

2. Renewables 2015 global status report: [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
3. Колтун М .М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. – С 280.
4. W.A. Badawy, S.A. Elmeniaawy, A.N. Hafez Improvement of the power of industrially fabricated solar cells by etching of the Si surface and the use of surface analytical techniques Egypt J Anal Chem, 22 (2013) . – P 97–113.
5. Zhao J, Wang A, Green MA. 24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates. Progress in Photovoltaics 1999. – P 471–474.
6. Zhao J, Wang A, Green MA. Double layer antireflection coating for high efficiency passivated emitter silicon solar cells. IEEE Transactions on Electron Devices 1994; ED-41. – P 1592–1594.
7. Листратенко А.М. Исследование и разработка малозатратной технологии изготовления высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей космического применения // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2001. Вып. 121. – С. 121-125.
8. Jordan D, Nagle JP. Buried contact concentrator solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 1994 ;2:171-176.
9. Suchikova Y.A. Morphology of porous n-InP (100) obtained by electrochemical etching in HCl solution/ Y.A. Suchikova, V.V. Kidalov, G.A. Sukach // Functional Materials. – 2010. – Vol.17, №1.– P. 1 – 4.
10. Сычикова Я.А. Пористый фосфид индия – перспективный материал радиоэлектроники / Я.А. Сычикова, С.А. Вамболь // Современные методы и материалы радиофизики : материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 120-летию дня изобретения радио (Якутск, 19–20 мая 2015 г.) / редкол А. М. Тимофеев. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – С. 46-47.
11. Сичікова Я.О. Електрохімічна технологія отримання наноструктур на поверхні напівпровідників // Я.О. Сичікова, С.О. Вамболь // Наукова Україна. Збірник матеріалів Всеукраїнської студентської наукової конференції з міжнародною участю (25 травня 2015 р.). – Дніпропетровськ: «SeKum Software», 2015. – С. 233-235.

УДК 621.74.002.6:669.131.7

ОТЛИВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ КОМПЛЕКСНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

Л.Х. Иванова¹, Ю.О. Юрченко²

¹доктор технических наук, профессор кафедры литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: ivanovalitvo@gmail.com

²студент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

Аннотация. В работе приведены результаты исследований по усовершенствованию технологической схемы обработки расплавов комплексными модификаторами на основе редкоземельных металлов для получения прокатных валков из чугуна с шаровидным графитом.

Ключевые слова: чугуны, шаровидный графит, модифицирование, свойства.

CASTING ROLL ROLLING FROM COMPLEX INOCULATED IRON

Ludmila Ivanova¹, Uliy Urchenko²

¹Ph.D., Professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: ivanovalitvo@gmail.com

²Student, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

Abstract. The paper presents the results of research on the improvement of the technological scheme of processing melts complex modifiers based on rare earth metals to produce rolls of cast iron with nodular graphite.

Keywords: cast iron, spheroidal graphite, modifying, property

Введение. Улучшение качества продукции литейного производства, повышение ее надежности и долговечности является насущным требованием нашего времени. Подавляющая часть отливок изготавливается из чугуна, поэтому совершенствование его физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик служит важным резервом в деле экономии энергетических и материальных ресурсов и интенсивного развития промышленности. Ежегодно в Украине производится около 1 млн. т отливок, и только 5...6% от их выпуска из высокопрочных чугунов, что существенно меньше, чем в мировом выпуске таких отливок (30...60%). Особенно влиятельным это является для вальцелитейного производства как основного производителя чугунных отливок.

Существующая номенклатура сплавов на основе железа для прокатных валков не в полной мере удовлетворяет потребности современной металлургии в материалах, сочетающих высокую износостойкость со способностью выдерживать ударные нагрузки и обладающих хорошими технологическими свойствами. Модифицирование чугунов редкоземельными металлами (РЗМ) является эффективным способом повышения механических и эксплуатационных характеристик чугуна прокатных валков.

