

УДК 544.032.2

Влияние износа измельчающих тел на результаты механического сплавления смесей порошков Fe и Si(C)

Г. Н. КОНЫГИН¹, Н. ŠTEVULOVA², Г. А. ДОРОФЕЕВ¹, Е. П. ЕЛСУКОВ¹¹Физико-технический институт Уральского отделения РАН,
ул. Кирова, 132, Ижевск 426001 (Россия)

E-mail: Konygin@fnms.fti.udmurtia.su

²Institute of Geotechnics Slovak Academy of Sciences,
Watsonova, 45, Košice 04353 (Slovakia)

Аннотация

Методами мёссбаэровской спектроскопии, рентгеновской дифракции и гравиметрических измерений проведены исследования взаимодействия образца и продуктов износа измельчающих тел, изготовленных из нержавеющей стали, карбида вольфрама и упрочненной шарикоподшипниковой стали ШХ15. Установлено, что при прочих равных условиях наиболее износостойкой и менее склонной принимать участие в процессе механического сплавления является сталь ШХ15. Показано, что при выборе материалов измельчающих тел для исследования процессов механического сплавления необходимо принимать во внимание условие получения достоверной информации: увеличение массы исследуемой смеси в процессе механической обработки не должно превышать 10 %.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время механическое сплавление получило распространение как низкотемпературный метод синтеза различных неравновесных фаз. Для сплавления используются высокоэнергонапряженные устройства с измельчающими телами из различных материалов. При этом всегда возникает вопрос о чистоте получаемого продукта (соответствии среднего химического состава исходной смеси конечному продукту) вследствие его загрязнения продуктами износа измельчающих тел. Продукты износа могут вступать во взаимодействие с измельчаемым образцом, поэтому выбор материалов измельчающих тел при проведении экспериментов по механическому сплавлению требует особого внимания. С другой стороны, степень загрязнения измельчаемого образца и его взаимодействие с продуктами износа могут определяться также составом исследуемой порошковой смеси. Действительно, в системе Fe–Sn не обнаружено существенного загрязнения ни при механическом сплавлении [1], ни при механи-

ческом измельчении [2]. А противоречие результатов, полученных при механической активации системы Fe–В, как показано в [3], обусловлено влиянием различного типа примесей, попадающих в измельченный образец. Однако следует отметить, что проблеме загрязнения при механоактивации до сих пор не уделялось достаточно внимания.

Цель настоящей работы – проведение экспериментов по механоактивации с использованием измельчающих тел из различных материалов, тщательный анализ чистоты измельченных образцов по содержанию примесей и исследование влияния загрязнения на получаемые результаты.

Для проведения механического сплавления были выбраны композиции Fe(75)/Si(25), Fe(68)/Si(32), Fe(68)/C(32).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Механическое сплавление системы Fe–Si проводили в шаровых планетарных мельницах с шарами и сосудами из следующих ма-

териалов: карбида вольфрама (мельница Пульверизетте-6), нержавеющей стали (12 % Cr + 8 % Ni) и стали ШХ15 (1 % C+1.5 % Cr) (мельница Пульверизетте-7). Механическое сплавление системы Fe–C проводили в мельнице Пульверизетте-7 с шарами и сосудами из ШХ15. В качестве исходного материала использовались механические смеси порошков железа ос.ч. 13-2 (99.98 %), высокочистого Si (99.99 %) и спектрально чистого графита. Измельчение проводилось в атмосфере Ar. Время измельчения ($t_{\text{сп}}$) варьировалось в пределах от 1 до 48 ч. Температура нагрева образца, сосудов и шаров при механической обработке не превышала 60 °С. Для каждого заданного $t_{\text{сп}}$ масса загружаемой исходной смеси m_0 составляла 10 г. Для определения степени загрязнения сплавляемых порошков продуктами износа используемых сосудов и шаров для каждого времени $t_{\text{сп}}$ проводились контрольные гравиметрические измерения полученного образца, сосудов и шаров как до, так и после измельчения. Загрязнение образцов карбидом вольфрама (WC) определялось из количественного фазового анализа рентгеновских дифрактограмм. Для анализа влияния загрязнения на химический и фазовый состав продуктов механосинтеза использовали методы рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии.

