



*The problems and perspectives of increasing of the grinding balls service life, which are widely used in cement industry, are shown.*

А. Н. КРУТИЛИН, Н. И. БЕСТУЖЕВ, А. Н. БЕСТУЖЕВ, Д. Н. КАЛЕНКОВИЧ, БНТУ

УДК 621.74:669.13

## МЕЛЮЩИЕ ТЕЛА. ПРОБЛЕМЫ. ПЕРСПЕКТИВЫ

Перспективы экономического развития Республики Беларусь в ближайшие десятилетия неразрывно связаны с развитием строительной индустрии и в первую очередь строительных материалов. В цементной промышленности, прежде чем попасть в сферу использования, материалы измельчают в дробилках, трубных многокамерных шаровых мельницах и т. д. Для измельчения используют мелющие шары и цельпесы – цилиндры диаметром 16–30 мм, длиной 30–40 мм, торцы которых имеют эллипсоидную форму. Кроме того, шары и цельпесы являются основными размольными телами на горно-обогатительных комбинатах, тепловых электростанциях и других промышленных предприятиях. На производительность оборудования большое влияние оказывает качество мелющих тел. В зависимости от скорости вращения мельницы и коэффициента заполнения помольной камеры мелющими телами возможны различные режимы работы оборудования: каскадный – режим без подбрасывания мелющих тел (только с перекачиванием); смешанный (перекачивание и подбрасывание); водопадный – режим с преимущественным подбрасыванием, со скоростью вращения меньше критической; режим со сверхкритической скоростью; режим махового колеса.

На этих режимах работы измельчение материала и износ мелющих тел происходит в результате истирания при скольжении мелющих тел в абразивной среде и вследствие соударения тел между собой и бронепутеровкой в присутствии абразивного измельчаемого материала. Соотношение между дробящим и истирающим действием шаров в мельнице в значительной степени определяется отношением диаметра барабана к его длине и зависит от скорости вращения мельницы, количества и формы размольных тел, характеристик измельчаемого материала, продолжительности размолла.

Процесс измельчения состоит из трех стадий. На первой стадии измельчение материалов происходит в результате ударного воздействия на материал мелющих шаров диаметром 90–140 мм. Шары под действием центробежных сил и сил трения поднимаются на некоторую высоту, а затем под действием сил тяжести падают или скатываются. Для тонкого помола материалов используют цельпесы и шары диаметром менее 40 мм. Цилиндрическая форма цельпесов по сравнению с шарами позволяет увеличить площадь взаимодействия мелющих тел с исходным материалом. Однако необходимо отметить, что затраты энергии на помол при цельпесной загрузке выше на 20% [1].

На второй стадии (диаметр шаров 50–80 мм) измельчение материалов происходит по смешанному типу под действием ударно-абразивного и абразивного изнашивания истиранием. В случае измельчения хрупких материалов размол производят в жидкой среде, которая препятствует распылению материала. Жидкость способствует ускорению процесса измельчения, так как, проникая в микротрещины, ведет к возникновению больших капиллярных давлений.

Мелющие тела должны обеспечивать безостановочную работу оборудования в течение всего технологического процесса. Большой износ и раскалывание мелющих тел способствуют засорению размалываемого материала обломками мелющих тел, что ухудшает качество помола, снижает эффективность работы оборудования, увеличивает содержание в конечном продукте железа. Выбор оптимального состава сплавов и технологии изготовления из них мелющих тел необходимо проводить на основании учета характера изнашивания контактирующих поверхностей в конкретных условиях эксплуатации.

Современные представления о механизме внешнего трения твердых тел базируются на термоди-

наиме необратимых процессов, эволюции дислокационной структуры и кинетике массопереноса, которые определяют степень упрочнения, разупрочнения и поверхностного разрушения.

В механизме абразивного и ударно-абразивного изнашивания много общего. Износостойкость материалов определяется не только структурой в исходном состоянии, но и ее трансформацией в процессе изнашивания. Поверхностные слои металла претерпевают изменения, следствием которых является образование вторичных структур обладающих аномалией физических, химических и механических свойств.

