



The efficiency of the wear-resistant alloys 200Г4Х5Л and 200Г5Х2ТФЛ use as inserts for combined rubber-metal linings of drum-type ore grinding mills is shown.

Г. В. ЛЕВЧЕНКО, ИЧМ НАН Украины,
О. Е. СВИСТЕЛЬНИК, Межотраслевой инновационный консорциум «Технологии XXI века»,
В. Л. ПЛЮТА, ИЧМ НАН Украины,
А. Б. СЫЧКОВ, А. Н. ЕМЕЛЮШИН, Магнитогорский государственный технический университет,
А. М. НЕСТЕРЕНКО, ИЧМ НАН Украины

УДК 669.21

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИТЫХ ВСТАВОК ИЗ ХРОМОМАНГАНЦЕВЫХ СПЛАВОВ ПЕРЕХОДНОГО КЛАССА ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕЛЬНИЧНЫХ ФУТЕРОВОК

При переработке руд и других материалов в товарную продукцию используются операции их дробления и измельчения. В процессах переработки рудных материалов на современных ГОК, клинкера в цементной промышленности, шихтовых материалов на металлургических предприятиях, угля и сланца на предприятиях энергетики и других материалов их измельчение осуществляется в дробилках, многокамерных шаровых мельницах барабанного типа и других агрегатах [1, 2].

Вследствие постоянного контакта с измельчаемым материалом, актами трения и интенсивными соударениями между собой мелющие тела и футеровка барабанных мельниц испытывают значительное абразивное и ударно-абразивное изнашивание [2]. Между механизмами этих видов износа много общего. Спецификой процесса ударно-абразивного изнашивания является проявление актов деформации металла в определенных микрообъемах поверхностного слоя. Результатом воздействия ударной составляющей при этом виде износа служит разрушение металла отслаиванием, а также хрупким разрушением с выкрашиванием [2].

Уникальный многолетний опыт работ, накопленный в области технологии измельчения, и теоретические разработки в сфере изыскания новых материалов, альтернативных металлическим, позволили обосновать возможность использования эластомерных материалов (резин) для изготовления мельничных футеровок барабанных мельниц помола руд и других веществ [3].

Выбор конструктивных элементов резиновой футеровки во многом основывался на результатах

теоретического исследования процессов в системе «шар-плоскость», моделирующих взаимодействие элементов внутримельничной загрузки (мелющие шары, куски руды) с футеровкой [3–5]. Полученные при анализе результаты свидетельствовали о существенном преимуществе резиновых футеровок перед металлическими, которое заключалось в повышении турбулентности пульпы в барабане, увеличении степени скольжения и амплитуды фрикционных колебаний в зоне контакта футеровки с загрузкой и проявления других эффектов, способствующих более активной дезинтеграции руд. Благодаря высокой эластичности и большой диссипации энергии в зоне контакта между резиновой футеровкой и загрузкой устанавливается режим взаимодействия, соответствующий минимуму потребления энергии. В сумме все эти факторы приводят к тому, что при использовании резиновой футеровки на образование удельной поверхности разрушения материала расходуется меньше энергии, чем при использовании металлической футеровки. Этим в случае резиновой футеровки обеспечиваются более высокие показатели процесса измельчения по сравнению с металлической:

- повышение производительности на 10–15%;
- сокращение на 15–20% удельного расхода мелющих тел;
- снижение расхода электроэнергии на 5–10%;
- увеличение на 3–7% выхода готового продукта.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия ведущие мировые концерны в области производства сменных износостойких деталей для горнорудного