Основными причинами, которые сдерживают широкое применение высокопрочного чугуна с шаровидным или вермикулярным графитом в практике отечественного литейного производства, является нестабильность модифицирующего эффекта, ухудшение санитарно-гигиенических условий в литейном цехе при обработке расплавов металлическим магнием, а также как показал анализ эксплуатационной стойкости валков, стойкость чугунных валков остается низкой, в основном, из-за отсутствия современных

эффективных технологий. Устранение этих недостатков путем создания новых технологических процессов обработки расплавов обеспечит значительные изменения в структуре и улучшение свойств отливок.

Разработка технологии модифицирования РЗМ чугунов для таких крупных отливок как прокатные валки и в настоящее время является актуальной.

Целью исследований была разработка технологий комплексной обработки валковых расплавов.

Материал и результаты исследования. Прокатные валки исполнения ЛШ-57 ТУ У 27.1-00190319-1291-2002 отливают в Украине способом «полупромывки». Для заливки литейной формы применяют чугуны двух составов: основной (модифицированный комплексным модификатором на основе магния) - с содержанием кремния 0,8...1,2% и высококремнистый (металл «полупромывки») - с содержанием кремния 5...7%. Валковую литейную форму через тангенциальную литниковую систему заполняют основным металлом до уровня, превышающего верхний торец бочки валка на 250...350 мм. После этого следует временная выдержка для затвердевания отбеленного слоя, а затем осуществляется доливка валковой литейной формы высококремнистым чугуном [1]. Недостатком этого способа является загрязненность белого чугуна рабочего слоя валков магниевыми неметаллическими включениями.

При установлении необходимых количественных и временных параметров способа изготовления прокатных валков исходили из следующего. Вначале лабораторными исследованиями были установлены остаточные содержания РЗМ, обеспечивающие необходимые механические и служебные свойства белого валкового чугуна, а также необходимые содержания модификаторов в чугуне сердцевины и шеек валков, обеспечивающие получение графита шаровидной формы [2,3].

Повышение механических и служебных свойств материала рабочего слоя валков обеспечивалось при замене в структуре сотовой ледебуритной эвтектики на пластиночную. Было установлено, что полное подавление выделения сотового ледебурита в белом чугуне происходило при содержаниях 0,20...0,30% РЗМ_{ост.} Таким образом, учитывая, что усвоение РЗМ составляет в среднем 45...60% количество КМ для обработки основного металла должно было быть 0,75...1,5% от массы расплава. Увеличение присадки КМ свыше 1,5% приводило к получению в чугуне остаточного содержания РЗМ свыше 0,3% и образованию большого количества неметаллических включений, снижающих физико-механические и специальные свойства белого чугуна [4].

Установлено также, что максимальную прочность чугуна в шейках и сердцевине валка можно получить при комплексном модифицировании его РЗМ и магнием при содержании кремния в количестве 1,8...2,0%. Остаточные содержания РЗМ и магния в шейках и сердцевине валка 0,09...0,12% и 0,015...0,020%, соответственно, обеспечивали получение перлитно-графитного чугуна с шаровидной формой графита. Так, для получения в шейках и сердцевине валка содержания кремния 1,8...2,0% необходимо металлу «полупромывки» (25...30% расплава) иметь кремния в количестве 6,0...7,0%, а смешение основного металла (не содержащего магния) со вторым металлом (не содержащим РЗМ) позволило получить в шейках и сердцевине необходимые их соотношения. При определении основных температурных параметров литья исходили из следующего. Так как потери тепла при вводе РЗМ с кремнием незначительны, то оптимальной температурой модифицирования чугуна КМ для условий вальцелитейного производства (при исследовании температуры модифицирования в пределах от 1360 до 1540°C) была принята температура 1400...1450°C, при условии, что промежуток времени между модифицированием и заливкой литейной формы минимальный. Исследование же влияния размеров фракции КМ в пределах от 30 до 120 мм при вводе его на дно заливочного ковша перед выпуском в него расплава из плавильного агрегата на коэффициент усвоения РЗМ при постоянной величине присадки показало, что оптимальной была фракция модификатора – 60...80 мм.