Закономерности изнашивания железоуглеродистых сплавов определяются их гетерогенным строением, сочетанием разнородных фаз и структурных составляющих, резко отличающихся по способности к пластической деформации и характеру разрушения [2]. Свойства сплавов с такой структурой зависят не только от количественного соотношения и свойств составляющих, но и их взаимного расположения, формы и размеров включений и т. д. Для успешной эксплуатации деталей, работающих в условиях трения и износа, необходимо обеспечить первичную структуру, мало или почти не изменяющуюся в процессе работы, либо дополнительное упрочнение поверхностных слоев за счет пластической деформации микрообъемов металла и изменений в направлении формирования прочных и пластичных вторичных структур, обеспечивающих сопротивление изнашиванию.

При абразивном изнашивании металлов процесс контактирования материала детали и абразива происходит в результате внедрения и перемещения абразивной частицы в материале, которое сопровождается пластическим течением изнашиваемого материала впереди или по сторонам внедряющихся абразивных частиц и его последующим срезом.

Степень сопротивления воздействию абразивных частиц зависит от многих факторов, таких, как тип карбида, его размеров и количества, способности деформироваться или хрупко разрушаться под воздействием нагрузки. Карбиды препятствуют пластической деформации матрицы и способствуют образованию трещин и расслоений в случае отделения от матрицы. Крупные карбиды при контакте с абразивными частицами могут откалываться и выкрашиваться, способствуя образованию микротрещин, что резко увеличивает износ. Высокая абразивная износостойкость железоуглеродистых сплавов обеспечивается в случае, если имеется большое количество первичных карбидов, равномерно распределенных в металлической ма-

трице. Размеры участков основы между карбидами должны быть минимальными, чтобы обеспечить снижение избирательного износа матрицы абразивом. Укрупнение размера карбидов приводит к растрескиванию, причем округлые в поперечном сечении карбиды менее склонны к растрескиванию, чем прямоугольные. Критический размер карбидов связывают с локализацией напряжений в объеме карбида при взаимодействии с абразивом, что приводит к образованию трещин в карбиде с последующим выкрашиванием и быстрым износом поверхности детали. Мелкие карбиды в состоянии перераспределять напряжения, передавая часть их в окружающую металлическую основу, тем самым, предотвращая хрупкое разрушение при ударе абразивными частицами.

Наличие в структуре железоуглеродистых сплавов значительного количества твердых карбидов является необходимым, но не достаточным условием их высокой износостойкости. Существенное значение имеет тип матрицы, которая должна быть достаточно прочной, чтобы хорошо противостоять истиранию, и достаточно вязкой, чтобы прочно удерживать карбиды в условиях нагружения, обеспечивать минимальные деформации, чтобы не допустить растрескивание и выкрашивание карбидов. Оптимальная структура матрицы зависит от удельного давления. При низких удельных давлениях для получения максимальной износостойкости следует стремиться к получению сплавов с мартенситной матрицей, твердость которой приближается к твердости карбидов. Влияние микроструктурных особенностей сплавов на износостойкость существенно при низких нагрузках и меньших размерах абразивных частиц.

В интервале твердости абразива от 200 до 300 HV или 2,0-3,0 ГПа износостойкость в зависимости от структуры изменяется в следующем направлении: аустенит > перлит > бейнит > мартенсит, что может быть связано с сопротивлением матрицы к пластической деформации. При твердости > 400 HV или > 4,06 ГПа бейнитная и мартенситная микроструктуры имеют большую износостойкость, причем износостойкость сплава увеличивается с повышением твердости и нестабильности остаточного аустенита. С уменьшением содержания карбидов износ сплавов с нестабильным аустенитом в матрице меньше. Сплавы с мартенситной матрицей лучше удерживают хрупкие карбиды, они имеют преимущество при большом содержании карбидов. При малом содержании карбидов промежутки между ними большие, что ведет к более интенсивному царапанию матрицы абразивными частицами и превращению нестабильного ау-

стенита в мартенсит. В случае твердого абразива карбиды и матрица режутся абразивными частицами, однако вследствие пластической деформации имеющийся аустенит упрочняется, износостойкость возрастает. Влияние на износостойкость содержания карбидов понижается с увеличением твердости абразива. При этом происходит переход от более мягких форм изнашивания (выдавливания и резания) к более жестким (растрескивание, отслаивание, выкрашивание, откалывание и т. п.). Когда твердость абразива соизмерима с твердостью сплава, размер карбидов не оказывает заметного влияния на износ, в этом случае среднее значение свободного промежутка между карбидами является более важным фактором, чем размер карбидов, пока карбиды не перерезаются частицами абразива и не выкрашиваются.

