

УДК 539.213.536

DOI: 10.15372/KhUR20160216

Структурообразование в системе сталь – медь

Л. И. КВЕГЛИС¹, Ф. М. НОСКОВ¹, А. А. КАЛИТОВА², А. К. АБКРЯН¹¹Сибирский федеральный университет,
проспект Свободный, 79/10, Красноярск 660041 (Россия)

E-mail: kveglis@list.ru

²Восточно-Казахстанский государственный университет,
ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск 070002 (Республика Казахстан)

Аннотация

На примере стали и меди рассмотрены процессы структурообразования, протекающие в условиях интенсивной пластической деформации, которая инициируется различными видами динамического нагружения в зоне контакта разнородных металлов. Показано, что интенсивная пластическая деформация способствует повышению взаимной растворимости металлов друг в друге и образованию атомно-упорядоченных фаз. В случае сверхвысоких давлений образование атомно-упорядоченных фаз не зафиксировано. Это связано с тем, что свободный атомный объем в жидкой фазе, образующийся в кумулятивной струе, превышает свободный объем при твердофазном взаимодействии. Множество моделей структурообразования в градиентных условиях могут быть объединены в рамках схемы “сдвиг – поворот”.

Ключевые слова: пластическая деформация, сталь (Fe), медь, неравновесные твердые растворы, атомно-упорядоченные фазы, волны пластической деформации

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования процессов структурообразования при совместной пластической деформации образцов стали и меди обусловлена широким применением этой комбинации металлов в различных областях промышленности. Например, биметаллическая сталемедная проволока производится по технологии, которая основана либо на твердофазном соединении стального сердечника с медной оболочкой [1], либо на протягивании стального сердечника через медный расплав [2].

Закономерности совместного пластического деформирования металлов во взаимосвязи со свойствами получаемых соединений разнородных металлов изучены недостаточно. Авторы [3] сделали подробный обзор работ, посвященных механохимическому синтезу пересыщенных твердых растворов в системе “железо – медь”. Отмечается, что при использовании механохимических методов могут формировать-

ся твердые растворы с неравновесной концентрацией компонентов. Однако в [3] не рассмотрена возможность упорядочения этих неравновесных твердых растворов под действием динамических нагрузок при температурах не выше 600 °С.

Структурообразование при совместной пластической деформации двух разнородных металлов может быть связано с аномально быстрыми диффузионными процессами, которые, по-видимому, обусловлены движением волн пластической деформации [4, 5]. В этих волнах происходит изменение молярного объема в зонах высокой концентрации напряжений [5]. В случае изменения молярного объема могут создаваться условия для переключения химических связей между атомами благодаря возникновению новых разрешенных структурных состояний в условиях локальной кривизны кристаллической решетки [5–7]. В работах [8, 9] развита модель возбужденных атомов, основанная на домини-

рующей роли критических смещений возбужденных атомов. С этих позиций проведен анализ процессов твердофазного взаимодействия стали и меди.

Цель работы – исследование структурообразования в зоне контакта сталь – медь в различных условиях динамических нагрузок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Механическое взаимодействие стальных и медных образцов осуществляли путем приложения к образцам давления различной величины. Рабочей гипотезой была идея улучшения взаимодействия стали и меди с увеличением давления.

Проведены три эксперимента.

1. Диск из низкоуглеродистой стали диаметром 60 мм и толщиной 10 мм соединяли с аналогичным медным диском и подвергали совместному ударному нагружению в паровоздушном молоте. Деформация осадки составила 73 %. Стальной и медный диски отделяли друг от друга и исследовали поверхности контакта.

2. Сваривали взрывом плоские заготовки из меди марки М1 и низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм. Исследовали переходную зону железо–медь сварного соединения.

3. Стержень из низкоуглеродистой стали подвергали воздействию кумулятивной струи, полученной при взрыве медного кумулятивного снаряда по методике, описанной в [10, 11]. В результате кумулятивная струя проходила через стальной стержень вдоль его продольной оси, образуя внутри него полость конической формы. Затвердевшие капли этой струи извлекали из полости стержня, а из стенки полости вырезали темплеты.

