец №2

ПГф1-ПГр5-ПГд750-Пт1-П45(Ф55)-Пд0,5-ФЭЗ-ФЭ5-ФЭп20000-ФЭр1

Структура чугуна с пластинчатым графитом прямолинейной формы длиной 120-860 мкм; распределение включений графита – веточное; на всей площади шлифа фиксируются неметаллические включения (по морфологическим признакам силикатного, сульфидного типов и отдельные глобулы нитридов); металлическая основа: перлит пластинчатый + феррит; перлит в количестве от 35 до 60 % с межпластинчатым расстоянием 0,63 мкм; фосфидная эвтектика тройная мелкозернистая и тройная с пластинами цементита в виде отдельных включений равномерного распределения.

На всех фото микроструктуры чугуна изложницы после ее вывода из эксплуатации (рис. 4) просматриваются такие признаки проявления деградации структуры, как увеличение в размере графитовых включений особенно в поверхностном слое, ослабление границ зерен за счет выделения вторичных фаз (возможно, продукты распада первичного цементита или цементита перлита), окисление графитных включений, оплавление фосфидной эвтектики и других легкоплавких составляющих, межкристаллитное окисление и др., которые, очевидно,

обусловлены циклическим температурным воздействием на графит и металлическую основу чугуна. Видны микротрещины в пластинках графита, которые распространяются в металлическую матрицу в направлении к неметаллическим включениям и раковинам.

На третьем этапе фиксировали изменение некоторых свойств материала изложницы при ее эксплуатации. В частности, по результатам проведенных испытаний образцов определили, что временное сопротивление на разрыв чугуна изложницы с момента ввода ее в эксплуатацию и до вывода из нее снижается со 175 до 145 МПа, то есть более чем на 15%, условный предел текучести соответственно со 170 до 140 МПа, то есть более чем на 17%, а относительное удлинение – с 2,3 до 0,3%, то есть приближается к нулевой отметке (снижение на 87%).

В лаборатории кафедры «Металлургические технологии и оборудование» НГТУ на dilatометре марки DIL 402 Expedis Select фирмы NETZSCH Gerätebau GmbH (Германия) на образцах измеряли величину коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) материала изложниц до ввода и после вывода их из эксплуатации. В итоге зафиксировали увеличение КЛТР с $12 \cdot 10^{-6}$ до $15,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, то есть почти на 24%.

Результаты проведенных исследований подтвердили факт деградации структуры и свойств материала изложницы в ходе ее эксплуатации. Как следствие, это негативно сказывается на всех технико-экономических показателях ее работы, в том числе и на ее эксплуатационной стойкости.

В этой связи в качестве перспективного направления повышения эксплуатационной стойкости изложниц выбрали жидкофазную обработку чугуна и/или стали (экономное легирование, микролегирование, модифицирование и рафинирование), которая в сочетании с рациональным выбором материала изложницы, по мнению авторов, может дать положительный эффект за счет достижения следующих индикаторов:

- высокая теплопроводность ее материала;
- высокая прочность материала (временное сопротивление на разрыв);



×300



×500



×1000

Рис. 4. Микроструктура чугуна изложницы после вывода ее из эксплуатации

- устойчивость материала изложницы по всей толщине стенки к росту (для чугуна) и другим проявлениям деградации структуры;
- малое значение КЛТР материала изложницы;
- минимальный модуль упругости Юнга материала изложницы;
- минимальный температурный градиент как по времени рабочего цикла, так и по толщине стенки изложницы;
- высокие жаростойкость, термостойкость, жаропрочность, разгароустойчивость материала изложницы (особенно в зонах, прилегающих к ее внутренней поверхности), его повышенные температуропроводность, предел текучести, пластичность, циклическая вязкость;
- малые склонность к ползучести и межкристаллитной коррозии материала изложницы;
- высокие технологические литейные (жидкотекучесть, малая склонность к усадке) и механические свойства (хорошая обрабатываемость резанием) материала изложницы.

Заключение

По итогам проведенного авторами информационно-аналитического обзора открытых источников, а также выполнения ими исследовательской работы в условиях действующего производства на примере изложницы типа К13С (кузнечная, сифонная, в сборке с керамическим турбостопом, глухонная) из чугуна марки СЧ15, эксплуатируемой в комплекте с прибыльной надставкой на вакуумно-индукционной печи ВИП-4,6 в цехе специальной электрометаллургии ПАО «РУСПОЛИМЕТ» для получения слитков массой 1,3 т из сплава на никелевой основе ХН50ВМТЮБ (ЭП648), описаны негативные последствия деградации структуры и свойств изделий из железоуглеродистых сплавов при малоцикловом термостатическом нагружении.