Для большинства случаев абразивного износа максимальной износостойкостью обладают сплавы со структурой мартенсита и небольшим количеством (до 5%) остаточного аустенита. С увеличением содержания аустенита отношение доли резания к выдавливанию уменьшается и соответственно повышается износостойкость. Высокая износостойкость аустенита обеспечивается протеканием фазового превращения в поверхностном слое металла с одновременным образованием микрообъемов с высокой плотностью дислокаций.

В общем случае на уровень и интенсивность абразивного износа оказывают влияние соотношение твердостей изнашиваемого материала и абразива, способность материала к упрочнению, его модуль упругости и вязкость разрушения, состав и строение основы материала, концентрация, размер, форма абразивных частиц, скорость их перемещения.

Основу процесса ударно-абразивного изнашивания составляет внедрение в металл частиц абразива, которое сопровождается сдвиговой деформацией в микрообъемах с последующим разрушением в результате развития деформационных процессов или хрупким выкрашиванием частиц износа. Так, например, для чугунов и сталей при высокой твердости и низких пластических свойствах ударно-абразивный износ происходит в результате хрупкого выкрашивания отдельных микрообъемов поверхности соударения. При наличии большого количества остаточного аустенита износ происходит в результате многократной пластической деформации, ведущей к упрочнению поверхностного слоя, перенаклепу и усталостному разрушению. Глубина упрочненного слоя у сплавов аустенитного класса на порядок выше, чем перлитного или мартенситного. Импульсное ударное

воздействие в результате развития процессов мартенситного превращения, а также изменения тонкой структуры мартенсита и аустенита за счет развития релаксационных процессов вызывает снижение уровня напряжений, что позволяет затормозить процессы разрушения. Пластическая деформация аустенита ускоряет его распад, при этом в процессе трения изменяется количественное соотношение структурных составляющих и их тонкая структура, что приводит к повышению свойств металла в поверхностном слое. Критическое давление ударной волны, вызывающее образование мартенсита из аустенита, зависит от стабильности аустенита.

Высокая износостойкость в сплавах со структурой нестабильного аустенита объясняется тем, что часть энергии внешнего воздействия расходуется не на разрушение поверхности, а на обеспечение фазового превращения в изнашиваемом слое. По мере изнашивания поверхностного слоя происходят фазовые превращения, обеспечивающие в последующих слоях постоянство свойств металла. Количество мартенсита закалки и мартенсита деформации зависит от химического состава сплава и энергии удара при контактном взаимодействии. Образование большого количества мартенсита деформации не гарантирует получение максимальной износостойкости, так как возможно ее понижение в результате повышения склонности металла к хрупкому разрушению, при этом важны полнота мартенситного превращения и растянутость его во времени.

В процессе ударно-абразивного износа важную роль играет не только деформационный эффект, связанный с пластической деформацией и разрушением поверхностного слоя металла, но и тепловой эффект ударного воздействия. В момент удара часть энергии в зоне фрикционного контакта расходуется на изменение структуры материалов, образование дефектов в кристаллической решетке, микротрещин, частиц износа и т. д. В момент удара происходит сжатие соударяющихся тел, работа упругой и пластической деформации зависит от характера контактирующих материалов. Дальнейший процесс характеризуется диссипацией подводимой механической энергии, происходит упругое восстановление деформированных объемов, контактная температура резко падает. Цикл нагрев-охлаждение в очаге деформации длится десятые доли секунды, образующаяся тепловая энергия распределяется в определенном соотношении между контактирующими телами и окружающей средой. Глубина проникновения температурных возмущений в очаге деформации зависит от параметров ударно-абразивного воздействия.