Поверхности и состав разделенных стального и медного дисков в первом эксперименте и микроструктуру сварного соединения во втором исследовали с помощью оптического микроскопа ММР-4 и сканирующего электронного микроскопа JSM-7001F с микроанализатором. Структуру и состав застывших капель кумулятивной струи, край темплетта, вырезанного из стенки со стороны полости, исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV с микроанализатором.

Фазовый состав всех образцов определяли методом дифракции рентгеновских лучей с использованием дифрактометра Bruker (CuK_α -излучение).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Совместная пластическая деформация стали и меди

При совместной пластической деформации медного и стального дисков за счет микрошероховатости образцов возникают зоны точечного контакта со значительным изменением удельного объема.

Поверхности медного и стального дисков после твердофазного взаимодействия исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа. Перед началом осадки диски отполировали. После отделения деформированных стального и медного диска друг от друга наблюдалась самоорганизация структуры поверхности на мезоуровне вдоль выделенных направлений в зоне контакта дисков [10]. На интерфейсе сталь – медь прослеживается регулярное распределение неоднородностей, образованных новыми фазами, что обусловлено самоорганизацией, т. е. согласованным поведением на интерфейсе выделений

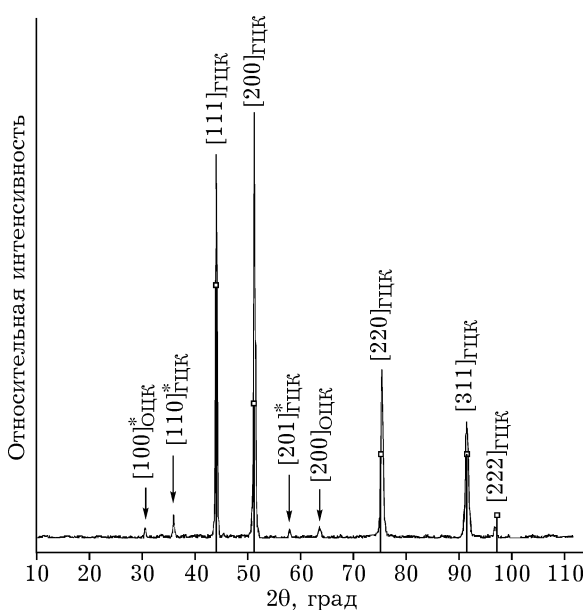


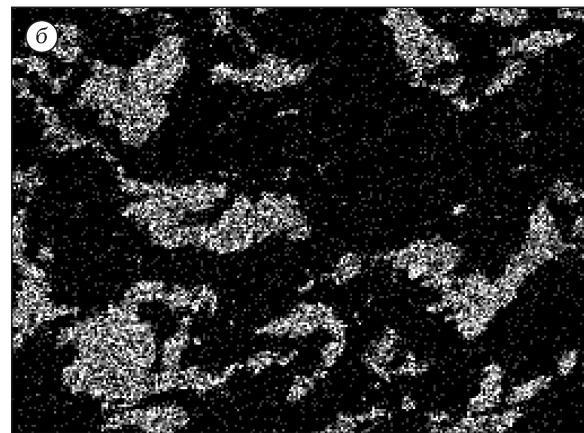
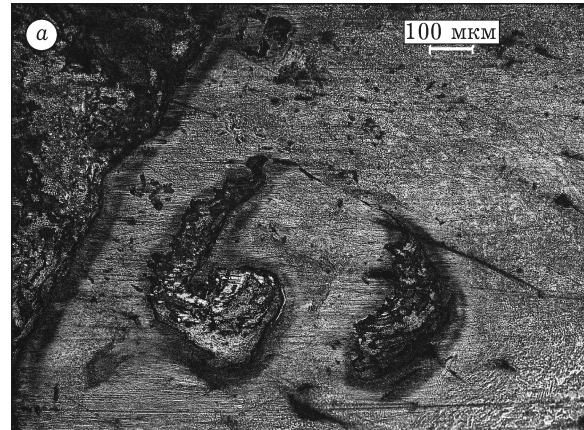
Рис. 1. Совмещенная картина рентгеновской дифракции, полученная от пластинки меди после твердофазного взаимодействия со стальным образцом, и рефлексы Cu (вертикальные метки согласно ASTM).