Была разработана технология литья валков исполнения ЛШ-57 с использованием для модифицирования основного металла комплексного модификатора (КМ) на базе РЗМ, а для металла «полупромывки» - КМ на базе магния и ферросилиция [5]. Способ включал отдельную обработку расплава чугуна для рабочего слоя валка и для сердцевины и шеек. В качестве модификатора для рабочего слоя валка исполнения ЛШ-57 использовали лигатуру СРЗМ30 в количестве 0,75...1,5% от массы металла рабочего слоя валка, а для сердцевины валка – лигатуру КМг9 и ферросилиций марки ФС75 в количестве 0,8...1,2 и 6...7% от массы металла соответственно [6].

Технологический процесс получения валковых расплавов осуществляли следующим образом. Металл для формирования рабочего слоя по новой технологии в количестве 70...80% от общей массы выпускали при температуре 1683...1703К в ковш емкостью 30 т, на дно которого предварительно загружали КМ марки СРЗМ30 фракции 60...80 мм в количестве 0,75...1,5% от массы расплава. Металл для «полупромывки» выпускали при такой же температуре в 10-тонный ковш, в котором находились КМ марки КМг9 и расчетное количество графитизирующего модификатора - ферроси-

лиция марки ФС75-2 ГОСТ ДСТУ4127:2002. После удаления шлака производили заливку валковых литейных форм осуществляли методом «полупромывки».

В производственных условиях отлили опытные партии прокатных валков исполнения ЛШ-57. В качестве шихтовых материалов применяли перелдельный и литейный чугуны, стальной лом. Масса выплавляемого металла была 32 т. При достижении расплавом температуры 1410 ± 5 °С 24 т (0,75% от общей массы расплава в печи) выпускали в 30-тонный разливочный ковш, с загруженным в него необходимым количеством лигатуры СРЗМ30 - 240 кг, то есть 1%, а оставшиеся 8 т металла - в 10-тонный ковш с загруженными в него расчетными количествами ферросилиция (520 кг) и лигатуры КМг9 (80 кг). Заливку валковых форм производили сначала из 30-тонного ковша, а затем после выдержки заливали второй металл из малого ковша. Температура металла при заливке выдерживалась в пределах 1340...1350°С. Время от выпуска металла из печи до заливки литейных форм не превышало 20...25 мин.

Исследование микроструктуры материала прокатных валков серийного производства и опытных проводили на образцах от бочек и шеек, отрезанных при их механической обработке. Микроструктура рабочего слоя валков представляла собой конгломерат карбида и продуктов распада аустенита. При близком химическом составе в микроструктуре рабочего слоя валка-представителя опытной партии графит отсутствовал, в то время как в валке текущего производства количество его составляло от 0,4 на глубине 10 мм до 2,5% - на глубине 20 мм. Строение перлита в рабочем слое валка опытной партии характеризовалось баллами ПД1,0 и ПД0,5, а в валке текущего производства - ПД1,0Р и ПД1,4Р. С удалением от поверхности дисперсность перлита увеличивалась, причем в валке-представителе опытной партии дисперсность перлита оставалась на балл выше. Анормальность в строении перлита на глубинах 10 и 20 мм, соответственно, была в валке текущего производства Па4 и Па3, а в опытных валках - Па3 и Па2. С удалением от поверхности анормальность снижалась до Па1. Количество структурных составляющих в рабочем слое опытного валка и текущего производства было примерно одинаковым. Различие состояло в том, что в опытном валке микроструктура была более равномерной, а количество феррита было меньшим. Модифицирование расплавов КМ позволило снизить количество и размеры видимых неметаллических включений в рабочем слое опытных валков.