Величина энергии удара является ведущим внешним фактором, определяющим интенсивность процесса. При повышении энергии удара интенсифицируются процессы, приводящие к хрупкому разрушению и выкрашиванию частиц материала. Превалирующее значение для обеспечения износостойкости приобретают вязкость и пластичность матрицы.

При ударно-абразивном изнашивании со значительными ударными нагрузками, испытываемыми одним и тем же объемом изнашиваемого металла, наилучшие результаты обеспечиваются при микроструктуре, состоящей из твердых карбидов в мартенситной или аустенитной матрице. Влияние металлической основы является более значительным, чем природа и количество карбидов [3].

Условия абразивного изнашивания часто осложняются дополнительными коррозионными воздействиями среды, также влияющими на износостойкость материала. При малых нагрузках на контакте коррозия ускоряет процесс разрушения рабочих поверхностей. Для различных материалов диапазон малых удельных нагрузок различен и колеблется в пределах 0,2–1,2 МПа. Увеличение удельных нагрузок на контакте, коррозионная стойкость материалов перестают играть существенную роль, определяющими становятся сопротивление пластической деформации и микрорезание от изнашивающего воздействия абразива. Специфика взаимодействия структурных составляющих с абразивными зёрнами позволяет использовать в качестве материала для мелющих тел железо-углеродистые сплавы.

В настоящее время в Республики Беларусь для измельчения различных материалов используют мелющие шары диаметром от 40 до 120 мм, изготовленные из углеродистых сталей поперечно-винтовой прокаткой на шаропркатных станах. Для их изготовления используют отсортированные заготовки, которые использовать для других целей не представляется возможным. Твердость шаров регламентируется по поверхности и сечению. Мелющие шары диаметром от 20 до 60 мм изготавливают из стали, содержащей не менее 0,35% С, после закалки твердость шаров должна быть не менее 400 НВ, для шаров диаметром 70–125 мм содержание углерода < 0,6%, твердость шаров после термообработки не менее 350 НВ. Основным недостатком катаных шаров – низкая объемная твердость. Высокая твердость в поверхностном слое толщиной 5–7 мм сменяется резким снижением по направлению к центру, что обусловлено недостаточной прокаливаемостью сталей. Имеет место существенный разброс твердости по поверхности

отдельных шаров вследствие «пятнистости» закалки. Повышение суммарной легированности стали позволяет поднять не только поверхностную твердость, но и твердость по сечению шаров диаметром 60–80 мм. Высокие закалочные напряжения ведут к раскалыванию шаров в процессе эксплуатации. Для снятия напряжений необходим отпуск при температурах 450–480 °С. Усадочные раковины, дефекты ликвационного характера и флокены ведут к образованию рыхлоты при поперечно-винтовой прокатке. Достаточно высокая ударостойкость мелющих шаров объясняется вязкой феррито-перлитной структурой стали. В зависимости от твердости размалываемого материала, применяемого при производстве строительных материалов, расход стальных помольных шаров колеблется от 0,4 до 1,0 кг/т, а при размоле железорудных концентратов – до 2,0 кг/т.

Повышение качества стальных шаров возможно за счет совершенствования технологии термической обработки, оборудования для ее осуществления и рационального подбора химического состава сталей. Зарубежные фирмы, производящие мелющие шары, изготавливают их из высоколегированных сталей с высокой прокаливаемостью. Общеизвестным показателем мирового уровня качества катаных шаров является твердость не ниже 600 НВ.