Рентгеноструктурные исследования были выполнены на дифрактометре типа ДРОН в монохроматизированном излучении CuK_α . Мёссбауэровские измерения проводились на спектрометре ЯГРС-4М, работающем в режиме постоянных ускорений с источником ^{57}Co в матрице Cr. Для получения упорядоченного состояния часть образцов системы Fe–Si после механического сплавления отжигали в вакууме.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменения массы образцов

На рис. 1 приведены данные по относительному изменению массы образца (Dm/m_0) в зависимости от времени механической обработки (сплавления). Из рис. 1, а видно, что наибольшее увеличение массы в смеси Fe(75)/Si(25)

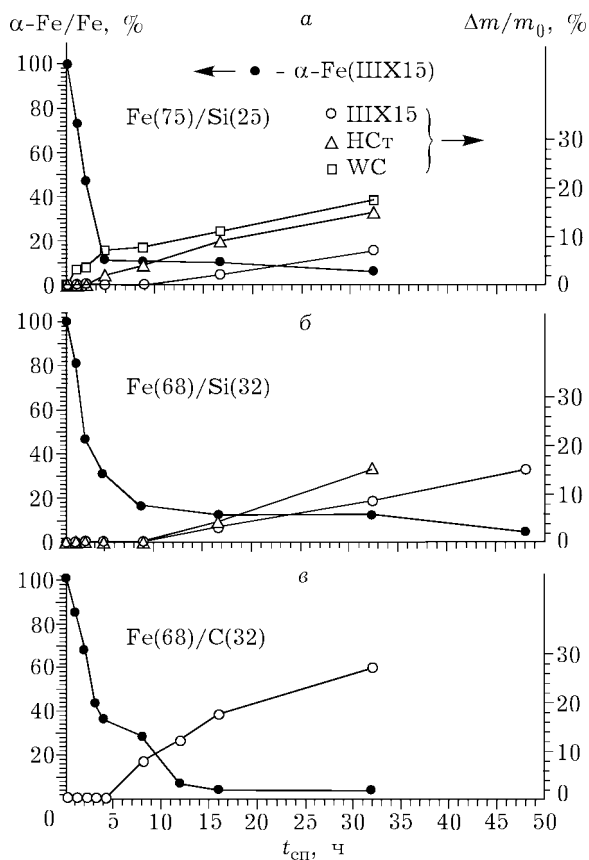


Рис. 1. Зависимость относительного увеличения массы (Dm/m_0) и относительного содержания $\alpha\text{-Fe}$ ($\alpha\text{-Fe}/\text{Fe}$) в измельчаемой смеси от времени сплавления.

наблюдается при использовании сосуда и шаров из карбида вольфрама и нержавеющей стали (НСт). Упрочненная шарикоподшипниковая сталь ШХ15 является более износостойкой: при $t_{\text{сп}} \leq 10$ ч $Dm/m_0 = 0$. Важно также отметить, что наблюдаемые значения Dm/m_0 определяются в основном износом шаров и в меньшей степени – сосуда. Приведенные данные для смеси Fe(68)/Si(32) (см. рис. 1, б) подтверждают преимущество стали ШХ15 по сравнению с НСт. Однако износ стали ШХ15 резко возрастает при изменении состава исходной смеси. Из сравнения рис. 1, б и в видно, что при $t_{\text{сп}} = 16$ ч значение Dm/m_0 в случае Fe(68)/C(32) почти на порядок больше такового для смеси Fe(68)/Si(32).

В каждом конкретном случае необходимо ответить на вопрос о взаимодействии продуктов износа с измельчаемым образцом. На рис. 1 приведены временные зависимости относительного содержания непрореагировавшего

го железа ($\alpha\text{-Fe/Fe}$) в случае использования ШХ15, которые были получены по результатам математической обработки мёссбауэровских спектров измельченных смесей. Подробно процедура обработки описана нами в работе [4]. Можно выделить три этапа поведения $\alpha\text{-Fe/Fe}$ в зависимости от $t_{\text{сп}}$:

1) резкое уменьшение значений $\alpha\text{-Fe/Fe}$, что прямо указывает на механическое сплавление железа с кремнием или углеродом;

2) появление плато, которое наиболее отчетливо видно для системы Fe(68)/Si(32) в интервале $t_{\text{сп}}$ от 8 до 32 ч (см. рис. 1, б); в целом, появление плато совпадает по времени с возрастанием массы образца после измельчения;

3) уменьшение значений $\alpha\text{-Fe/Fe}$ до 0, когда $Dm/m_0 \approx 10\%$. По нашему мнению, третий этап прямо указывает на процесс механического сплавления измельчаемого образца с продуктами износа.

Детальный анализ реакции взаимодействия продуктов износа с измельчаемым образцом выполнен нами с использованием данных рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии.

Система Fe–Si

Прежде всего необходимо сделать предварительные замечания, касающиеся оценок концентрации Si в механически сплавленном $\alpha\text{-Fe(Si)}$ – пересыщенном твердом растворе (ПТР). Концентрационная зависимость параметров ОЦК-решетки, упорядоченных и разупорядоченных шаровым измельчением сплавов Fe–Si, хорошо изучена в широком концентрационном интервале. Упорядоченный сплав быстро разупорядочивается за время измельчения 8 ч, в течение которого загрязнение практически отсутствует. Разупорядоченные сплавы Fe–Si в интервале атомной доли Si 13–33% имеют спадающую линейную концентрационную зависимость параметра решетки. При упорядочении по типу $D0_3$ параметр ОЦК-решетки уменьшается, однако линейная зависимость от концентрации сохраняется. Таким образом, по параметру решетки атомную долю Si можно определить с точностью 0.5%.

