

УДК 539.219.3:53.09

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В МЕТАЛЛАХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2011 Д.В. Миронов, Т.В. Миронова, Т.Ф. Миронова

Самарская государственная сельскохозяйственная академия

Поступила в редакцию 17.06.11

Изучены изменения фазового состава и особенности распределения и миграции атомов в металлах и сплавах при электрогидроимпульсной обработке при низких температурах. Определен фазовый состав диффузионной зоны при проникновении в железо атомов никеля, алюминия, углерода и кислорода.

Ключевые слова: фазообразование в металлах, электрогидроимпульсная обработка, низкие температуры.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что импульсная пластическая деформация при низких температурах, включая криогенные, при незначительной термической активации диффузионных процессов, приводит к росту подвижности атомов и ускорению фазообразования при взаимодействии металлов с металлами и неметаллами [1, 2]. Помимо импульсной пластической деформации на ускоренное перераспределение атомов может также оказывать влияние импульсная упругая деформация [2-6]. Подобное действие импульсных упругих деформаций реализуется при электрогидроимпульсной обработке [3-5], и можно предположить, что быстро протекающая упругая деформация также приведет к ускоренному образованию фаз.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили на железе и стали марки Ст.45 с радиоактивными (^{55}Fe , ^{63}Ni , ^{14}C , ^{26}Al) и стабильными покрытиями из никеля или алюминия. Радиоактивные металлические покрытия имели толщину менее 1 мкм, а стабильные – ~ 20 мкм. Углерод вводили в приповерхностный слой цементацией в твердом карбюризаторе, создавая концентрационный профиль протяженностью до 20 мкм.

Принципиальная схема обработки металлов электрическим разрядом в жидкости приведе-

на на рис. 1 [7]. В момент разряда между электродами (межэлектродный промежуток составляет 25-30 мм) образуется высокопроводящий канал, в который быстро вводится энергия, накопленная в конденсаторной батарее емкостью от $3 \cdot 10^{-6}$ до $9 \cdot 10^{-6}$ Ф. Под действием давления $1 \cdot 10^3$ МПа канал с большой скоростью радиально расширяется. В дистиллированной воде создается давление плазмы, и под действием которого вода сжимается. Расстояние от оси канала разряда до обрабатываемой поверхности составляло 35 мм. Образец помещали непосредственно в емкость с водой, при этом слой радиоактивного или иного покрытия был обращен в сторону источника ударных волн, и образец подвергался только упругой деформации.

Давление на фронте ударной волны достигало 200-220 МПа, а скорость волны составляла $3 \cdot 10^3$ м/с. Длительность одного импульса не превышала 200 мкс. Применялось одно- и многократное воздействие.

Изучение фазового состава, подвижности и распределения атомов проводили стандартными методами снятия слоев, макро-, микро- и электронномикроскопической автордиографии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Автордиографический анализ показал, что независимо от количества актов воздействия проникающие атомы металлов (Fe, Ni, Al) распределялись преимущественно по объему зерен. Причем границы зерен оказались обеднены проникающими атомами по сравнению с объемом зерен (рис. 2), аналогично тому, что наблюдается при других видах импульсных воздействий. В зависимости от ориентации границы по отношению к направлению деформации ширина обедненной области изменялась от 0,5 до 3 мкм.

Миронов Денис Владимирович, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой «Математические методы и информационные технологии», доцент кафедры «Физика». E-mail: dvonorim@mail.ru.

Миронова Татьяна Васильевна, ассистент кафедры «Физика». E-mail: mirt_777@mail.ru.

Миронова Татьяна Фёдоровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика». E-mail: tmironova51@mail.ru.

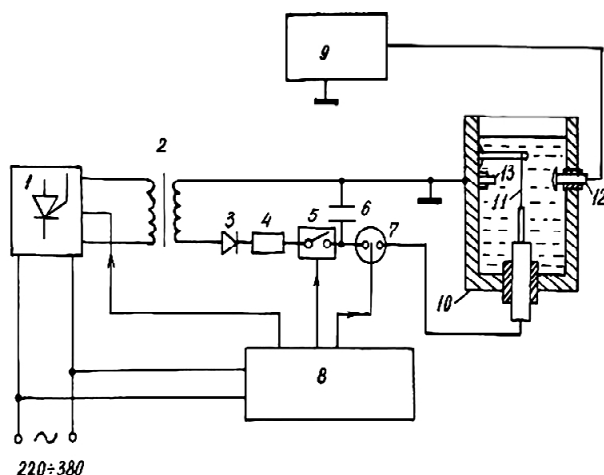


Рис. 1. Схема электрогидроимпульсной установки:

1 – регулятор напряжения, 2 – трансформатор, 3 – выпрямитель, 4 – резистор, 5 – устройство отключения, 6 – конденсатор или конденсаторная батарея, 7 – коммутационный разрядник, 8 – блок управления и контроля, 9 – запоминающий осциллограф, 10 – металлический бак, 11 – взрывающаяся проволочка, 12 – пьезокерамический датчик, 13 – образец

Эти величины оказались гораздо меньше диффузионной ширины границ зерен при отжиге в равновесных условиях. Следует отметить, что проникновение атомов никеля и алюминия сопровождалось их растворением в α – железе по типу замещения.

При одновременной миграции атомов никеля и алюминия в железе возникали 3 равномерно распределенные мелкодисперсные фазы: твердые растворы никеля и алюминия по отдельности и раствор, содержащий никель и алюминий. Отметим, что упорядочение обнаружено не было ни в одном растворе.



Рис. 2. Авторадиограмма-реплика стали после проникновения атомов ^{63}Ni под действием одного акта электрогидроимпульсной обработки, $\times 4800$

Распределение атомов в плоскостях, параллельных поверхности, являлось равномерным, за исключением обедненных приграничных областей, а распределение по глубине наилучшим образом аппроксимировалось экспоненциальной зависимостью от квадрата глубины проникновения. Максимальное значение концентрации находилось на поверхности.

При обработке малоуглеродистой стали форма концентрационного профиля распределения собственных атомов и атомов никеля $C = f(x^2)$ сохранялась, и максимальная концентрация изотопа даже при 20 актах воздействия поперечному оставалась на поверхности образца, но глубина проникновения уменьшалась с ростом содержания углерода и при концентрации 0,5% C составляла 3,5 мкм.

Для атомов углерода, проникающих в железо при упругом деформировании, характерны иные закономерности. Так, введенный в железо цементацией углерод перераспределялся и образовывал максимум концентрации (рис. 3) на расстоянии, которое увеличивалось с ростом кратности приложения импульсной нагрузки. Следует подчеркнуть, что такая форма профиля типична для перераспределения углерода, как при отжигах, так и импульсных воздействиях [8, 9].

При этом в приповерхностном слое образовались мелкодисперсные карбиды, расположенные также на некотором удалении от поверхности. По-видимому, обеднение поверхности связано, как с восходящей диффузией, так и с переходом углерода в процессе фазообразования. Оказалось, что вновь образующиеся карбиды не связаны с карбидами, возникшими при предварительной це-

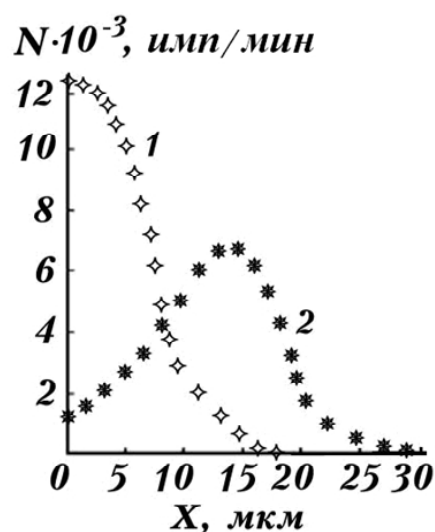


Рис 3. Перераспределение атомов предварительно введенного ^{14}C под действием 20 актов: 1 – исходное распределение, 2 – после воздействия

ментации. Мигрирующие атомы углерода не встраивались в существующие зерна цементита, а создавали новые фазы. Более того, под действием деформации в течение 1 мкс успевал произойти частичный распад исходного цементита и твердого раствора углерода в α -железе, миграция высвободившихся атомов углерода и, наконец, образование пересыщенного твердого раствора углерода в железе и цементита. Проведенные Л.Ю.Демиденко и Н.А.Онацкой [10] эксперименты при одновременном действии электрогидроимпульса и пластической деформации в условиях прессово-термической электрогидроимпульсной сварке трубы с трубной решеткой также обнаружили перераспределение атомов углерода. Оказалось, что в результате указанного воздействия вблизи границы соединения со стороны металла (сталь марки Ст. 3), испытывающего сжатие, образовалась науглероженная (перлитная) полоса шириной от 18 до 40 мкм, а в растянутой области (в трубной решетке) – широкая обезуглероженная зона шириной от 200 до 400 мкм. Вероятно, большие глубины перераспределения атомов углерода связаны с дополнительной пластической деформацией, а интенсивное фазообразование – с повышенной температурой. Так, только при температуре $T \geq 1173$ К в зоне контакта наблюдалось формирование общих ферритных зерен, которое сопровождалось прорастанием межзеренных границ, и, как следствие, возникал значительный сдвиг концентрационного пика в сторону от зоны контакта.