Одним из наиболее эффективных способов снижения расхода мелющих тел является замена стальных шаров на мелющие тела из высоколегированных чугунов. В промышленно развитых странах мира доля производства мелющих тел из высоколегированных чугунов, износостойкость которых в 4–5 раз выше стальных, достигает 35% от всего объема и продолжает быстро увеличиваться [4, 5]. Современные марки белых износостойких чугунов представляют собой сложнолегированные многокомпонентные сплавы с большим разнообразием структур и широким диапазоном физико-механических свойств. Применение высоколегированных чугунов для отливки шаров с последующей термической обработкой обеспечивает получение по всему сечению мелющего тела мартенситно-карбидной структуры с твердостью HRC<sub>3</sub> 55,0, высокой ударостойкостью, низким удельным расходом (45–50 г/т) мелющих тел в процессе эксплуатации. Износостойкость мелющих шаров из высоколегированного чугуна в 3 раза выше, чем стальных катаных. Согласно [6], расход мелющих тел из ковальной стали (НВ 400–500) при помоле клинкера в первой камере (диаметр тел 100–60 мм) составляет 150–200 г/т, во второй и третьей (диаметр тел 16–60 мм) – 100–

150 г/т. Расход мелющих тел из хромомолибденового износостойкого чугуна (С – 2,5%, Si – 1,0, Mn – 0,5, Cr – 15, Mo – 0,5, P и S не более 0,05% каждого HV 700) в тех же условиях составляет 20–25 г/т для первой и 8–10 г/т для второй камеры, т. е. значительно меньше по сравнению с расходом стальных мелющих тел. При сухом помоле клинкера расход шаров малого диаметра (до 50 мм) в 4–5 раз меньше расхода шаров из ковальной стали, при мокром измельчении, широко используемый чугун нихард, имеет меньше преимуществ перед сталью.

Мировая практика показывает, что с экономической точки зрения увеличение стоимости за счет более высокой легированности чугуна, направленное на улучшение качества, а, следовательно, и эксплуатационной стойкости шаров, более эффективно, чем увеличение объема выпуска шаров, изготовленных из низколегированного чугуна.

Одной из причин низких эксплуатационных свойств мелющих тел является их высокая склонность к образованию транскристаллитной структуры, которая ведет к образованию зональной ликвации и снижению прочностных характеристик сплавов.

Прекращение формирования зоны столбчатой структуры связывают с моментом столкновения растущих дендритов со свободными центрами кристаллизации. Образование свободных центров объясняют по-разному: вследствие образования

и роста центров, зарождающихся на механических примесях в расплаве, переохлажденном перед фронтом кристаллизации, или зарождением центров кристаллизации на обломках дендритов, образующихся вследствие воздействия движущегося расплава на затвердевающий во время заполнения на стенках формы металл. Положительное влияние на уменьшение размеров зоны транскристаллизации в отливках оказывает снижение температуры перегрева расплава перед заливкой, перемешивание расплава, уменьшение скорости затвердевания отливки. Введение комплексных модификаторов может существенно ускорить процесс формирования равноосной кристаллизации, измельчить дендриты первичного аустенита, блоки эвтектики, их морфологию.

В настоящее время чугунные мелющие шары отливают на автоматических кокильных линиях, в стационарные многоместные кокилы, линиях безопасной формовки, в песчано-глинистые формы при использовании стопочной формовки и т. д. Независимо от способа изготовления мелющих шаров одним из наиболее распространенных дефектов литья является повышенная вероятность поражения отливок дефектами усадочного происхождения. Для изготовления литых мелющих шаров применяют чугуны с низким углеродным эквивалентом, поэтому в центральной части отливки на практике достаточно часто образуется сосредоточенная усадочная раковина, особенно у шаров