и металлургического оборудования, например «Metso Minerals (Skelleftea) AB», Швеция, наряду с применением резин для изготовления этих деталей приступили к разработке и производству привлекательных в экономическом плане систем футеровок мельниц практически для любых задач измельчения и других изделий, предусматривающих комбинирование стали (чугуна) и резины. В Украине разработки по использованию эластомеров (резин) и их комбинирования с металлическими вставками для изготовления сменных износостойких деталей для горно-металлургического оборудования успешно осуществляются Межотраслевым инновационным консорциумом «Технологии XXI века» (г. Днепропетровск). В соответствии с требованиями нормативной документации (технических условий Украины) он производит следующие резиновые и комбинированные изделия: футеровки мельниц МРГ 40Х75, МРГ 40Х75 17 (ТУ У 25.1-23645455-003:2006) и гидроциклонов «Кребс» (ТУ У 25.1-23645455-002:2006), модульные сита (ТУ У 25.1-31951271-001-2003), решетки (ТУ У 25.1-23645455-003:2006), бутары (ТУ У 25.1-23645455-004:2006), ленточно-конвейерные грохота ГЛК 4500, дробилки ДВВБ 100/20 и др. При указанном комбинировании максимально используются преимущества как одного, так и другого материалов – эластичность резины и износостойкость сталей и чугунов. Более того, представляется возможным использование гораздо более твердых и износостойких марок сталей и чугунов, чем при сплошной металлической футеровке, поскольку в этом случае резина выступает в роли демпфирующего материала, способного поглощать ударные нагрузки, что предотвращает возможность разрушения высокотвердых сталей и чугунов, отличающихся повышенной склонностью к хрупкому разрушению при интенсивном ударном нагружении. В случае, например, мельниц полусамозмельчения металлические элементы комбинированной футеровки могут иметь твердость до 500–600 НВ, тогда как для сплошной металлической футеровки уровень значений твердости ограничивается до 350–400 НВ.

Особенности эксплуатации мельничных футеровок весьма специфичны прежде всего потому, что изнашивание материала футеровок, применяемого, например, на первой стадии измельчения железорудного сырья, является результатом сочетания ударно-абразивного воздействия и коррозии, связанной с повышенной кислотностью воды, используемой непосредственно в процессе помола. Этот, так называемый «мокрый» способ измельчения, при котором вода непрерывно подается в мельницу вместе с сырьем и образует пульпу, широко

используется при переработке руд черных и цветных металлов. Расход мельничной футеровки при мокром способе значительно превышает таковой при сухом измельчении, что объясняется дополнительным влиянием развития коррозионных и кавитационных процессов в материале футеровки, вызванных воздействием пульпы. Для мокрого помола логичным представляется использование как раз комбинированных резинометаллических футеровок, которые наряду с высокой износостойкостью отличаются повышенной стойкостью к воздействию коррозии.

Поэтому представляется перспективным проведение комплекса исследований, направленных на разработку технологии производства износостойких сплавов экономного легирования, используемых в качестве металлических элементов комбинированных резинометаллических футеровок.

Как известно, для изготовления сменных деталей горно-металлургического оборудования, работающих в сложных условиях совместного влияния сил трения, абразивного и ударно-абразивного износа, коррозии, широко применяются марганцовистые сплавы, такие, как 65Г, 75Г2 (и ее модификации), сталь Гадфильда 110Г13Л и др. [6].

Практика применения этих деталей показала, что, несмотря на высокий уровень показателей физико-механических свойств марганцевых сталей, их эксплуатационные характеристики являются пониженными по той причине, что они не обладают требуемым уровнем абразивной износостойкости.

Помимо этого, сталь Гадфильда и ее модификации (110Г13Х2БРЛ, 110Г13ФТЛ, 130Г14ХМФАЛ, 120Г10ФЛ), применяемые для сменных деталей горно-металлургического оборудования, содержат большое количество марганца и других дефицитных легирующих элементов, таких, как молибден, ниобий, ванадий, что существенно повышает их стоимость.

Создание гаммы хромистых сталей и чугунов (Х12, Х12М, 30–40Х13, Х12Ф1, Х12МФ, ИЧХ30НМ, ИЧ300Х28Н2, ИЧ280Х12М и др.) в 60–80-х годах прошлого столетия основывалось на представлениях о том, что свойственные им показатели высокой абразивной износостойкости обусловлены наличием в их структуре высокотвердых карбидов типа Me_7C_3 . Согласно данным М. Е. Гарбера [7], микротвердость карбидов $(Cr, Fe)_7C_3$ составляет 12 000–15 000 МПа, тогда как для карбидов цементитного типа Fe_3C или $(Cr, Fe)_3C$ ее значения ниже – на уровне 8000–11 000 МПа.

Карбид $Me_{23}C_6$ характеризуется более высокими значениями микротвердости: 16 000–18 000 МПа.