Более точную оценку концентрации Si в сплавах вблизи стехиометрии $D0_3$ (атомная

доля Si 25%) можно получить с помощью мёссбауэровской спектроскопии. В мёссбауэровском спектре упорядоченного стехиометрического сплава Fe_3Si имеются только две магнитно-расщепленные компоненты с различными сверхтонкими магнитными полями (СТМП): от атомов Fe с восьмью атомами Fe в ближайшем окружении (СТМП на ядре Fe $H_0 = 312$ кЭ) и от атомов Fe с четырьмя атомами Si и четырьмя атомами Fe в ближайшем окружении ($H_4 = 200$ кЭ). При уменьшении концентрации Si в мёссбауэровском спектре появляются компоненты с тремя, двумя и одним атомами Si в ближайшем окружении. При этом обнаруживается резкая концентрационная зависимость интенсивности компонент $P_4(H_4)$ и $P_3(H_3 = 250$ кЭ) [5–7], что позволяет с высокой точностью оценить концентрацию Si. Погрешность определения атомной доли Si в упорядоченных сплавах, по данным рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии, составляет 0.2%.

Таким образом, взяв в качестве репера концентрационную зависимость параметра решетки незагрязненных упорядоченных и неупорядоченных сплавов Fe–Si, мы могли с большой точностью оценить содержание Si в исследуемых образцах по рентгенодифракционным данным параметра решетки. Кроме того, атомная доля Si вблизи 25% легко оценивается по соотношению интенсивностей компонент мёссбауэровского спектра P_k (где k – число атомов Si в ближайшем окружении атомов Fe) упорядоченного сплава. Для этого в качестве эталона были взяты два образца стехиометрического состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{25}$, выплавленных по обычной технологии, один из которых отжигался до полного упорядочения по типу $D0_3$, а другой измельчался (Пульверизетте-7, ШХ15, Ar) в течение 8 ч после отжига.

Для сравнения с эталоном исследуемые смеси Fe(75)/Si(25) после механического сплавления дополнительно отжигались до максимального упорядочения по следующей схеме: 800 °C (1 ч) ® медленное охлаждение до 500 °C ® выдержка при 500 °C в течение 4 ч.

Fe(75)/Si(25). Данные по концентрации Si и параметру решетки механически обработанных и отожженных до максимального упорядочения образцов и эталона приведены в

ТАБЛИЦА 1

Атомная доля Si в механически сплавленных образцах Fe(75)/Si(25), измельченном сплаве Fe₇₅Si₂₅ и после их отжига до максимального упорядочения, %

Образец	Время обработки, ч	НСт	WC	ШХ15
Fe(75)/Si(25)	8	—	$\frac{25.0(0.2836)}{23.4(0.2829) / 23.5}$	$\frac{23.0(0.2845)}{24.4(0.2837) / 24.2}$
	16	$\frac{20.0(0.2846)}{22.3(0.2832) / 22.5}$	$\frac{23.5(0.2840)}{22.2(0.2832) / 22.1}$	$\frac{23.5(0.2840)}{23.7(0.2829) / 23.8}$
	32	$\frac{21.0(0.2844)}{21.3(0.2834) / 21.8}$	$\frac{22.0(0.2848)}{20.1(0.2837) / 20.2}$	$\frac{22.0(0.2843)}{22.8(0.2838) / 23.2}$
Fe ₇₅ Si ₂₅	8			$\frac{25.0(0.2837)}{24.9(0.2826) / 25}$

Примечание. По данным рентгеновской дифракции (РД) и мёссбауэровской спектроскопии (МС). В числителе – после механической обработки (РД), в знаменателе – после отжига (РД/МС). В скобках указан параметр ОЦК-решетки, нм.