В отличие от углерода, проникновение кислорода из окисного слоя на поверхности вглубь железа не приводило к образованию максимума. Происходило размытие и понижение исходного П-образного слоя, толщиной до 1 мкм, появление экспоненциального вида концентрационного профиля, переходящего, примерно, с 5 мкм в слабый протяженный «хвост», тянущийся до 15 мкм (при 20 актах). Оказалось, что даже на глубине 10 мкм помимо твердого раствора кислорода в железе в диффузионной зоне присутствуют, хоть и в незначительном количестве, мелкодисперсные нестехиометрические оксиды Fe_3O_4 . При этом атомы кислорода, подобно углероду, мигрируя по кристаллической решетке железа, захватывались атомами железа, как правило, в местах скопления дислокаций и образовывали твердый раствор с переменной концентрацией и оксиды в объеме металла.

При взаимной диффузии и растворения по типу замещения железа и алюминия под действием 10 актов электрогидроимпульсной обработки возникало также перераспределение кислорода в алюминии, частичный распад окислов

алюминия, проникновение атомов кислорода в железо и твердый раствор алюминия в железе. Кроме этого наблюдалось образование твердого раствора внедрения кислорода в железе и алюминии, мелкодисперсных фаз закиси железа FeO и шпинели $FeAl_2O_4$ (рис. 4).

Таким образом, диффузия в железо атомов кислорода одновременно с атомами алюминия приводила к появлению в железе иных окислов. По-видимому, это связано с двумя конкурирующими процессами в перераспределении атомов кислорода. Поскольку скорости миграции атомов металлов при импульсных воздействиях выше, чем легких элементов [1], то внедрение атомов кислорода в возникший ранее твердый раствор алюминия в железе способствует образованию сложного раствора замещения (алюминия) и внедрения (кислорода) и выделению упорядоченной трехкомпонентной фазы. То есть какое-то количество кислорода связывалось в образующиеся фазы и не участвовало в дальнейшей диффузии вглубь железа. Что же касается диффундирующих далее атомов кислорода, то они, попадая в железо, образовывали твердый раствор и окисел. Но так как их количество меньше, чем при диффузии в отсутствие алюминия, то они образовали только закись железа. Однако следует отметить, что при одновременном проникновении в сталь никеля и углерода [10] перлитная фаза не образуется, а наблюдается только феррит. Возникновение шпинели в системе Al–Fe в процессе электрогидроимпульсной обработки было отмечено также В.Н. Поляковым [11]. Было показано, что при температуре, не превышающей 315 К, образовалась переходная зона шириной ~ 2 мкм с содержанием кислорода от 0,01 до 0,1 %, состоявшая из шпинели $FeAl_2O_4$. В то же время твердые растворы не были выявлены. Трудно опреде-

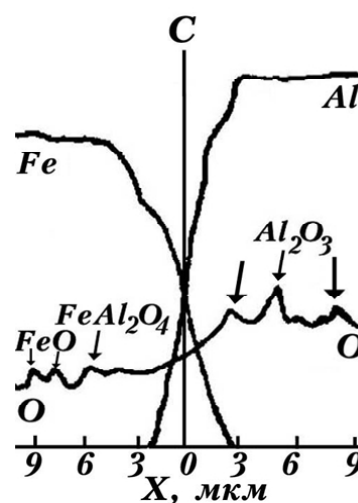


Рис. 4. Распределение железа, алюминия и кислорода после действия 10 актов электрогидроимпульсной обработки

лить, чем вызваны наблюдаемые различия в фазовом составе, в то время как эксперименты проводились в сходных условиях. Представляется более вероятным наличие некоторого количества твердого раствора в диффузионной зоне, которое не позволили выявить примененные автором методики. Поскольку при импульсных обработках, как правило, образованию химических соединений предшествует появление твердых растворов независимо от их растворимости в равновесных условиях [1, 2].