железа и меди. Выявленные неоднородности на поверхностях проанализированы с помощью энергодисперсионного метода. Анализ химического состава поверхности медного диска показал, что неоднородности на его поверхности значительно обогащены железом и другими компонентами из стального образца [10].

Для выяснения возможности протекания твердофазных реакций между медным и стальным образцами обе поверхности исследовали методом РФА. На рис. 1 приведены рентгенограмма, полученная с поверхности медного образца, и табличные рефлексы чистой меди, выбранной в качестве эталона. Видно, что образуется текстура с осью зоны [200]. Рефлекс от плоскостей (111), который должен быть самым интенсивным (см. эталонные метки), имеет меньшую интенсивность по сравнению с рефлексом от плоскостей (200) (рис. 2). Такое перераспределение возможно, когда под действием механической нагрузки зерна испытывают деформацию по схеме “сдвиг – поворот” [12], приводящую к возникновению текстуры.

Кроме того, обнаружены слабые структурные рефлексы, характерные для фаз ОЦК Fe–Cu, которые существуют наряду с фазами ГЦК Cu–Fe [10].

На рис. 1 хорошо видно, что рефлексы (111) и (200) сместились навстречу друг другу, в то время как рефлекс (222) смещен относительно рефлекса меди в сторону увеличения параметра решетки. Подобное смещение рефлексов наблюдалось для системы Fe–Cu в работе [13] и объяснялось возникновением значительного количества дефектов упаковки, что мо-



CuL_α1,2

Рис. 2. Изображение, полученное с помощью оптического микроскопа с медного участка в переходной зоне медь – сталь (а); СЭМ-изображение стального участка вблизи переходной зоны медь – сталь в режиме картирования в лучах меди (б).

жет указывать на возникновение текстуры в результате кооперативных смещений атомов.

Структурная самоорганизация на мезомасштабном уровне, наблюдаемая на поверхнос-

ТАБЛИЦА 1

Результаты расчета картины рентгеновской дифракции (см. рис. 1)

Угол, 2θ	Индексы <i>hkl</i> , ОЦК	Индексы <i>hkl</i> , ГЦК	<i>d</i> ОЦК, Å	<i>d</i> ГЦК, Å
31°48′	100*		2.868	
37°18′		110*		2.542
43°20′		111		2.087
50°48′		200		1.798
58°12′		201*		1.594
63°36′	200		1.461	
74°36′		220		1.271
90°48′		311		1.083
96°36′		222		1.032

тах отделенных друг от друга дисков, и ориентированная перекристаллизация, которая приводит к образованию текстуры (см. рис. 1), возможны благодаря аномально быстрому массопереносу в зонах концентрации пластической деформации.

Наряду со структурными рефлексам в обеих фазах появились сверхструктурные рефлексы (см. табл. 1): для фазы ГЦК Cu–Fe это рефлексы [110] и [201]; для фазы ОЦК Fe–Cu рефлекс [100]. Их появление соответствует возникновению атомно-упорядоченных структур меди с железом, как на основе ГЦК решетки меди, так и на основе ОЦК решетки железа.

Таким образом, пластическая деформация инициирует самоорганизацию на микроуровне в виде атомного упорядочения и самоорганизацию микроструктуры на мезоуровне в виде формирования текстуры.

Сварка взрывом железа и меди

Давление при формировании сварного соединения железо – медь сваркой взрывом достигало 6–8 ГПа, что в несколько раз превышает давление, возникающее при совместной пластической деформации стального и медного дисков в паровоздушном молоте.

При проведении исследований с помощью оптического микроскопа выявлено активное механическое перемешивание меди и стали (см. рис. 2). В меди наблюдались крупные включения стали, размерами до 300 мкм. Аналогичные результаты получены при исследованиях на растровом электронном микроскопе. На отдельных стальных участках обнаружены многочисленные включения меди размерами до 200 мкм (см. рис. 2).

Исследование энергодисперсионных спектров с однородных участков железной и медной части сварного соединения показало, что растворимость меди в железе достигла 5.5 %, а железа в меди – примерно 7 %.