табл. 1. В эталонном измельченном сплаве Fe₇₅Si₂₅ атомная доля Si оказалась равной 25.0 %, что указывает на отсутствие загрязнения образца после измельчения в течение 8 ч с использованием стали ШХ15. Отжиг этого сплава (состояние Fe₃Si) с большой точностью подтвердил отсутствие загрязнения образца продуктами износа шаров и сосуда. Вид рентгеновской дифрактограммы (рис. 2), мёссбауэровского спектра и функции распреде-

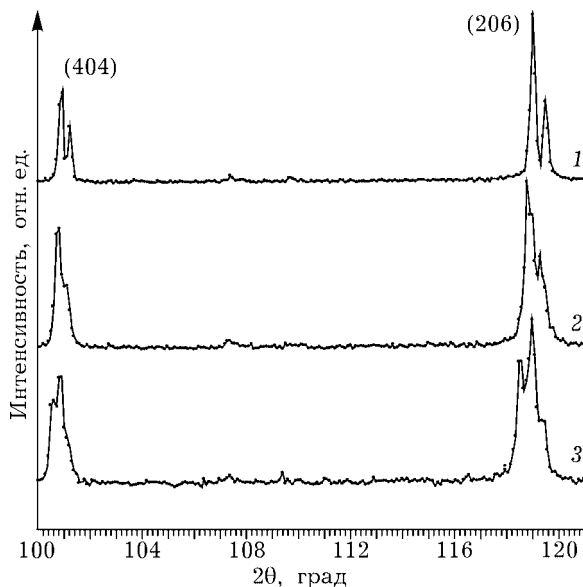


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы отожженных эталонного (Fe₃Si) сплава (1) и смесей Fe(75)/Si(25) после механического сплавления в течение 16 (2) и 32 ч (3) с использованием стали ШХ15.

ления СТМП $P(H)$ (рис. 3) полностью соответствует известным литературным данным. По интенсивности компоненты $P_4(H_4)$ (0.66) (рис. 4) и параметру ОЦК-решетки (0.2826 нм) атомная доля Si в упорядоченном состоянии была оценена в (25.0 ± 0.2) %.

При механическом сплавлении Fe(75)/Si(25) в сосуде из нержавеющей стали оказалось, что при времени сплавления (16 и 32 ч), соответствующем большим значениям Dm/m_0 (см. рис. 1, а), атомная доля Si значительно отличается от 25 % (см. табл. 1). После отжига этих образцов в мёссбауэровском спектре обнаруживается интенсивная компонента $P_3(H_3)$ (см. рис. 3 и 4). Сравнение концентраций Si в отожженных и измельченных образцах показывает, что при $t_{\text{сп}} = 16$ ч процесс образования ПТР еще не закончился (увеличение концентрации Si после отжига), в то время как при $t_{\text{сп}} = 32$ ч он уже завершился. Однако отсутствие в мёссбауэровских спектрах измельченных в течение 16 и 32 ч в НСт смесей Fe(75)/Si(25) компоненты от непрореагировавшего α -Fe и значение атомной доли Si (20–21 %) являются прямым доказательством интенсивного процесса механического сплавления измельченного образца с продуктами износа шаров и сосуда из НСт.

При измельчении смеси в сосуде и шарики из WC оказалось, что достаточно восьми часов для завершения процесса образования