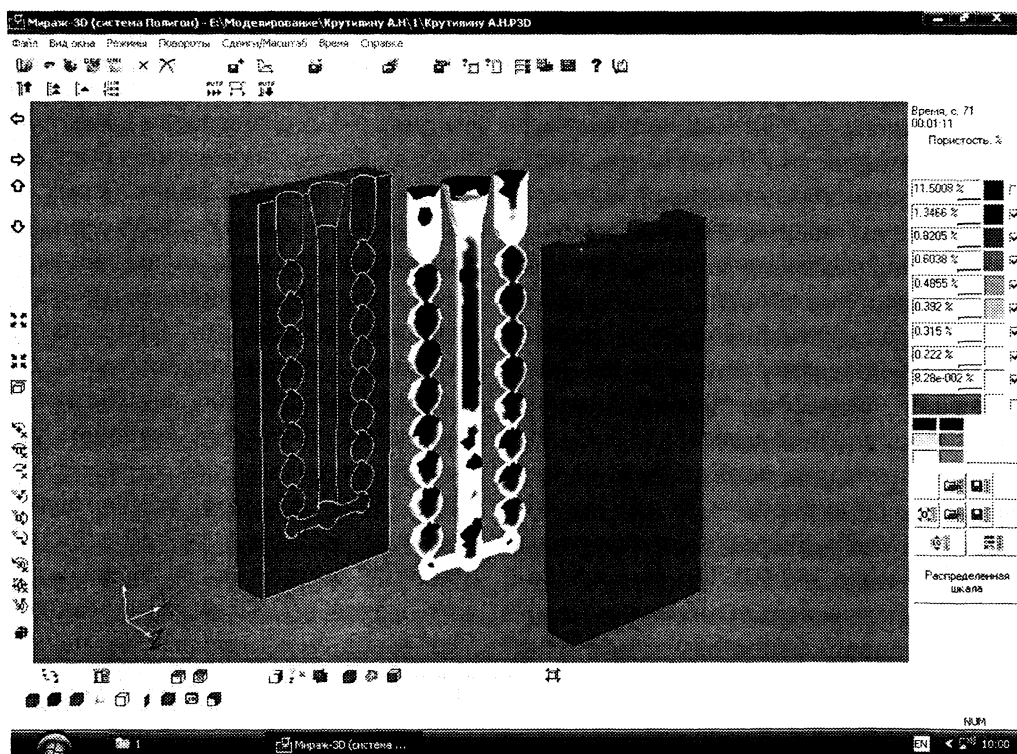


Рис. 1. Образование пористости при литье шаров в кокиль

большого диаметра. Результаты математического моделирования процесса литья в кокиль чугунов мелющих шаров в системе «Полигон» (рис. 1) показывают, что возникновение усадочных раковин обусловлено, в первую очередь, геометрической конфигурацией шара. Учитывая, что шар в полном объеме выполняет свою функцию при условии сохранения им правильной формы, наличие усадочных раковин оказывает негативное влияние не только на равномерность процесса износа, но и на ударостойкость шаров.

Низкая теплопроводность белых чугунов вызывает высокую чувствительность литых заготовок к неравномерному охлаждению. Возникающие в отливке напряжения практически не релаксируются, что ведет к появлению трещин и разрушению шаров в процессе эксплуатации.

В современных условиях развития Беларуси, характеризующихся ограниченными материальными и энергетическими ресурсами, важной народнохозяйственной задачей является разработка и внедрение современных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования для изготовления мелющих тел, повышения их надежности и долговечности. В настоящее время в Беларуси дефицит мелющих тел составляет десятки тысяч тонн. Учитывая актуальность проблемы повышения стойкости мелющих тел для развития экономического потенциала нашей страны, в последние годы ведутся работы, направленные на освоение промышленной технологии производства мелющих шаров с повышенными эксплуатационными свойствами. На заводах «Полесьэлектромаш» и ОАО «МЗОО» производят отливку мелющих шаров в песчаные формы на автоматических линиях. В связи с дефицитом легирующих элементов имеет место тенденция к использованию недорогих, экономно-легируемых марок белых износостойких чугунов.

Изготовление шаров из таких чугунов с карбидами цементитного типа оправдывают прежде всего их относительно низкой стоимостью, наличием больших объемов дешевого сырья для их производства. Значительное количество хрупких и достаточно твердых включений цементитной фазы в таких чугунах, склонность к трансформации, высокая вероятность образования сосредоточенной усадочной раковины существенно снижают их эксплуатационные свойства.