Материалы шеек валков опытного и серийного производства имели перлитно-графитную структуру с небольшими количествами феррита и це-

ментита. В опытном валке перлит на всех исследованных расстояниях от поверхности шейки имел тонкое строение и характеризовался баллом ПД0,5, в то время как в валке текущего производства баллами ПД0,5 и ПД1,0. Фактор формы графитных включений улучшался в опытном валке с удалением вглубь от литой поверхности и достигал примерно таких же значений, как и в валках текущего производства. Полученные остаточные содержания РЗМ и магния привели к кристаллизации в нижней шейке опытного валка графита шаровидной формы с фактором формы 0,81...0,84. Для материала шеек валков из чугуна, модифицированного магнием, характерным было значительно большее (на 8...60%) количество феррита и несколько меньшее, чем в опытном валке, количество цементита. Кроме того, в комплексномодифицированном чугуне шаровидные включения графита имели меньший диаметр и распределены они были более равномерно.

Механические свойства рабочего слоя валка-представителя опытной партии были значительно более высокими, чем у валка близкого химического состава, отлитого из магниевого чугуна. Так, на глубине 10 мм пределы прочности $\sigma_{в}^{изг}$ и $\sigma_{в}^p$ опытного валка были на 15...25% выше, чем у валка текущего производства. С удалением от поверхности пределы прочности $\sigma_{в}^{изг}$ и $\sigma_{в}^p$ чугуна опытного валка оставались выше, чем у валка текущего производства. И только на расстояниях от поверхности бочки вглубь, преимущественно в верхних частях бочек, прочность чугуна опытных валков была на 10...15% ниже, чем чугуна валков текущего производства. Это было обусловлено лучшей формой графитных включений и меньшим количеством цементита в магниевом чугуне.

Аналогичная зависимость наблюдалась и для показателя ударной вязкости. В отбеленном рабочем слое, переходной зоне и серой части бочки до глубин 160 мм ударная вязкость опытных валков была выше, чем в валках текущего производства. Кроме того, как указывалось выше, рабочий слой опытных валков содержал значительно меньшее количество неметаллических и графитных включений, что обеспечивало повышение твердости при практически одинаковом с магниевыми валками химическом составе чугуна валков.

В результате проведенных исследований установлено, что предложенный способ изготовления прокатных валков исполнения ЛШ-57 обеспечивал снижение модуля упругости материала рабочего слоя валков на 13,2...18,1% и повышение теплопроводности на 10,5...26,3%. При испытании термо- и износостойкости было показано, что модифицирование КМ обеспечивало повышение этих показателей в белых валковых чугунах: термостойкость повышалась на 11...33%, а износостойкость на 17...25% (при сред-

нем значении). С увеличением пути изнашивания износ модифицированного КМ рабочего слоя уменьшался на 12...17% по сравнению с износом чугуна рабочего слоя валка текущего производства. Повышение износостойкости достигалось, по-видимому, за счет получения в рабочем слое валков белого чугуна, более чистого от неметаллических и графитных включений), а также за счет измельчения карбидной фазы и продуктов распада аустенита. Оптимальная микроструктура, которая была получена на лабораторной стадии работы и состоящая из ледебурита пластинчатого типа и перлитно-ферритной матрицы, в опытных валках была получена на расстояниях 15...20 мм от поверхности бочки.

Кроме того, в настоящей работе были разработаны специальные способы изготовления литых прокатных валков [7-9]. Эти способы включали первичное и вторичное модифицирования, первичное осуществлялось в заливочном ковше КМ на основе РЗМ, либо механической смесью из КМ на основе РЗМ и карбида лантана, а вторичное – при заливке валковой формы либо ферросилицием, либо механической смесью из ферросилиция и феррогафния. Таким образом, были экспериментально обоснованы технологии литья прокатных валков из чугуна с вермикулярным графитом с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Применение комплексных модификаторов значительно упрощает технологию получения модифицированного валкового расплава и сокращает продолжительность плавки за счет более низкой температуры выпуска расплава из плавильного агрегата, а также по сравнению с серийным магниевым процессом модифицирование КМ позволяет устранить пироэффекты и дымогазовыделения, что значительно повышает культуру производства [10].

Внедрение в производство новых и усовершенствованных технологических процессов производства прокатных валков из чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом обеспечит экономический эффект.