Поисковые исследования в области совершенствования материала изложниц целесообразно продолжить. В качестве перспективного направления таких исследований авторами статьи предлагается обратить внимание на жидкофазные методы обработки материала изложницы, которыми в настоящее время совместно с заинтересованными предприятиями активно занимаются специалисты кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Список источников

1. Заверюха Н.В., Волков Л.А., Четкин А.В. Разливщик стали. М.: Металлургия, 1974. 208 с.
2. Кукса А.В. Чугунные сталеразливочные изложницы. М.: Металлургия, 1989. 152 с.
3. Иванов М.А. Чугунные изложницы повышенной стойкости для литья цинковых блоков: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04 / Иванов Михаил Александрович. Челябинск, 2007. 20 с.
4. Баранов А.А. Фазовые превращения и термоциклирование металлов. Киев: Наукова думка, 1974. 231 с.
5. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
6. Добротворский А.М., Гюлиханов Е.Л., Масликова Е.И. Деградация структуры и свойств труб из теплостойких сталей после длительной эксплуатации на нефтеперерабатывающих предприятиях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. №1(238). С. 136-144.
7. Десятникова М.А. Оценка усталостной долговечности элементов конструкций при термомеханическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Нижний Новгород, 2018. 152 с.
8. Фомихина И.В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. Минск, 2018. 46 с.
9. Федюкин В.К. Закономерности и особенности фазовых превращений при термоциклической обработке и ее влияние на надежность изделий из сталей перлитного класса. Л., 1974. 30 с.
10. Баранов А.А. Рост чугуна и стали при термоциклировании. Киев, 1967. 140с.
11. Давиденков Н.Н. Лихачев В.А. Необратимое формоизменение металлов при циклическом тепловом воздействии. М.; Л., 1962. 223 с.
12. Федюкин В.К. Метод термоциклической обработки металлов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 192 с.
13. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П. [и др.] // Ползуновский вестник. 2005. №2 (ч. 2). С. 36-43.
14. Бердиев Д.М., Файзуллаев С.С. Повышение износостойкости зубчатых колес методом термоциклической обработки [Электронный ресурс] // Universum: технические науки. 2023. №1(106).. Режим доступа: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14918> (дата обращения 18.10.2024)
15. Ромашкин В.Н. Исследование процесса изготовления стержней и форм отливок изложниц с применением жидких самотвердеющих смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. М., 1968. 23 с.
16. Пантелеева А.В., Ковалевич Е.В. Компьютерное моделирование напряженного состояния изложниц для слитков высоколегированной стали // Литейное производство. 2013. №7. С. 21-24.
17. Nechtelberger E., Pühr H., Von Nesselrode J.B., Nakayasu A.S. Cast iron with Vennicuiar. Чугун с вермикулярным графитом // Compacted graphite – State of the Art. Development, Production, Properties, Applications. 49th Int. Foundry Congress, Chicago, 14-17 April, 1982. P. 17.

18. Чугун с вермикулярным графитом для деталей двигателей, работающих в условиях теплосмен / Крутилин А.Н., Розум В.А., Лось В.С., Панард Ю.Г., Кузьмич А.Н., Карась А.Н. // Литье и металлургия. 2005. №4(36). С. 47-50.
19. Microstructure – mechanical property relationship in compacted (vermicular) graphite cast iron / Loper C.R., Lalich M.T., Park H.K., Gyarmaty F.M. // 46th International Foundry Congress, 1979. №35. С. 237-241.
20. Энциклопедия по машиностроению XXL: Оборудование, материаловедение, механика и ...: информационный портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mash-xxl.info/?ysclid=m1vxtm0z3w343152391> (дата обращения: 13.09.2024).
21. Коффин Л.Ф. О термической усталости сталей // Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях / под ред. Л.Б. Гецова и М.Г. Таубиной. М.: Госэнергоиздат, 1960. С.188-258.
22. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
23. Викулов А.С., Потемкин А.Н., Никитин Д.Е. Усталостное разрушение материалов с позиции различных теорий [Электронный ресурс] // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. Т. 13. С. 3311–3315. Режим доступа: <http://e-koncept.ru/2015/85663.htm>. (дата обращения 13.10.2024).
24. Лукьянец В.А. Физические эффекты в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 224 с.
25. Залыцман Э.С. Изложницы для легированных сталей. Электросталь: ЭПИ МИСиС, 2004. 208 с.

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: igoleu@yandex.ru.

Коровин Валерий Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: v.korovin2015@yandex.ru.

Гарченко Александр Александрович – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: garchenko.a.a@yandex.ru.

Рябова Любовь Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: kafmto@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON DEGRADATION OF STRUCTURE, PROPERTIES AND DESTRUCTION OF MOLD MATERIAL DURING OPERATION

Leushin Igor O. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Korovin Valery A. – Dr. Sci. (Tech), Associate Prof., Professor of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Garchenko Alexander A. – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Ryabova Liubov I. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Abstracts. The authors focus on the problem of increasing the operational durability of molds, widely used in the practice of metallurgical enterprises and industries, the solution of which is still relevant today. In this regard, they set a goal - to identify patterns linking the modes of operation of the mold with the processes affecting the structure and properties of its material, affecting the quality of the ingot and the technical and economic indicators of its production, in particular, operational durability, and based on the results to outline promising ways to improve it. To achieve the goal, an information and analytical review of publications on the topic in open sources was carried out and, under the conditions of existing production, research work was carried out to monitor the behavior of the mold material during

operation. Using modern laboratory equipment, thermometry of the working cycle of a cast iron mold was carried out, manifestations of microstructure degradation and deterioration of some properties, such as tensile strength, ductility, coefficient of linear thermal expansion were recorded. The obtained results allow us to outline promising directions for solving the specified problem, in particular, those related to liquid-phase processing of cast iron and steel as materials most widely used as mold material.

Keywords: mold, operation, material, structure, properties, degradation

Ссылка на статью:

О деградации структуры, свойств и разрушении материала изложницы в процессе эксплуатации / Леушин И.О., Коровин В.А., Гарченко А.А., Рябова Л.И. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 40-48.
Leushin I.O., Korovin V.A., Garchenko A.A., Ryabova L.I. On degradation of structure, properties and destruction of mold material during operation. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 40-48.