С целью изменения неблагоприятного хода процесса кристаллизации белых доэвтектических чугунов авторами была разработана технология инокулирующей обработки исходного расплава низкохромистого чугуна (содержание хрома 1,0–

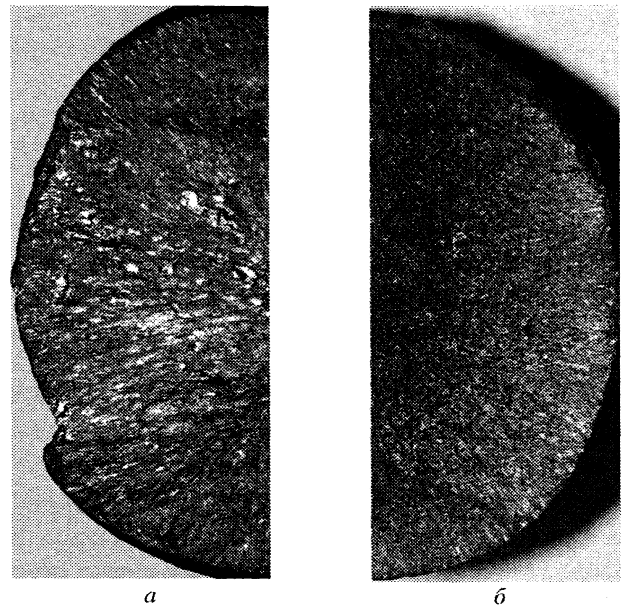


Рис. 2. Влияние инокулирующего модифицирования на трансформацию: *а* – до модифицирования; *б* – после модифицирования

3,0%), которая стабильно обеспечивает наличие в микроструктуре сплава незначительную графитизацию. Графитная фаза кристаллизуется в виде включений размерами 5–10 мкм, равномерно распределенных в металлической матрице. Процесс модифицирования оказывает благоприятное влияние на формирование трансформитной структуры чугуна (рис. 2), позволяет значительно снизить объем усадочных дефектов, повысить ударостойкость мелющих тел.

Разработанный технологический процесс изготовления мелющих шаров опробован в условиях РУП «Полесьэлектромаш». Внепечную обработку исходного низкохромистого расплава чугуна проводили по следующей схеме. После расплавления шихтовых материалов скачивали шлак, исходный жидкий чугун доводили по химическому составу и температуре. Процесс модифицирования проводили в ковше с помощью специальной комплексной лигатуры с целью частичной графитизации чугуна и сфероидизации графитных включений. Расход лигатуры – 0,7–1,0% от массы обрабатываемого жидкого чугуна.

Характеристики микроструктуры и твердости чугуна в отливках приведены в таблице.

Графитизирующая и сфероидизирующая обработка расплава чугуна обуславливает отсутствие трансформации, снижает объем усадочных дефектов в мелющих шарах, шаровидные включения графита способствуют объемному восприятию ударных нагрузок в процессе реальной эксплуатации. Все это при незначительном снижении твер-

Диаметр шара, мм	Способ модифицирования	Микроструктура чугуна	Твердость HRC	
			поверхность	½ радиуса
40	Ковшовое 0,7% (Al-Mg-P3M-Si)	Цементит – 30–35%, шаровидный графит – 3–4%, отдельные участки троосто-сорбита – 10–15%, ледебурит, транскристаллизация и концентрированная усадочная раковина отсутствуют	52	52
60	Ковшовое 0,7% (Al-Mg-P3M-Si)	Цементит – 25–30%, шаровидный графит – 3–4%, троосто-сорбит – 15–17%, ледебурит, транскристаллизация и концентрированная усадочная раковина отсутствуют	50	46

дости на 2–3 HRC (износостойкости) в 2,5–3,5 раза повышает ударостойкость мелющих тел.

В зависимости от условий эксплуатации требования к микроструктуре мелющих тел различаются, поэтому необходим дифференцированный выбор химического состава мелющих шаров применительно к конкретной технологии литья и условиям эксплуатации.

С экономической точки зрения не вызывает сомнения эффективность и технологическая целесообразность производства мелющих тел из высоколегированных белых чугунов. В настоящее время наметилась тенденция использования многокомпонентных экономно-легированных в различных сочетаниях (Cr, Ni, Mo, Ti, V, W и т. д.) чугунов. Каждый компонент наряду со своим назначением выполняет и общую задачу повышения уровня эксплуатационных свойств, при этом его индивидуальные свойства могут быть усилены коллективным воздействием. Главная задача сводится к тому, чтобы получить однородную и однотипную по свойствам микроструктуру во всех частях отливки из легированных чугунов, процессы структурообразования в которых отличаются повышенной чувствительностью к кинетическим факторам.