Химический состав и показатели ударно-абразивной износостойкости опытных синтетических сплавов

Номер сплава	Массовая доля элементов, %						Относительная потеря массы, %
	C	Si	Mn	Cr	S	P	
1	2,09	0,55	—	—	≤0,022	≤0,025	0,372
2	1,96	0,59	2,02	—			0,316
3	2,07	0,61	4,02	—			0,266
4	1,98	0,56	7,88	—			0,289
5	2,01	0,51	3,89	2,00			0,235
6	1,99	0,67	4,16	4,01			0,252
7	2,10	0,63	3,56	7,06			0,212

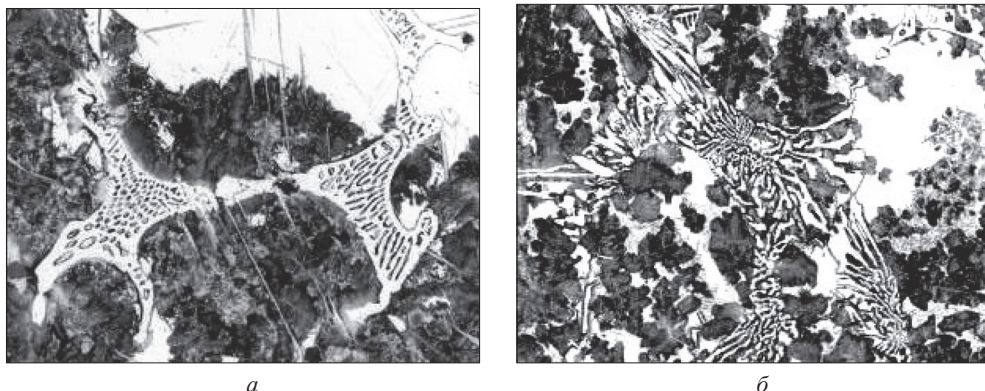


Рис 1. Микроструктура сплавов № 6 (а) и № 7 (б). ×1000

Однако возможности получения хромистых сплавов с эвтектиками типа $A+Me_{23}C_6$ из-за узкого концентрационно-температурного интервала этого превращения несколько проблематичны, поэтому для разработки износостойких сталей и сплавов использовались как основные концентрационно-температурные интервалы фазово-структурных превращений, обеспечивающие образование основной упрочняющей фазы – карбида $(Me, Fe)_7C_3$ в виде составляющей эвтектик $A+(Me, Fe)_7C_3$. Несмотря на высокую стойкость хромистых сплавов к воздействию абразивного износа, как такового, эти сплавы отличаются повышенной хрупкостью и низкой стойкостью в случае ударно-абразивного нагружения, что существенно ограничивает область их применения.

Изложенное выше позволяет считать перспективным проведение исследования сплавов системы Fe-C-Mn-Cr переходного (от сталей к чугунам) класса с содержанием углерода 1,6–2,2%, в которых совместное легирование марганцем и хромом будет обеспечивать как высокую твердость и износостойкость за счет твердых карбидов типа $(Fe, Cr, Mn)_7C_3$ и $(Fe, Cr, Mn)_3C$, так и повышенную вязкость за счет легирования марганцем их твердорастворной матрицы.

Исследовали литые сплавы систем Fe-Mn-C (базовые в данном эксперименте) и Fe-Mn-Cr-C, химические составы которых приведены в таблице. В таблице даны результаты испытаний образ-

цов сплавов на ударно-абразивный износ в лабораторной шаровой мельнице.

Из таблицы видно, что наибольшей стойкостью при испытаниях на изнашивание характеризовались сплавы № 5–7. Структура сплавов № 5, 6 состояла из аустенито-перлитной матрицы с игольчато-пластинчатыми выделениями вторичного цементита и эвтектических колоний ледебуритного типа на основе карбида Me_7C_3 (рис. 1, а). Ледебуритные колонии располагались, как правило, в междендритных участках в виде узорно-прерывистых «виньеток», оконтуривающих дендриты матрицы сплава. Структура сплава № 7 и в особенности «розеточное» строение эвтектической ее составляющей существенно отличается от таковой для сплавов № 5, 6 (рис. 1).

Более того, эвтектические карбиды в сплаве № 7, как показал проведенный микрорентгеноспектральный анализ, характеризуются высоким содержанием углерода, марганца и хрома в своем составе, типичном для стехиометрии карбида типа Me_7C_3 .