Согласно современным представлениям, поверхностный слой твердого тела принято классифицировать как особое состояние вещества [14]. Характерной особенностью кристаллической структуры поверхностного слоя является наличие многочисленных нарушений кристаллического строения. Как следствие,

сдвиговая устойчивость поверхностного слоя оказывается более низкой по сравнению с объемом кристалла, и пластическое течение в деформируемом твердом теле с самого начала нагружения развивается более интенсивно в его поверхностных слоях. Избыточная (по сравнению с объемом кристалла) деформация поверхностного слоя при сварке взрывом обуславливает его гофрирование и появление на поверхности деформируемого образца складчатой структуры. Сильно выраженная кривизна в складках становится источником возникновения концентраторов напряжений, которые генерируют в поверхностном слое деформационные дефекты, уходящие в объем материала [14] (см. рис. 2).

Для выявления возможности протекания твердофазных реакций между медным и стальным образцами при сварке взрывом сварное соединение исследовано методом РФА. Луч фокусировали на медной части в

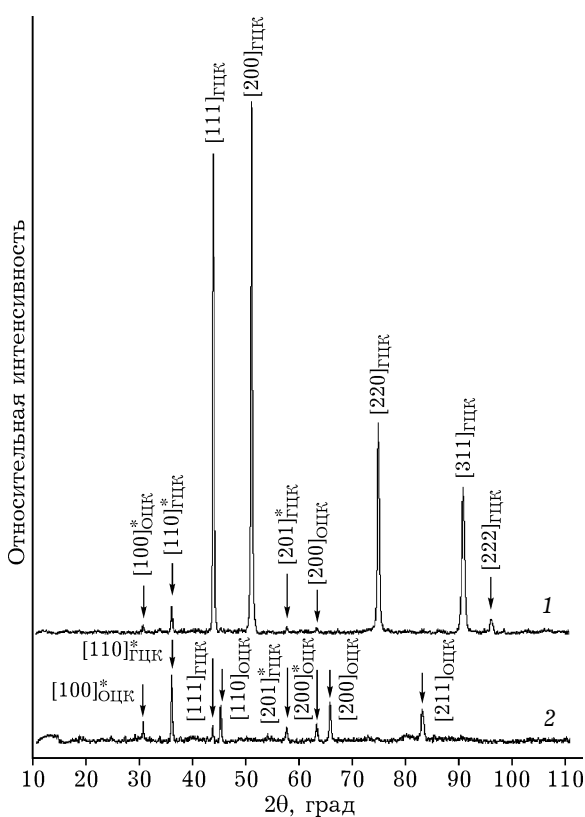


Рис. 3. Совмещенная картина рентгеновской дифракции, полученная с медной (1) и со стальной (2) частей сварного соединения.

ТАБЛИЦА 2

Результаты расшифровки картин рентгеновской дифракции, полученных от железной и медной частей сварного соединения (см. рис. 3)

Угол, 2 θ	Индексы hkl , ОЦК	Индексы hkl , ГЦК	d ОЦК, Å	d ГЦК, Å
Железная часть				
30°28'	100*		2.940	
35°42'		110*		2.535
43°30'		111		2.103
50°24'		200		1.810
57°12'		201*		1.615
62°31'	200		1.488	
74°29'		220		1.272
89°54'		311		1.095
95°25'		222		1.042
Медная часть				
30°46'	100*		2.899	
35°31'		110*		2.542
43°00'		111*		2.103
44°42'	110		2.031	
53°26'		200*		1.733
57°06'		201*		1.669
62°28'	200*		1.492	
65°02'	200		1.434	
82°16'	211		1.172	

зоне сварного соединения, а затем смещали на стальной участок.

Рентгенограммы исследованных участков приведены на рис. 3. Сравнительный анализ данных рис. 1 и 3 показал, что в случае сварки взрывом количество атомно-упорядоченных фаз со структурой ГЦК Cu–Fe и ОЦК Fe–Cu значительно возросло. Взаимная растворимость обоих металлов увеличилась, о чем свидетельствуют смещенные дифракционные рефлексы на рентгенограммах. Например, рефлекс [100] для ОЦК-железа смещен в сторону увеличения параметра решетки, что подтверждает рост количества растворенной меди в решетке ОЦК железа (табл. 2).