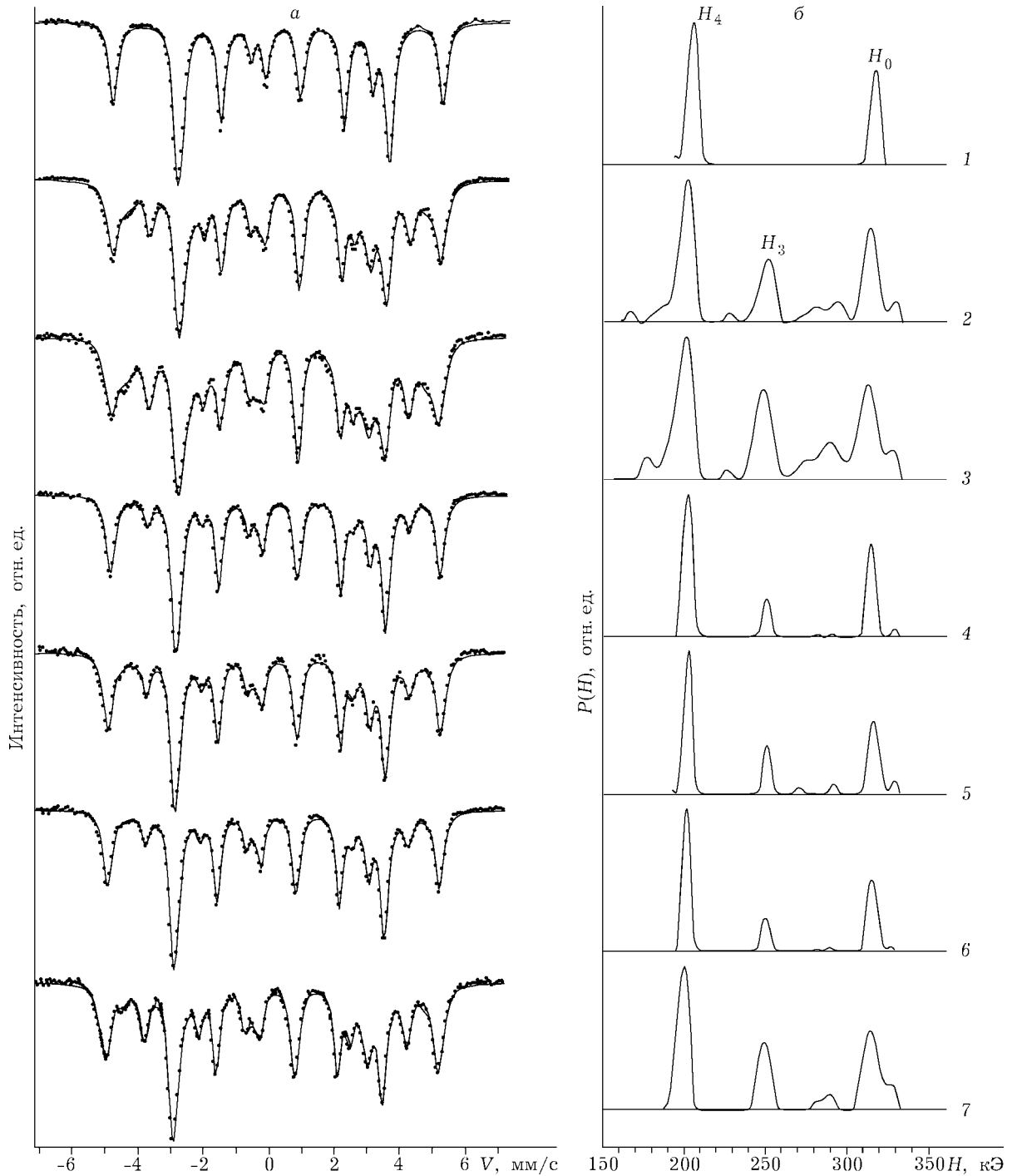


Рис. 3. Мёсбауэровские спектры (а) и соответствующие им функции распределения сверхтонких магнитных полей $P(H)$ (б) эталонного сплава Fe_3Si (1) и сплавленных образцов $\text{Fe}(75)/\text{Si}(25)$ после отжига до максимального упорядочения: 2, 3 – НСт (16 и 32 ч), 4, 5 – ШХ15 (16 и 32 ч), 6, 7 – WC (8 и 16 ч).

ПТР с атомной долей Si 25 %. При этом в мёсбауэровском спектре отсутствует компонента от непрореагировавшего $\alpha\text{-Fe}$. Поскольку продукты износа WC не содержат Fe, можно сделать вывод, что на данном этапе ($t_{\text{сп}} = 8$ ч) не происходит взаимодействия образца и

продуктов износа. Однако увеличение $t_{\text{сп}}$ до 16 и 32 ч приводит к значительному уменьшению концентрации Si в ПТР, указывая на взаимодействие образца с продуктами износа. Неожиданными оказались результаты мёсбауэровской спектроскопии и рентгеновской

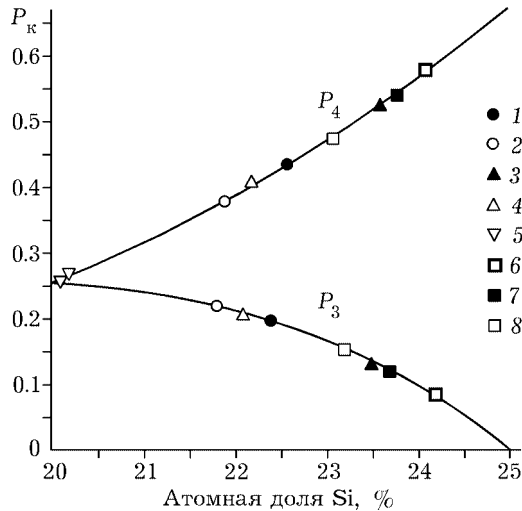


Рис. 4. Теоретические концентрационные зависимости вероятностей локальных атомных конфигураций с четырьмя (P_4) и тремя (P_3) атомами Si в ближайшем окружении атома Fe в упорядоченных по типу $D0_3$ сплавах Fe-Si (линии) и экспериментальные данные для отожженных смесей Fe(75)/Si(25) после механического сплавления с использованием различных материалов сосуда и шаров: НСт (1, 2), WC (3–5), ШХ15 (6–8). Время, ч: 8 (3, 6), 16 (1, 4, 7), 32 (2, 5, 8).