Рентгеновский фазовый анализ подтвердил наличие в сплаве № 7 гексагонального карбида Me_7C_3 , поскольку на дифрактограмме образцов этого сплава совершенно отчетливо выявляются его системные интерференции (рис. 2). Наличие интерференций другого карбида – цементита Me_3C на дифрактограмме сплава № 7 (рис. 2) связано с двумя факторами. Во-первых, с тем, что при кристаллизации остающегося к концу затвердевания жид-

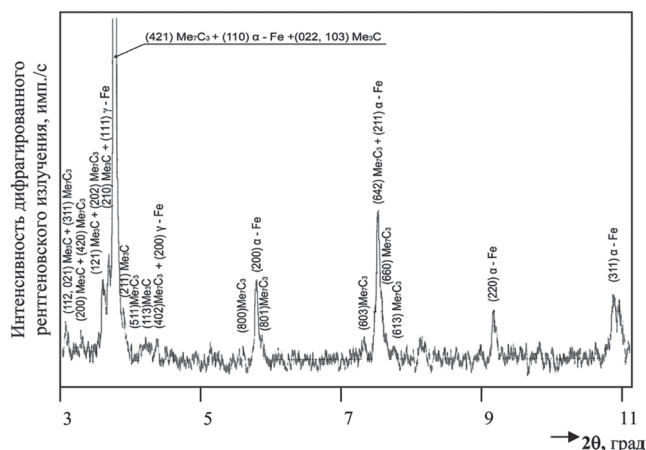


Рис. 2. Дифрактограмма исследованного сплава № 7

кого расплава в его объемах, обедненных углеродом, марганцем и хромом, эвтектический распад осуществляется по реакции $\text{Ж} \rightarrow \text{A} + \text{Me}_3\text{C}$. Во-вторых, с тем, что структурной составляющей сплава № 7 является $\text{Me}_3\text{C}_{\text{эвт.}}$ – эвтектоидный цементит перлита, который тоже вносит вклад в повышение интенсивности интерференций «цементитного типа» на соответствующих дифрактограммах (рис. 2).

Проведенный металлографический анализ образцов сплава № 7 показал, что объемная доля ледебурита в его структуре находится на уровне 10–12%. Выявленное при этом анализе наличие достаточно большого количества светлых (не травящихся) полей аустенитной фазы в структуре сплава № 7 (см. рис. 1, б) свидетельствует о том, что распад аустенита по механизму эвтектоидной реакции $\text{A} \rightarrow \alpha\text{-Fe} + \text{Me}_3\text{C}_{\text{эвт.}}$, где $\alpha\text{-Fe}$ – феррит перлита, осуществляется в нем лишь частично. Это подтверждается также и наличием интерференций аустенита на дифрактограмме сплава № 7 (рис. 2).

Таким образом, можно утверждать, что сочетание в структуре сплавов № 5–7 достаточного количества твердых карбидных фаз и пластичной аустенито-перлитной матрицы обеспечивает наблюдаемые (см. таблицу) высокие показатели их ударно-абразивной износостойкости. Именно эти сплавы условной маркировки 200Г5Х2Л и 200Г4Х7Л с эвтектиками на основе карбидов Me_3C и Me_7C_3 соответственно, как раз и были использованы в разработках технологии производства износостойких вставок комбинированных резинометаллических футеровок.

Учитывая особую перспективность применения резинометаллических футеровок на первой стадии измельчения железорудного сырья (мокрого помола), при оценочном анализе ударно-абразивно-коррозионной стойкости образцов исследованных сплавов в лабораторной мельнице помола применяли раствор с величиной водородного по-

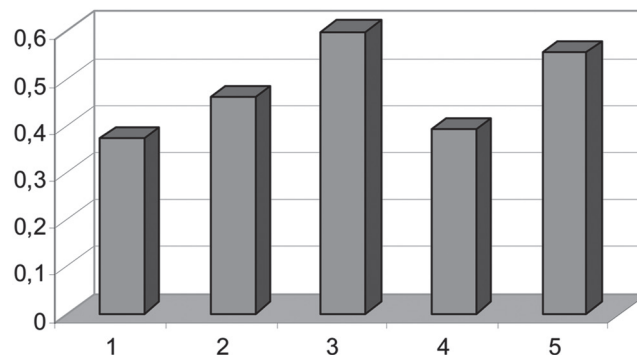


Рис. 3. Характер изменения относительной износостойкости исследованных сплавов при ударно-абразивно-коррозионном изнашивании: 1 – 200Г4Х7Л; 2 – 200Г4Х7Л (1100 °С_{охл.} на возд.); 3 – 200Г4Х7Л (1100 °С_{охл.} в воде); 4 – 200Г5Х2Л; 5 – 110Г13Л