В табл. 2 приведены расшифровки дифрактограмм, полученных с разных участков сварного соединения. Видно, что с увеличением давления растет количество атомно-упорядоченных фаз и повышается взаимная растворимость меди и железа.

Обнаружено, что при сварке взрывом эффекты взаимной растворимости меди в железе

и железа в меди, а также образование атомно-упорядоченных фаз усиливаются по сравнению с экспериментом в паровоздушном молоте.

Эксперимент с кумулятивной струей

По энергетическим условиям образования продукта реакции сварка взрывом занимает промежуточное положение между твердофазным взаимодействием и кумулятивной струей. Для обеспечения большей взаимной растворимости и атомного упорядочения при увеличении давления исследуем поведение меди и железа при воздействии медной кумулятивной струи на стальной стержень.

Согласно [11], температура кумулятивной струи обычно не превышает 600 °С, в то время как давление достигает порядка 30 ГПа.

Анализ энергодисперсионных спектров показал, что на внутренней поверхности полости в стальном стержне присутствует медь

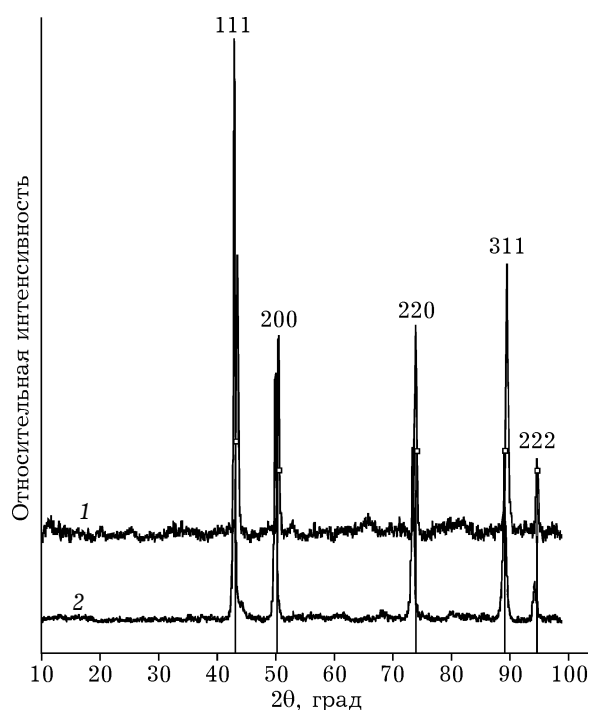


Рис. 4. Совмещенная картина рентгеновской дифракции, полученная со стенок полости стержня (1), от затвердевшей капли из кумулятивной струи (2), а также рефлексы Cu согласно ASTM.

(5 %), образованная медной кумулятивной струей.

Установлено, что рентгенограммы от стенки полости и от застывшей капли кумулятивной струи соответствуют ГЦК решетке (рис. 4). Параметры этих решеток незначительно отличаются друг от друга.

В табл. 3 представлены результаты расчета дифракционных картин, полученных от стенки полости и капли, а также данные таблиц ASTM для чистой меди и γ -железа при комнатной температуре [15]. Очевидно, что на стенке полости происходит образование твердого раствора замещения меди в железе, а в капле – железа в меди.

ТАБЛИЦА 3

Параметры ГЦК решеток меди и железа, полученные при расчете дифракционных картин в эксперименте с кумулятивной струей

Материалы	a , Å
Стенка полости стержня, эксперимент	3.589
γ -Fe [15]	3.581
Застывшая капля, эксперимент	3.627
Cu, таблица ASTM	3.615

Таким образом, за счет взаимодействия кумулятивной струи меди с твердой сталью в условиях высокого давления существенно (в несколько раз) повышается растворимость железа в меди и меди в железе.

