

Микроструктурные особенности процесса сверхглубокого проникания в металлических системах в условиях твердо-жидкофазного взаимодействия

В. В. Истомин-Кастровский, В. И. Кошкин, И. Б. Руденко

Изучено влияние электроимпульсной обработки на микроструктурные особенности зоны контактного взаимодействия свинца и медно-свинцового сплава монотектического состава с железом. На значительной глубине в железной пластине обнаружены включения свинца (а также свинца и меди), располагающиеся преимущественно по границам зерен железа. Обсуждается возможный механизм миграции легкоплавких компонентов в железо.

Введение

Во второй половине прошлого века было открыто явление сверхглубокого проникания (СГП) твердых частиц в твердое тело [1]. Особенности СГП твердых микрочастиц в металлы сводятся к следующему. При столкновении с металлической преградой порошки из различных твердых веществ размером не более 100 мкм, разогнанные продуктами детонации до скоростей $\sim 1,5 - 2,5$ км/с, проникают в нее на глубины, в $10^2 - 10^4$ раз превышающие диаметры частиц. Каналы, образуемые движущимися микрочастицами, схлопываются, и вблизи каналов образуются области интенсивного пластического течения с высокодефектной, частично аморфизированной структурой [2, 3]. Эффект СГП твердых микрочастиц в металлы, обстоятельно изучался в ряде экспериментальных и теоретических работ [2 – 6 и др.].

В 1999 году было зарегистрировано открытие, касающееся аномального массопереноса жидкого металла в твердом обусловленного обратным монотектическим превращением [7]. В системах несмешивающихся компонентов при протекании в зоне контакта обратной монотектической реакции происходит существенное, по сравнению со скоростями объемной и зернограничной диффузии, увеличение скорости массопереноса жидкофазной системы в твердофазную (до 1,0 мм/мин и выше). В 2007 году еще одно научное открытие [8], значительно расширило границы проявления феномена СГП. Было обнаружено, что при интенсивном импульсном воздействии (ударно-волновом, электроимпульсном,

электромеханическом) на зону контакта твердых металлических веществ происходит взаимный массоперенос контактирующих веществ на расстояния от исходной контактной поверхности, определяемое энергией и длительностью импульсов. Была предложена физическая модель, адекватно описывающая наблюдаемые авторами явления, основанная на представлениях об атомно-вакансионных состояниях, развитых академиком В.Е.Паниным [9, 10]. Однако полученные недавно экспериментальные результаты, которые будут представлены далее, показывают необходимость углубления и дополнения теоретического описания явления СГП.

Как уже отмечалось, импульсное воздействие может иметь различную природу. В данной статье будут приведены примеры проникания одного металла в другой при подведении в зону контакта электрического импульса.

Эксперимент

Изучали контактное взаимодействие в системах металлических компонентов (преимущественно с ограниченной взаимной растворимостью в жидком состоянии) в условиях пропускания электрических импульсов. В общем случае, экспериментальные образцы представляли собой сборки, состоящие из нескольких находящихся в контакте разнородных частей. Одна (или две) из них — это цельная металлическая матрица из стали, алюминия и меди, толщина которой в большинстве экспериментов составляла 1 – 8 мм. Другая часть формировалась различ-

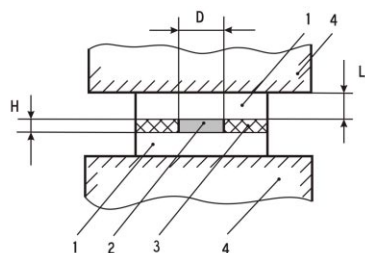


Рис. 1. Схема зоны контакта металлов, на которую действуют электрические импульсы: 1 — цельнометаллические пластины, 2 — специально подготовленный образец, 3 — изолятор, 4 — медные контакты.

ными способами: использовались либо порошки Cu, Pb, Sn, W, Fe, либо цельные образцы, а также разнообразные их комбинации. Схематическое изображение варианта сборки для испытаний в статических условиях представлено на рис. 1 — две металлические пластинки, зажимающие шайбу (текстолит, слюда) с отверстием в центре, заполненным смесью порошков либо цельным образцом, соответствующего размера. Размеры центральной области сборки подбирались таким образом, чтобы тепла Q , выделяемого при одном импульсе, хватало для перевода материала в жидкое состояние (для свинцового цилиндра диаметром 8 мм и высотой 1 мм $Q \approx 36$ Дж).

Для проведения экспериментов по изучению влияния электрического импульса на микроструктуру металлических композиционных материалов и сплавов в статических условиях был создан компьютерный программно-аппаратный комплекс с возможностью задания различных параметров и записи результатов проводимых экспериментов [11].

В экспериментах с медными, алюминиевыми и стальными матрицами через сборку пропускали импульсы тока длительностью $t = 10$ мс и скважностью $q = 2$, а характерные величины амплитудной плотности тока через сборку составляли $(1 - 4) \cdot 10^3$ А/см².

Образцы для анализа структуры материалов до и после электроимпульсной обработки подготавливали и исследовали стандартными металлографическими методами. Для количественного и качественного элементного анализа различных областей исследуемых материалов использовали сканирующий электронный микроскоп S-3400N фирмы Hitachi с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром при ускоряющем напряжении 15 кВ во вторичных и отраженных электронах.

Результаты и обсуждение

В данной серии экспериментов были изучены два варианта образцов, схема которых приведена на рис. 1. В обоих случаях использовали цельнометал-

лические пластины технического железа. В качестве легкоплавкой вставки между пластинами в первом случае брали чистый свинец, во втором медно-свинцовый сплав монотектического состава (Cu — 36 вес. % Pb). Геометрические параметры сборок в обоих случаях совпадали, однако мощность электрического импульса в системе железо — медно-свинцовый сплав — железо была вдвое больше, чем в системе железо — свинец — железо.

Направление тока в обоих случаях проходило от “плюса” к “минусу” сверху вниз.

После импульсного воздействия меньшей мощности в сборке первого типа не наблюдали видимого разрушения железных пластин на границе раздела со свинцовой пластиной. Это означает, что подведенной энергии не достаточно для инициирования монотектической реакции в системе Fe — Pb. (Наши эксперименты, проведенные по аналогичной схеме при большей энергии импульса показали, что такая реакция возможна и сопровождается оплавлением железа с образованием типичного ядра, содержащего свинец и пересыщенный твердый раствор свинца в железе).

Однако, как было выявлено с помощью металлографических и рентгеноспектральных исследований, в первом случае свинец успевает расплавиться и через не разрушенную поверхность железной пластины происходит интенсивное проникание свинца в объем железа; при этом нарушений сплошности железа не наблюдается.

Этот результат хорошо иллюстрирует рис. 2. На рис. 2 показана микроструктура железной пластины, в поверхностной зоне которой наблюдается свинец в виде относительно равномерно распределенных включений. Заметно измельчение зерна в области прохождения импульса (рис. 2а).

Границы зерен железа вытравлены, поэтому хорошо видно, что включения свинца располагаются на границах зерен.

Следует отметить, что в схеме, приведенной на рис. 1 свинец мигрировал только в нижнюю пластину, то есть в направлении импульса от “плюса” к “минусу”.

Во втором эксперименте энергии импульса хватило для инициирования монотектической реакции в тройной системе Fe — Cu — Pb (или, более точно, сначала двойной монотектической реакции в системе Cu — Pb, а затем тройной в системе Fe — Cu — Pb). В результате образовалась типичная сферообразная зона оплавления, представляющая после затвердевания совокупность пересыщенных твердых растворов на базе Fe, Cu и Pb. В железных пластинах, в части не затронутой оплавлением, как и в первом