На основании анализа научно-исследовательской и патентной литературы можно сформулировать основные положения наиболее оптимальной схемы технологического процесса изготовления мелющих шаров.

1. После введения модификаторов необходимо обеспечить ускоренное охлаждение расплава до минимально возможной температуры, для того чтобы уменьшить возможное увеличение размеров карбидов.

2. Для получения необходимой структуры заготовки из износостойких белых чугунов подвергают длительной термической обработке, вполне обоснованным и рациональным решением является совмещение процесса литья с термической обработкой. Время выдержки при температуре аустенитизации выбирается в зависимости от исходной структуры и должно обеспечивать получение од-

нородной аустенитной микроструктуры металлической матрицы, выравнивания температуры по сечению отливки, насыщения до требуемой величины аустенита углеродом и обеспечения выделения вторичных карбидов с размерами ~1 мкм.

3. Охлаждение с высокой скоростью до температуры мартенситного превращения, для того чтобы исключить образование промежуточных структур. Низкотемпературная термическая обработка для снятия внутренних напряжений.

В связи с дефицитом легирующих элементов в республике необходимо использовать отходы смежных отраслей промышленности в виде оксидосодержащих материалов, стружки, окалины и других материалов, содержащих дорогие легирующие элементы. Безусловно, нужно проводить работу по отработке технологии плавки с использованием отходов с целью их стабильного восстановления и усвоения. Использование вместо традиционных ферросплавов дешевых отходов производств с экономической точки зрения позволит существенно повысить конкурентоспособность отечественной продукции.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование различного рода электрофизических воздействий на расплав в период кристаллизации. Физическое воздействие электрическим током, переменными магнитными полями, ультразвуком и т. д. ускоряет процессы массопереноса в расплаве, благоприятно сказывается на гомогенизации расплава, ведет к заметному уменьшению пораженности заготовок усадочными дефектами, измельчению структуры кристаллизующейся отливки.

Большие перспективы открываются перед технологами при использовании методов обработки расплава с помощью введения дисперсных порошков тугоплавких соединений карбидов, оксидов, нитридов и т. д. В результате введения наноразмерных материалов происходит ускорение и развитие объемного затвердевания, что позволяет уменьшить или полностью устранить транскристаллизацию при затвердевании. Благодаря пали-

чию в расплаве большого количества дисперсных частиц, играющих роль зародышей кристаллизации при охлаждении отливки, происходит образование мелкозернистой структуры металла и, как следствие, существенное повышение комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств материалов.

В перспективе для увеличения срока службы мелющих шаров возможно использовать предварительную поверхностную обработку с помощью

различных видов высокоэнергетических способов упрочняющего воздействия (энергии удара, низкочастотных и высокочастотных ультразвуковых колебаний и т. д.), а также комбинирование нескольких схем обработки с использованием различных видов энергии. Их эффективность определяется результирующим действием полей различной природы: температурного, электромагнитного, деформационного (от ударной волны) и изменений, происходящих в результате структурных превращений.

### Литература

1. Dombrow H., Husemann K., Houbolds S. Dobmalmak paincelozasa orlotesttollete. Epitonyang. 1986. k. 38. N 10, old. 293–296.
2. Цыпин И. И. Износостойкие отливки из белых легированных чугунов. М.: НИИмаш, 1983.
3. Carent-Sinonin S., Margerie J. Caracteristignes mecanic meset resistance in lurure des fontes blanches «Rewue de Metallurgie» 1972. Vol. 69. N 12. P. 809–823.
4. Лившиц М. И., Семенов О. Г., Сморгачев И. В. Повышение производительности помольных мельниц в горнорудной промышленности. М.: МИСИС. 1988. Т. 38. С. 16–18
5. Поддубный А. Н., Кульбовский И. К., Дюков А. В. Мелющие шары с высокой эксплуатационной стойкостью из белого легированного чугуна // Литейное производство. 1997. С. 46.
6. Special-Purpose alloy casting to resist, abrasion // Bradley and Foster Ltd. Darlaston. England. 1976.