Интересно, что зафиксированные новые твердые растворы сохранили тип кристаллической решетки ГЦК, присущей как меди, так и аустенитной фазе железа. Очевидно, высокое давление стабилизировало высокотемпературную фазу железа [16]. Кроме того, повышенное количество растворенной в аустените меди, вероятно, препятствует превращению фазы с кристаллической решеткой ГЦК (неравновесной при комнатной температуре в углеродистой стали) в равновесную фазу с решеткой ОЦК железа. Такая структура при комнатной температуре не соответствует равновесной фазовой диаграмме.

Таким образом, несмотря на высокое давление, химические соединения железа с медью в кумулятивной струе не образуются. Напротив, в эксперименте с дисками и сварки взрывом при значительно меньших давлениях (как минимум на порядок) протекает механохимическая реакция с образованием атомно-упорядоченных твердых растворов железа и меди.

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРООБРАЗОВАНИИ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Механохимические процессы с образованием новых фаз реализуются в области активационного объема, ограниченного критическими расстояниями. В модели пластической деформации, предложенной в [17], роль элементарного сдвига играет критическое смещение возбужденного атома.

Одна из наиболее интересных моделей перемещения атомов под нагрузкой – модель сдвиговой трансформационной зоны (СТЗ), предложенная Лангером [18].

Возникновение и перемещение зоны объясняется образованием уплотненных и разреженных областей в металле, приводящих к взаимному смещению атомов и их повороту. Авторам [18] удалось показать, что макроскопическая деформация является результатом микроскопических сдвигов за счет коопе-

ративного движения атомов в мезоскопических областях. Кооперативное движение осуществляется путем прохождения волны пластической деформации, сопровождающейся переключением химических связей. Вероятность переключения связей определена формулой

$$R_{\pm} = R_0 e^{\pm \alpha \sigma / P}$$

где R_{\pm} – вероятность переключения химических связей в двух противоположных направлениях; R_0 – коэффициент, характеризующий вещество; α – коэффициент внутреннего трения; σ – локальная нагрузка в мезоскопической области; P – внешнее давление [18].

Эта формула согласуется с положениями, выдвинутыми в работах В. Е. Панина и В. В. Болдырева [4, 5, 12, 14]. Первый использует автоволновой процесс для объяснения корреляций в кооперативном движении атомов, создаваемом автоволнами локализации пластической деформации. В очагах локализации пластической деформации есть вероятность возникновения новой фазы благодаря изменению молярного объема.

Томпсон [19] предложил модель “сдвиг – поворот” на атомистическом уровне под действием нагрузки. Вариантом схемы “сдвиг – поворот” в мезоскопическом масштабе является так называемая “вращательная диффузия” в плоскости [20]. Идея ее состоит в том, что при пластической деформации группы зерен в определенной области испытывают поворот относительно исходного состояния. При этом зерна поворачиваются относительно друг друга, что и приводит к общему сдвигу. Показано [20], что зернограничный сдвиг и миграция границ зерен обеспечивают пластическое течение.

Автор [21] одним из первых предложил схему “сдвиг – поворот” для описания движения элементов субструктуры на мезоскопическом уровне в процессе пластической деформации. Именно такие процессы приводят к формированию характерной микроструктуры соединений, полученных сваркой взрывом [22], где равноосные зерна соседствуют с вытянутыми, вследствие пластической деформации. Таким образом, отделение частиц взаимодействующих материалов и их взаимный перенос на значительные расстояния можно объяснить с помощью теории пла-

стической деформации, описывающей протекающие процессы как взаимодействие мезообъемов (групп зерен, поверхностей) в условиях кратковременных и интенсивных нагрузок. Согласно теории [5], в зоне кривизны кристаллической решетки могут возникать новые структурные состояния в потенциальном поле системы частиц, которые имеют собственную полосу энергетических состояний в электронно-энергетическом спектре. Это обуславливает метастабильность деформационных дефектов и структур различного типа.

Сравнительный анализ результатов трех экспериментов (совместная осадка с помощью паровоздушного молота, сварка взрывом и взаимодействие медной кумулятивной струи со стальным стержнем) показывает, что в первом случае в ходе механохимических реакций образуется небольшое количество атомно-упорядоченных фаз Cu–Fe и Fe–Cu. Во втором случае количество атомно-упорядоченных фаз значительно выше, что можно связать с увеличением приложенной нагрузки. В случае кумулятивной струи нагрузка на стальной стержень превышала нагрузку при сварке взрывом в несколько раз. За счет взаимодействия двух металлов повысилась их взаимная растворимость, но продукты механохимических реакций не обнаружены.

Исследуя процессы, протекающие при твердофазном взаимодействии стального и медного дисков, необходимо иметь в виду, что высокие давления приводят к существенным изменениям фазовых диаграмм сплавов. В частности, может смещаться критическая температура фазового превращения порядок – беспорядок, расширение области существования фаз, возможно возникновение фаз, не стабильных при нормальных условиях [23]. При анализе процессов структурообразования, протекающих в неравновесных условиях, необходимо учитывать направление и длину межатомной связи.

При рассмотрении структуры, реакционной способности и свойств соединений используется понятие “химическая связь”. Изучение общих правил образования химических связей основано на методе молекулярных орбиталей, который использует квантово-механический подход для объяснения существования связующей и разрыхляющей орби-

талей при описании внутримолекулярного межатомного взаимодействия [24].

Согласно Гилману [25], общий механизм механохимической реакции можно объяснить с помощью метода молекулярных орбиталей. Так, деформации сдвига способствуют увеличению энергий связывающих их орбиталей и уменьшению энергии разрыхляющих орбиталей [26]. В результате размер энергетического промежутка в спектре энергии связи уменьшается, дестабилизируя таким образом систему. Когда энергетический промежуток становится равным нулю, электроны связи становятся делокализованными, поскольку могут находиться в состоянии разрыхляющих связей, не расходуя энергии, т. е. материал становится изотропным. Таким образом, энергия активации реакции может обращаться в нуль [27]. Вопрос о том, каким будет продукт реакции, определяется не только энергией активации, но и геометрическим фактором, который зависит от расстояний между атомами и углов между направлениями химических связей.

При пластической деформации мы наблюдаем текстуру и изменение параметра решетки фазы на основе железа. Подобные явления описаны в [13] при совместной пластической деформации Cu-Fe в шаровой мельнице и объясняются значительным ростом количества дефектов упаковки. Мы считаем, что в подобных экспериментах бессмысленно говорить о дефектах упаковки, поскольку при интенсивной пластической деформации в зонах концентрации напряжений возникает большое количество дефектов различного типа и механизм пластической деформации изменяется. Последний может измениться в зависимости от внешнего напряжения. Генерация дефектов как проблема самоорганизации системы под влиянием внешнего потока энергии исследована в [28]. Автор считает, что существует предельная внешняя нагрузка, по достижении которой в твердотельной наноструктуре происходит скачкообразная перестройка механизма поглощения энергии. Структура вещества при таких необратимых изменениях соответствует жидкой фазе.

В кумулятивной струе реализуется ситуация, когда атомы свободно перемещаются,

находясь в жидкой фазе в так называемом надбарьерном состоянии. Согласно Зельдовичу [29], в этом состоянии, когда энергия, переданная материалу, превышает энергию активации реакции, может происходить свободное переключение химических связей. В жидкости дискретных углов и межатомных расстояний не реализуется, поэтому мы видим только расширение области растворимости двух практически нерастворимых компонентов – меди и железа. В результате кратковременности приложения нагрузки мы фиксируем при нормальных условиях неравновесные состояния (железо с ГЦК решеткой).

ВЫВОДЫ

1. Исследованы процессы структурообразования на границе раздела практически не растворимых друг в друге компонентов (железа и меди) при различных условиях приложения динамической нагрузки.

2. Обнаружено, что при взаимодействии твердофазных образцов стали и меди, подвергнутых совместной осадке и сварке взрывом, могут формироваться продукты механохимических реакций с атомно-упорядоченной структурой, отличной от структуры исходных компонентов.

3. Установлено, что при взаимодействии медной кумулятивной струи со стальным стержнем формируются твердые растворы на основе ГЦК решеток меди и железа в более широких пределах, чем это возможно по диаграмме фазовых равновесий, без образования атомно-упорядоченных фаз. Это связано с тем, что свободный атомный объем в жидкой фазе превышает свободный объем в случае твердофазного взаимодействия.

4. Проанализированы условия возникновения новой фазы как результата прохождения механохимической реакции. Показано, что множество моделей структурообразования в градиентных условиях могут быть объединены в рамках схемы “сдвиг – поворот” на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях.

Авторы благодарят Матросова А.Д. (Институт гидродинамики СО РАН) за любезно предоставленные образцы и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 С. Ф. Рашников, Ю. А. Щербо, И. В. Ситников // Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та. 2006. № 4. С. 52–54.
- 2 Вдовин К. Н., Кольга М. А. // Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та. 2010. № 4. С. 33–35.
- 3 Григорьева Т. Ф., Баринаева А. П., Ляхов Н. З. // Усп. химии. 2001. Т. 70, № 1. С. 52–71.
- 4 Болдырев В. В. // Усп. химии. 2006. Т. 75, № 3. С. 203–216.
- 5 Панин В. Е., Егорушкин В. Е. // Физ. мезомеханика. 2013. Т. 16, № 3. С. 7–26.
- 6 Моисеенко Д. Д., Панин В. Е., Елсукова Т. Ф. // Физ. мезомеханика. 2013. Т. 16, № 3. С. 81–93.
- 7 Gilman J. // Science. 1996. Vol. 274. P. 65.
- 8 Баинова А. Б. Особенности релаксационных процессов в макроскопически неоднородных и аморфных материалах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 2004. 118 с.
- 9 Бутягин Л. Ю. // Усп. химии. 1984. Т. LIII (11). С. 1769–1789.
- 10 Абылкалькова Р. Б., Квеглис Л. И., Носков Ф. М. // Изв. вузов. Черн. металлургия. 2012. № 10. С. 52–56.
- 11 Швецов Г. А., Матросов А. Д. // Прикладная механика и техническая физика. 2004. № 2. С. 147–155.
- 12 Панин В. Е., Егорушкин В. Е. // Физ. мезомеханика. 2008. Т. 11, № 2. С. 9–30.
- 13 Калашкин С. Д., Томилин И. А., Шелехов Е. В., Чердынцев В. В., Андрианов Г. А., Балдохин Ю. А. // ФММ. 1997. Т. 84, № 3. С. 68–76.
- 14 Панин В. Е., Панин А. В. // Физ. мезомеханика. 2005. Т. 8, № 5. С. 7–15.
- 15 Pepperhoff W. // Phys. Rev. B. 1994-I. March. P. 6012.
- 16 Орленко Л. П. Физика взрыва и удара. М.: Физматлит, 2006. 304 с.
- 17 Сандитов Д. С., Бадмаев С. С., Цыдыпов Ш. Б., Сандитов Б. Д. // Физ. и хим. стекла. 2003. Т. 21, № 1. С. 5–11.
- 18 Falk M. L., Langer J. S. // Phys. Rev. 1998. Vol. E57. P. 7192–7204.
- 19 Томпсон Д. М. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985. 289 с.
- 20 Joshi S. P., Ramesh K. T. // Acta Mater. 2008. Vol. 56, Issue 2. P. 282–291.
- 21 Панин В. Е. // Физ. мезомеханика. 1999 (2). № 6. С. 5–23.
- 22 Калитова А. А., Квеглис Л. И., Носков Ф. М., Ларионов Н. В., Семенников И. С. // Фунд. пробл. совр. материаловед. 2014. Т. 11, № 3. С. 285–289.
- 23 Портной К. И., Богданов В. И., Фукс Д. Л. Расчет взаимодействия и стабильности фаз. М.: Металлургия, 1981. 248 с.
- 24 Бердетт Дж. Химическая связь. М.: Мир, 2008. 245 с.
- 25 Gilman J. Electronic Basis of the Strength of Materials. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. 291 p.
- 26 Gilman J. // Czech. J. Phys. 1995. Vol. 45. P. 913.
- 27 Gilman J. // Philos. Mag. B. 1997. Vol. 71. P. 1057.
- 28 Головнев И. Ф., Головнева Е. И., Мерзиевский Л. А., Фомин В. М. // Физ. мезомеханика. 2013. Вып. 16, № 3. С. 35–43.
- 29 Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008. 656 с.