Выводы. 1. Усовершенствован способ обработки расплавов комплексными модификаторами на основе редкоземельных металлов для получения прокатных валков из высокопрочных чугунов, в частности исполнения ЛШ-57. Оптимальный расход лигатуры СРЗМ30 для модифицирования металла рабочего слоя должен быть 1,0...1,25%, а лигатуры КМг9 для металла полупромывки – 0,8...1,2%.

2. На основании анализа массива экспериментальных данных разработаны новые способы литья отбеленных и с невыраженным отбелом прокатных валков из чугунов с шаровидным или вермикулярным графитом, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеев А.Е. Литые валки (теоретические и технологические основы производства).– М.: Металлургиздат, 1957.– 360 с.
2. Иванова Л.Х. Комплексномодифицированные валковые чугуны / Л.Х. Иванова, Я.С. Маймур, И.А. Осипенко, А.П. Белый, Д.В. Муха// Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. 2014.– № 1(32), С.75-79.
3. Иванова Л.Х. Редкоземельные металлы в валковых чугунах/ Л.Х. Иванова, Е.В. Колотило// Процессы и технологии литья: коллективная монография/ Под ред. В.Е.Хричикова.– Дніпропетровськ: «Літограф», 2015.– С.66-78.
6. Проблемы получения чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом в условиях вальцелитейного производства/ Е.В.Колотило, Л.Ф.Боков, Л.Х.Иванова, Н.Г.Мороз// Прогрессивные технологические процессы и охрана труда в литейно-металлургическом производстве. – Нижний Новгород, 1991. – С.19-20.
5. А.с. 1311846 СССР, МКИ³ В22D 19/16. Способ обработки чугуна при изготовлении прокатных валков/ Е.В. Колотило, Л.Х. Иванова, И.И. АнуфриевЮ, Н.Н. Овчинников и др. (СССР).– № 3821258/22-02; заявл. 10.12.84; опубл. 23.05.87. Бюл. №19.– 3 с.
6. Колотило Е.В., Иванова Л.Х., Бунина Ю.К. Технология производства прокатных валков из комплексномодифицированных чугунов с шаровидной формой графитных включений // Теория и практика металлургии. –2000.–№ 6.–С.45–49.
7. Пат. 93800 Україна, МПК⁷ В22D 25/00.Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом/Хричиков В.Є., Иванова Л.Х., Колотило Є.В., Шляпін І.В., Хазанов А.В., Івонін І.В (Україна); заявник та патентовласник Націон. метал. акад.. України. – з. 200913016; Заявл. 14.12.09; Опубл. 10.03.11, Бюл. № 6. – 5 с.
8. Пат. 104762 Україна, МПК⁷ В22D 25/00.Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом/ Иванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Маймур Я.С., Муха Д.В., Калашнікова А.Ю, Бура Ю.М (Україна); заявник та патентовласник Націон. метал. акад.. України. – з. 201211584; Заявл. 08.10.12; Опубл. 25.02.14, Бюл. № 4. – 5 с.
9. Пат. 111223 Україна, МПК⁷ В22D 25/00.Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом/ Иванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Хитько О.Ю., Шапран Л.О., Муха Д.В., Гілуч М.А. (Україна); заявник та патентовласник Націон. метал. акад.. України. – з. 201402950; Заявл. 27.03.14; Опубл. 11.04.16, Бюл. № 7. – 5 с.
10. Иванова Л.Х. Экологический анализ технологии литья прокатных валков исполнения ЛШ-57/ Л.Х. Иванова, Я.С. Маймур // Теория и практика металлургии.– 2012.– № 3 (86).–.89-92.

УДК 621.785.532

**ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ****С.А. Пахомова¹, Р.С. Фахуртдинов², М.Ю. Рыжова³**^{1, 2} кандидат технических наук, доцент, e-mail: vladisl-2013@yandex.ru³ старший преподаватель e-mail: mgtu2013@yandex.ru^{1, 2, 3} кафедра «Материаловедение», Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия