УДК 669.14:539.213.536

Л.И. Квеглис¹, Ф.М. Носков¹, В.В. Казанцева¹, Р.Б. Абылкалыкова², А.А. Калитова², М.Н. Волочаев³

¹Сибирский федеральный университет (г. Красноярск)

² Восточно-Казахстанский государственный университет им С. Аманжолова (г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан) ³ Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева (г. Красноярск)

АНОМАЛЬНО БЫСТРАЯ МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ ВЕЩЕСТВА*

В настоящее время нет общепринятых представлений, объясняющих необыкновенно высокие скорости физико-химических превращений в ударных волнах. По мнению авторов работ [1 – 4] с повышением давления диффузионные процессы, как правило, замедляются. Однако авторами работы [5] показано, что скорость твердофазных реакций с повышением давления увеличивается. Обычные механизмы появления новой фазы (возникновение и рост зародышей), по их мнению, в ударных волнах работать не могут из-за крайней кратковременности процесса. Если для образования новых фаз в статических экспериментах требуется время, исчисляемое секундами, минутами, а иногда часами и более, то в ударных волнах эти процессы завершаются за время порядка 10⁻⁵ – 10⁻⁷ с [6]. На практике размеры частиц новой фазы могут достигать десятых долей миллиметра и более [6, 7]. Обычный механизм диффузии, предложенный в работах [6, 7], не может привести к образованию частиц новой фазы в таких условиях. Считается [6], что с помощью экспериментов со сверхвысокими статическими давлениями в сочетании со сдвигом сдавленного образца можно найти механизм аномально быстрой диффузии. Тем не менее действием одних высоких давлений, возникающих в ударной волне, нельзя объяснить громадное увеличение скорости процессов диффузии, наблюдаемых в эксперименте. Требуется учитывать скорость распространения нагрузки.

В работе [8] предлагается модель распространения сдвиговой трансформационной зоны (СТЗ). Сдвиговой трансформационной зоной названа область перегруппировки частиц на локальном, мезоскопическом уровне. Возникновение и перемещение этой зоны объясняется возникновением уплотненных и разреженных областей в металле, приводящим к взаимному смещению атомов и их повороту. Ширина этой зоны порядка нескольких межатомных расстояний. В теории СТЗ скорости нелинейно зависят от напряжения. Поскольку в сдвиговой зоне имеется фронт сжатия, за ней следует область растяжения; это области, состоящие из возбужденных атомов, т.е. атомов, между которыми устанавливается критическое расстояние, отличающееся от среднего межатомного расстояния. Перемещения атомов на критические расстояния приводят к формированию свободного объема. Активационный свободный объем обеспечивает высокую скорость массопереноса при описании превращений в металлических стеклах [8]. В таких условиях происходят образование краудионных комплексов, перемещение которых происходит с переключением химических связей [9]. По оценке авторов работы [9] время переключения химических связей в твердом теле составляет 10⁻¹¹ – 10⁻¹³ с.

Целью настоящей работы является исследование процессов структурообразования в образцах стали 110Г13Л, подвергнутых воздействию ударных нагрузок, и объяснение происходящих процессов с позиции теории сдвиговой трансформационной зоны.

Образцы стали 110Г13Л были подвергнуты ударному нагружению в маятниковом копре с целью определения ударной вязкости (на АО «Востокмашзавод»). Образцы с наибольшей (около 300 Дж/см²) ударной вязкостью имели неоднородную структуру зоны разрыва. После удара такие образцы приходилось доламывать, формируя тем самым зону отрыва. Соответственно, зона отрыва была зоной максимальной деформации. Различные области излома таких образцов исследовали в сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA.

На рис. 1 представлены изображения поверхности излома стали 110Г13Л с ударной вязкостью более 300 Дж/см². В зоне разрушения, полученной от удара маятника копра (рис. 1, *a*), формируется хрупкий излом, в котором на поверхности отдельных кристаллитов видны небольшие кратеры, характерные для вязкого излома. В зоне отрыва этого же образца присутствуют только кратеры вязкого излома (рис. 1, δ). На дне кратеров обнаружены частицы (рис. 1, ϵ); такие частицы наблюдаются только в зонах отрыва образцов с вязким изломом.

Исследования химического состава частиц на дне кратера и стенок кратера с помощью микрозонда и энергодисперсионной приставки показали, что части-

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ АВЦП «РНПВШ» по проекту № 2.1.2/3047.



Рис. 1. Растровые электронные изображения изломов образцов стали 110Г13Л с ударной вязкостью более 300 Дж/см²: *a* – зона удара; *б* – зона отрыва; *в* – частица, образовавшаяся на дне кратера при вязком изломе

цы на дне кратеров обогащены марганцем, тогда как стенки кратера существенно обеднены марганцем. До ударного нагружения распределение компонентов в сплаве было однородным и соответствовало формуле $Fe_{86}Mn_{13}C$. На рис. 2 представлены результаты энергодисперсионного анализа, полученные от образца, структура которого показана на рис. 1, *в*. Глубина кратера на изломе составляет в среднем 15 мкм (рис. 1, *б*, *в*). Это удалось определить с помощью перефокусировки зонда сканирующего электронного микроскопа.

Полученные результаты могут свидетельствовать об аномально быстром массопереносе атомов марганца и формировании обогащенных марганцем частиц за счет обеднения марганцем стенок кратера в процессе аномально быстрого массопереноса, инициированного ударным нагружением. Проходящие процессы можно описать как восходящую диффузию. Авторами настоящей работы предлагается объяснение этого процесса с помощью модели сдвиговой трансформационной зоны: в результате прохождения СТЗ по веществу формируются частицы, обогащенные марганцем.

Согласно теории Томпсона [10] при динамической нагрузке, превышающей предел текучести материала, происходит смещение атомных плоскостей в местах локализации деформации. В результате несоразмерного смещения атомных плоскостей образуется свободный объем, в который могут смещаться атомы марганца.

На рис. 3 предлагается схема для объяснения описанного диффузионного эффекта. Показана винтовая



Рис. 2. Энергодисперсионные спектры с частицы (——) и края кратера (— —), изображенных на рис. 1, *в*

траектория движения трансформационной зоны в направлении дна кратера, где находится частица, сформировавшаяся в процессе движения атомов марганца в зонах сдвиговой трансформации, инициированных нагрузкой.

На рис. 1, б показана система конусов, сформировавшаяся в зоне отрыва. Атомы марганца могут перемещаться вдоль поверхности конуса по винтовой спирали с шагом витков, равным нескольким межатомным расстояниям. При этом атомы ближайшего окружения кооперативно смещаются и в соседних витках спирали. Общее время перемещения атома определяется числом переключений межатомных связей и временем одного переключения. По оценкам авторов это время порядка 10⁻³ с. Вне зависимости от длины и геометрических параметров пути скорость перемещения атомов определяется отношением межатомного расстояния ко времени переключения одной связи. Несложный расчет показывает, что эта скорость составляет 3,57 км/с, если межатомное расстояние a = 3,57 Å, а время одного переключения 10-13 с. Такая скорость соответствует скорости звуковой волны в металле.

В работах Мерера [11] предложена модель направленной диффузии по прямолинейным дислокацион-



Рис. 3. Модель массопереноса, поясняющая процесс формирования обогащенных марганцем частиц на дне конусообразного кратера на изломе стали 110Г13Л после ударного нагружения

ным трубам, диаметр которых составляет несколько ангстрем. При определенных условиях эта модель допускает движение атомов со скоростями, близкими к скорости звука.

Морфология кратера в зоне отрыва позволяет предположить, что его форма обеспечивается жидкоподобным состоянием области разрыва. Это хорошо соответствует модели движения сдвиговой трансформационной зоны [8]. Такая зона может перемещаться по винтовой траектории вдоль стенки кратера со скоростью, позволяющей переключать химические связи.

Подход, предложенный авторами теории СТЗ, снимает многие противоречия, которые сложились при исследовании физико-механических процессов в ударных волнах. Кооперативное движение атомов в зоне локализации деформации приводит к восходящей диффузии.

Выводы. Исследованы процессы структурообразования в образцах стали 110Г13Л, подвергнутых воздействию ударных нагрузок. Процессы структурообразования в ударных волнах объясняются с позиции теории сдвиговой трансформационной зоны, которая может быть распространена на широкий круг материалов.

Авторы благодарят П.С. Колесникова за помощь в проведении эксперимента.

УДК 669.295.69:621.793

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Tomizuka C.T. Progress in very high pressure research. 1961. P. 206.
- Dickerson R.H., Lowell R.C., Tomizuka C.T. // Phys. Rev. 1965. T. 137. № 2A. A-613.
- Свенсон К. Физика высоких давлений / Пер. с англ. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 368 с.
- Гоникберг М.Г. Химическое равновесие и скорость реакций при высоких давлениях. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 186 с.
- Позин М.Е., Гинстлинг А.М., Печковский В.А. // Журнал прикладной химии. 1954. Т. 27. С. 376 – 380.
- 6. Дремин А.Н., Бреусов О.Н. // Успехи химии. 1968. Т. 37. № 5. С. 899 915.
- 7. Кормер С.Б., Юшко К.Б., Кришкевич Г.В. // Письмав ЖЭТФ. 1966. № 2. С. 64.
- 8. Langer J.S., Lemaitre A. Dynamic Model of Super-Arrhenius Relaxation Rates in Glassy Materials // Physical Review Letters. Vol. 94. Issue 17.
- 9. Сандитов Д.С. // ДАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 209 213.
- Томпсон Д.М. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985. 60 с.
- Мерер Х., Якимов Е.Б., Аристов В.В. Диффузия в твердых телах / Пер. с англ. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 535 с.

© 2012 г. Л.И. Квеглис, Ф.М. Носков, В.В. Казанцева, Р.Б. Абылкалыкова, А.А. Калитова, М.Н. Волочаев Поступила 19 апреля 2012 г.

Н.А. Соскова¹, Е.А. Будовских¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов², С.В. Райков¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет ² Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)

ФОРМИРОВАНИЕ БЕЗДИСЛОКАЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУР В МЕТАЛЛАХ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ ЛЕГИРОВАНИИ^{*}

Прогресс в создании функциональных материалов нового поколения базируется на разработке наноструктур [1, 2]. Фундаментальные исследования в области наноструктурного материаловедения за последние 20 лет привели к необходимости существенных корректировок традиционного дислокационного подхода к объяснению прочности и пластичности [3]. И если для чистых металлов в этом направлении наметился определенный прогресс [4], то для многофазных композиций необходимы широкие теоретические и экспериментальные исследования [5].

Одно- и двухкомпонентное электровзрывное легирование (ЭВЛ) металлов и сплавов, осуществляемое

при воздействии импульсных плазменных струй на поверхность, обеспечивает высокие эксплуатационные свойства за счет образования градиентных наноструктурных состояний [6]. В частности, электровзрывное борирование, науглероживание, карбоборирование, алитирование, бороалитирование металлов и сплавов увеличивают микротвердость поверхности в 2 – 14 раз [6, 7].

Целью настоящей работы является анализ вклада дислокационных субструктур, формирующихся при одно- и двухкомпонентном ЭВЛ железа и никеля, в упрочнение поверхностных слоев.

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии [8] проанализированы системы Fe – Al, Ni – B, Ni – C, Ni – C + B, Fe – C + B, Fe – Cu, Ni – Cu, Ni – Cu + B. Методика и режимы ЭВЛ не отличались от используемых в работах [6, 7]. Электровзрывное легирование позволяет в едином технологическом

^{*} Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. (гос. контракт № 14.740.11.0813), грантами РФФИ (проекты № 11-02-91150-ГФЕН-а, № 11-02-12091-офи-м-2011) и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.