дифракции отожженных образцов. В мёсбауэровском спектре образца после 8 ч механической обработки и последующего отжига обнаруживается компонента $P_3(H_3)$ (см. рис. 3), свидетельствующая об уменьшении концентрации Si (см. рис. 4) в процессе отжига. В целом, для всех отожженных образцов в случае сосуда и шаров из WC установлены меньшие значения концентрации Si по сравнению с таковыми для образцов после механического сплавления. Мы предполагаем существование селективного химического взаимодействия WC и Si, приводящего к уменьшению концентрации Si в ПТР, начиная с определенного этапа механического сплавления. При отжиге взаимодействие усиливается и происходит даже в тех образцах ($t_{\text{отж}} = 8$ ч), в которых WC присутствовал как не взаимодействующая примесь.

Для стали ШХ15 были получены следующие результаты. При $t_{\text{отж}} = 8$ ч процесс образования ПТР не завершился, на что указывают присутствие в мёсбауэровском спектре измельченного образца компоненты от непрореагировавшего α -Fe, $Dm/m_0 = 0$ (см. рис. 1, а) и увеличение концентрации Si после отжига (см. табл. 1). Наиболее близким к завершению процесса оказался образец с $t_{\text{отж}} = 16$ ч. Рент-

геновская дифрактограмма (см. рис. 2), мёсбауэровский спектр и функция $P(H)$ (см. рис. 3) этого образца после отжига близки к таковым для эталонного упорядоченного сплава Fe_3Si . Атомную долю Si в механически сплавленном образце с использованием ШХ15 ($t_{\text{отж}} = 16$ ч) можно оценить в пределах 23.5–23.8 % (см. табл. 1). Однако увеличение $t_{\text{отж}}$ до 32 ч приводит к уменьшению атомной доли Si в измельченном образце до 22 %. Рентгеновская дифрактограмма образца после отжига (см. рис. 2) свидетельствует о двухфазном состоянии, отчетливо проявляющемся в форме линий (405) и (206) (индексы рефлексов указаны для сверхструктурной ячейки $D0_3$). В мёсбауэровском спектре и функции $P(H)$ увеличивается компонента $P_3(H_3)$.

Представленные результаты позволяют сделать некоторые предварительные выводы. С точки зрения полноты превращения (образования ПТР) наилучшим материалом является WC. Однако большие значения Dm/m_0 и возможность взаимодействия образца, усиливающегося при отжиге, с продуктами износа WC в процессе механического сплавления требуют большой осторожности при работе с этим материалом. Нержавеющая сталь в данном случае абсолютно непригодна. Наиболее износостойкой и менее склонной участвовать в процессе механического сплавления с изучаемым образцом является упрочненная шарикоподшипниковая сталь ШХ15.

Fe(68)/Si(32). Преимущество стали ШХ15 по сравнению с НСт отчетливо проявилось и при исследовании механического сплавления в системе Fe(68)/Si(32). Результаты рентгеновских и мёсбауэровских исследований этой системы подробно изложены в нашей работе [4]. В настоящей статье мы приводим только те из них, которые имеют непосредственное отношение к анализу образцов.

На рис. 5 приведены временные зависимости параметра ОЦК-решетки ПТР при использовании для механической обработки НСт и ШХ15. Отчетливо видно, что для ШХ15 параметр $a(t_{\text{отж}}) \gg \text{const}$ при $t_{\text{отж}}$ в интервале 4–48 ч и равен 0.2825 нм. Согласно [8], это значение соответствует атомной доле Si 30 %, т. е. близкой к таковой в исходной смеси. Для НСт минимальное значение a равно 0.2834 нм при $t_{\text{отж}} = 8$ ч и возрастает до 0.2838 нм при

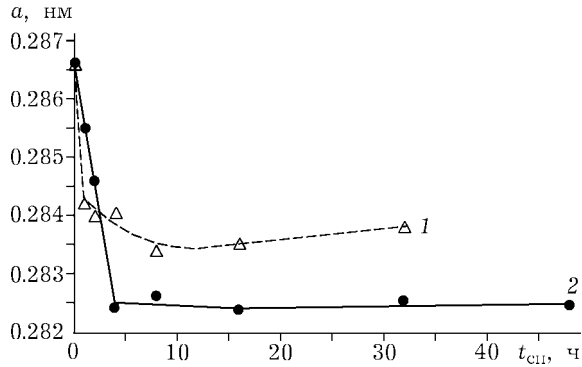


Рис. 5. Зависимости параметра ОЦК-решетки пересыщенного твердого раствора α -Fe(Si) в смеси Fe(68)/Si(32) от времени механического сплавления с использованием сосуда и шаров из нержавеющей стали (1) и стали ШХ15 (2).

$t_{\text{сп}} = 32$ ч, что соответствует атомной доле Si 26 и 23 % соответственно. Мёссбауэровские данные для случая механической обработки с использованием ШХ15 приведены на рис. 6. В мёссбауэровском спектре и функции $P(H)$ для $t_{\text{сп}} = 32$ ч отчетливо видна компонента от α -Fe, которая, согласно рис. 1, б, обусловлена в основном продуктами износа ($Dm/m_0 = 10\%$). Учитывая, что атомная доля Si в ПТР при $t_{\text{сп}} = 32$ ч составляет 30 %, можно сделать вывод об отсутствии на данном этапе взаимодействия продуктов износа ШХ15 с образцом. С другой стороны, сравнение функций $P(H)$ (см. рис. 6) для стали ШХ15 (сплошная линия) и НСт (штриховая линия) показывает в случае НСт существенно меньший вклад от α -Fe

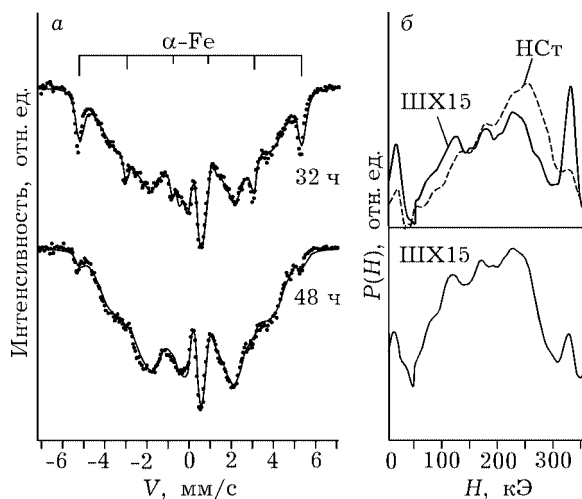


Рис. 6. Мёссбауэровские спектры (а) и функции $P(H)$ (б) смеси Fe(68)/Si(32), механически сплавленной с использованием стали ШХ15. Штриховая линия – $P(H)$ для этой смеси при использовании нержавеющей стали.

и сдвиг широкого распределения функции $P(H)$ в область больших значений СТМП. При значении $Dm/m_0 = 15\%$ и $t_{\text{сп}} = 32$ ч можно утверждать, что продукты износа НСт интенсивно участвуют в процессе механического сплавления с образцом, понижая эффективную атомную долю Si с 32 % в исходной смеси до 24 % в механически сплавленном образце.

Тем не менее из рис. 6 видно, что увеличение $t_{\text{сп}}$ до 48 ч приводит и при использовании ШХ15 к резкому уменьшению вклада от α -Fe. При $Dm/m_0 = 15\%$ (см. рис. 1, б) можно сделать вывод о начале процесса механического сплавления стали ШХ15 с исследуемым образцом.

Система Fe–C

Механическое сплавление образцов Fe(68)/C(32) демонстрирует, что в присутствии некоторых элементов (C) шары и сосуд из стали ШХ15 также могут подвергаться значительному износу (см. рис. 1, в), а продукты износа принимать участие в механическом сплавлении. Детальные данные рентгеноструктурных и мёссбауэровских исследований опубликованы в нашей работе [9].

На рис. 7 приведены мёссбауэровские спектры и функции $P(H)$ образцов Fe(68)/C(32) после 4, 12 и 32 ч механической обработки. После четырехчасовой обработки в образце

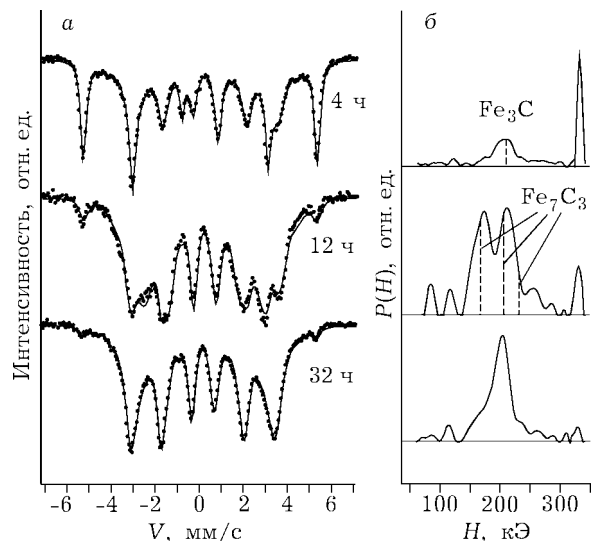


Рис. 7. Зависимость мёссбауэровских спектров (а) и функции $P(H)$ (б) смеси Fe(68)/C(32) от времени механического сплавления с использованием стали ШХ15.

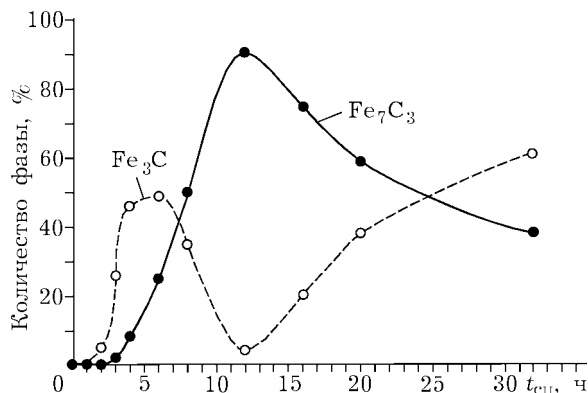


Рис. 8. Эволюция содержания карбидов Fe_3C и Fe_7C_3 в смеси Fe(68)/C(32) в зависимости от времени механического сплавления с использованием стали ШХ15.

присутствуют в основном $\alpha\text{-Fe}$ и карбид Fe_3C (цементит), после 12-часовой основная компонента соответствует карбиду Fe_7C_3 , а после 32-часовой в качестве основной компоненты проявляется снова карбид Fe_3C . Временные зависимости содержания карбидов приведены на рис. 8. Их сравнение с зависимостью Dm/m_0 от $t_{\text{спл}}$ (см. рис. 1, в) приводит к выводу, что при $t_{\text{спл}} \approx 12$ ч результаты выполненных исследований отражают процессы, происходящие в основном в исходной смеси. Однако резкая убыль непрореагировавшего $\alpha\text{-Fe}$ с 30 до 4 % (при $t_{\text{спл}} = 8\text{--}12$ ч) и значительные $Dm/m_0 = 12$ % (см. рис. 1, в) указывают на механическое сплавление продуктов износа ШХ15 с образцом. В случае образования карбида Fe_7C_3 (атомная доля С 30 %) дополнительное количество железа из стали ШХ15 способствовало понижению эффективной атомной доли углерода в смеси с 32 до 30 %. Поэтому при $t_{\text{спл}} = 12$ ч содержание этого карбида составило почти 100 %.

Однако наблюдаемое обратное превращение $\text{Fe}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ при $t_{\text{спл}} > 12$ ч не имеет никакого отношения к процессам механического сплавления в системе Fe–C при атомном соотношении 68 : 32, а является результатом механического сплавления карбида Fe_7C_3 с продуктами износа шаров и сосуда из стали ШХ15.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения достоверной информации о микроскопических механизмах твердофазных реакций при механическом сплавлении требуется тщательный учет многочисленных

факторов, которые могут повлиять на протекание твердофазных реакций (среда, температура и т. д.). Среди них особое место занимает износ измельчающих тел (сосуда и шаров для шаровых планетарных мельниц), так как продукты износа также могут принимать участие в твердофазных реакциях и тем самым искажать реальную картину их механизмов.

Приведенные примеры механического сплавления железа с *zr*-элементами (Si и C) показывают, что в каждом конкретном случае требуется комплексное использование экспериментальных методов, для того чтобы сделать выводы о влиянии продуктов износа измельчающих тел. Тем не менее можно сделать ряд практически важных выводов, имеющих общий характер.

Из рассмотренных материалов (карбид вольфрама, нержавеющая сталь, упрочненная сталь ШХ15) наиболее износостойкой и менее склонной взаимодействовать с исследуемым образцом является сталь ШХ15 с массовыми долями С и Cr 1 и 1.5 % соответственно.

Первый этап изучения процессов механического сплавления должен заключаться в тщательных гравиметрических измерениях массы измельченного образца, сосуда и шаров до и после измельчения. Как показывает опыт авторов, для получения достоверной информации изменение массы образца не должно превышать 10 %.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 00–03–32555 и 01–02–96463).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Е. П. Yelsukov, G. A. Dorofeev, V. A. Barinov *et al.*, *Mater. Sci. Forum*, 269–272 (1998) 151.
- 2 Е. П. Yelsukov, E. V. Voronina, G. N. Konygin *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, 166 (1997) 334.
- 3 J. Balogh, L. Bujdoso, D. Kaptas *et al.*, *Mater. Sci. Forum*, 269–272 (1998) 63.
- 4 Г. А. Дорофеев, А. Л. Ульянов, Е. П. Елсуков, *ФММ*, 91 (2001) 47.
- 5 Е. П. Елсуков, Г. А. Дорофеев, Г. Н. Кобыгин и др., Там же, 3 (2002) в печати.
- 6 Е. П. Елсуков, В. А. Баринин, Г. Н. Кобыгин, *Металлофизика*, 11 (1989) 52.
- 7 Е. П. Елсуков, Г. Н. Кобыгин, Е. В. Воронина, Там же, 12 (1990) 75.
- 8 V. M. Fomin, E. V. Voronina, E. P. Yelsukov, A. N. Devy, *Mater. Sci. Forum*, 269–272 (1998) 437.
- 9 Г. А. Дорофеев, Е. П. Елсуков, В. М. Фомин и др., *ФХОМ*, 5 (2001) 71.