казателя pH 7,7, который получали введением NaOH и H_2SO_4 в дистиллированную воду. Раствор соответствовал по химическому составу технической воде, используемой на Центральном ГОК (г. Кривой Рог, Украина) при помоле железной руды: Ca – 252 мг/л; Mg – 281; Fe – 0,34; Cl – 672; SO_4 – 2366; нитраты – 13,5; бикарбонаты – 225; сухой остаток – 4823; общая жесткость – 36 мг-экв/л. После испытаний длительностью 5 ч определяли относительный износ образцов – потерю массы с единицы площади их поверхности, отнесенную к таковой для эталонных образцов из стали Х12МФ.

Как показывает приведенная на рис. 3 гистограмма, образцы литых сплавов 200Г4Х7Л и 200Г5Х2Л характеризовались более высокой износостойкостью в пульпе технической воды по сравнению со сталью Гадфильда (110Г13Л). Показатели износостойкости образцов сплавов 200Г4Х7Л и 200Г5Х2Л близки к таковым для сравнительной стали Гадфильда.

Поэтому дальнейшие разработки проводили только на литых сплавах с выбранными базовыми составами.

Выплавка сплавов 200Г4Х7Л и 200Г5Х2ТФЛ (сплав 200Г5Х2Л дополнительно микролегированный титаном и ванадием) для изготовления опытно-промышленных партий клиновидных вставок резинометаллических футеровок барабанных мельниц по размолу железной руды осуществлялась в условиях ООО «Самара-Сталь» (г. Днепропетровск, Украина) в индукционной печи типа ТПЧ-320 по специально разработанной технологической инструкции.

Опытная резинометаллическая футеровка со вставками из разработанных сплавов 200Г4Х7Л и 200Г5Х2ТФЛ была изготовлена на базе Межотраслевого инновационного консорциума «Технологии XXI века» (г. Днепропетровск, Украина) в соответствии с требованиями ТУ У 25.1-23645455-

003:2006 и установлена в мае 2011 г. на РОФ-1 ОАО «Ингулецкий горно-обогатительный комбинат» (ИнГОК) для эксплуатации в барабанной мельнице первой стадии помола МШР 3,6×5,5. Эксплуатация опытной бронефутеровки с момента ее установки в барабанную мельницу ОАО «ИнГОК» осуществлялась без замечаний.

Выводы

1. Установлено, что сочетание в структуре хромомарганцевых сплавов переходного (1,6–2,2% С)

класса типов 200Г4Х5Л, 200Г5Х2Л (200Г5Х2ТФЛ) достаточного количества твердых карбидных фаз и пластичной аустенито-перлитной матрицы обеспечивает наблюдаемые высокие показатели их ударно-абразивной и ударно-абразивно-коррозионной стойкости.

2. Показана эффективность использования износостойких сплавов 200Г4Х5Л и 200Г5Х2ТФЛ в качестве вставок комбинированных резинометаллических футеровок барабанных мельниц помола железной руды.

Литература

1. Шинкоренко С. Ф. Технология измельчения руд черных металлов. М.: Недра, 1982.
2. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы / А. Н. Крутилин, Н. И. Бестужев, А. Н. Бестужев, Д. Н. Каленкович // Литье и металлургия. 2009. № 4 (53). С. 26–33.
3. Дырда В. И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. Киев: Наукова думка, 1988.
4. Динник А. Н. Избранные труды. Киев: Изд-во АН СССР, 1952. Т. 1.
5. Маркелов А. Е. Исследование абразивно-усталостного износа резиновых футеровок барабанных рудоизмельчительных мельниц // Геотехническая механика: Сб. науч. трудов. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2008. Вып. 75. С. 142–163.
6. Соколов О. Г., Кацов К. Б. Железомарганцевые сплавы. Киев: Наукова думка, 1982.
7. Гарбер М. Е. Отливки из белых износостойких чугунов. М.: Машиностроение, 1972.