ВЫВОДЫ

1. Импульсное упругое деформирование при комнатной температуре приводит к миграции атомов на макроскопические расстояния по объемному механизму. При этом наблюдается обеднение границ зерен подобно тому, что имеет место при импульсной пластической деформации.

2. В процессе импульсной упругой деформации в диффузионной зоне образуются различные фазы: твердые растворы внедрения и замещения, карбиды, окислы, шпинели.

3. Наблюдаются различия в фазовом составе при взаимодействии железа с металлом, легким элементом и одновременной диффузии атомов металла и неметалла.

Работа выполнялась по договорам о двустороннем научном сотрудничестве на основе прямых связей между Институтом металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины и Самарской государственной сельскохозяйственной академией по теме «Исследование особенностей и механизма миграции атомов в металлах в условиях внешних воздействий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д.С.Герцикен, В.Ф.Мазанко, В.М.Тышквичи и др. Киев: РИО ИМФ НАНУ, 1999. 438 с.
2. Массоперенос и фазообразование в металлах при импульсных воздействиях / В.М.Миронов, В.Ф.Мазанко, Д.С.Герцикен и др. Самара: СамГУ, 2001. 232 с.
3. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций / В.Ф.Мазанко, А.В.Покоев, В.М.Миронов и др. М.: Машиностроение, 2006. Т. 1. 336 с.
4. Влияние многократной электрогидроимпульсной обработки на подвижность атомов в металлах / Д.С.Герцикен, В.Ф.Мазанко, В.М.Фальченко // Доп. НАНУ. 2000. №7. С. 100 - 104.
5. Массоперенос в металлах в условиях многократно повторяющихся импульсных воздействий / Д.С.Герцикен, В.Ф.Мазанко, В.М.Фальченко // Металлофизика и новейшие технологии. 2000. 22, № 8. С. 40-48.
6. Mazanko V.F., Mironov V.M., Gertsriken D.S., Peretiakku P.V. Formation of phases in metals at spark discharges processing // Diffusion and diffusional phase transformations in alloys, Bulletin of Cherkasy State University. Physics, 37-38, 2002, P. 209-212.
7. Гульбй Г.А. Малюшевский П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев: Наукова думка, 1977. 176 с.
8. Образование фаз внедрения при импульсном сжатии среды / В.М.Мазанко, Д.С.Герцикен, Ворона С.П и др. // Вісник Черкаського націон. ун-ту. Серія «Фіз.-мат. Науки». 2004. Вип. 62. С. 74 - 84.
9. Перераспределение нерастворимых примесей в металлах в плазме тлеющего разряда / Д.В.Миронов, Д.С.Герцикен, Г.В.Луценко // Взаимодействие излучений с твердым телом: сб. материалов VI-й междунар. конф. «ВИТТ-2005». Минск, 2005. С. 176 - 179.
10. Демиденко Л.Ю. Онацкая Н.А. Характер диффузии углерода в зоне контакта при прессово-термической электрогидроимпульсной сварке // Автоматическая сварка. 2001. № 9. С 24 - 26.
11. Поляков В.Н. Переходные зоны при импульсном нанесении алюминия на сталь // ФиХОМ. 1984. № 4. С. 86 - 94.

FORMATION OF PHASES IN METALS AT LOW TEMPERATURES IN THE CONDITIONS OF ELECTRO-HIDROIMPULSIVE INFLUENCES

© 2011 D.V. Mironov, T.V. Mironova, T.F. Mironova

Samara State Agricultural Academy

Changes of phase structure and feature of distribution and migration of atoms in metals and alloys are studied at electro-hidroimpulsive to processing at low temperatures. The phase structure of a diffusive zone is defined at penetration into iron of atoms of nickel, aluminum, carbon and oxygen.

Key words: formation of phases in metals, electro-hidroimpulsive processing, low temperatures.

Denis Mironov, Candidate of Physics and Mathematics, Head at the Mathematical Methods and Information Technology Department, Associate Professor at the Physics Department. E-mail: dvonorim@mail.ru.

Tatyana Mironova, Assistant Lecturer at the Physics Department. E-mail: mirt_777@mail.ru.

Tatyana Mironova, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Physics Department. E-mail: tmirova51@mail.ru.