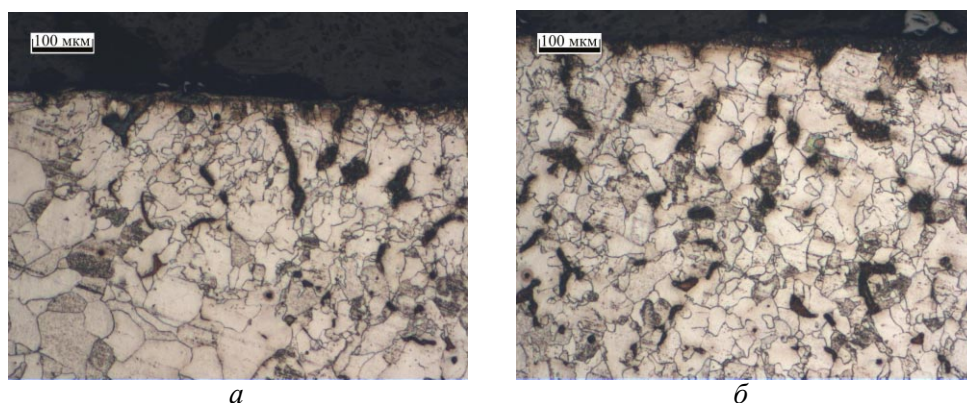


Рис. 2. Микроструктура поверхностной зоны железной пластины на краю (а) и в центре (б) области соприкасавшейся с пластиной свинца.

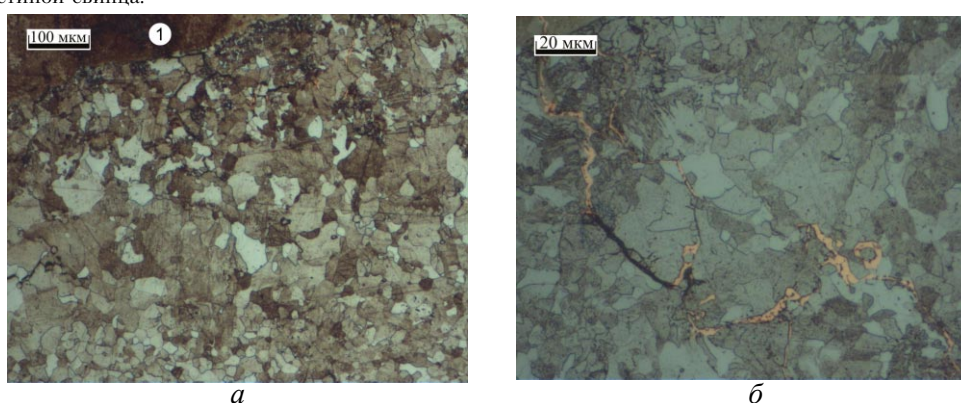


Рис.3. а — микроструктура зоны оплавления в результате монотектической реакции в системе Fe – Cu – Pb; б — микроструктура зоны железной пластины, граничащей с областью монотектического плавления.

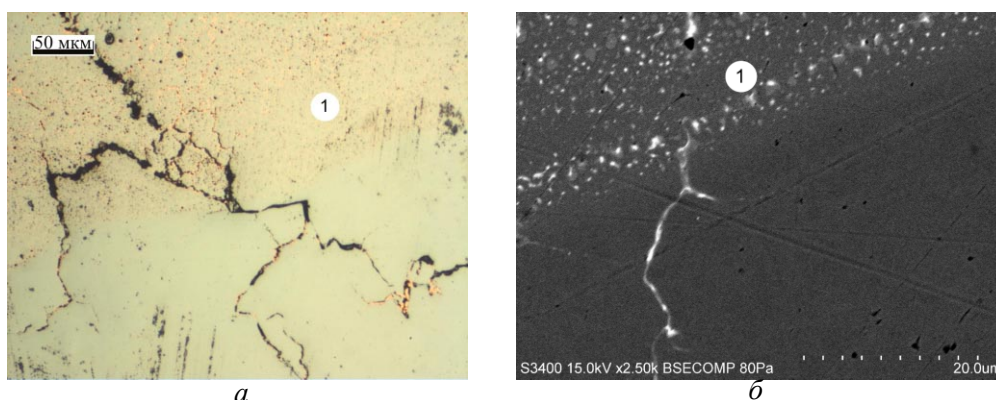


Рис.4. а — микроструктура областей железа с характерными треками проникания меди и свинца; б — область контакта оплавленного и неоплавленного железа в характеристическом излучении свинца.

случае, наблюдается интенсивное проникание легкоплавких элементов – меди и свинца, однако, в отличие от первого случая, это проникание наблюдается и в верхней, и в нижней пластинах. Мы объясняем этот факт тем, что к пондеромоторным силам, развиваемым за счет действия направленного импульса тока в случае образования зоны оплавления добавляется воздействие изотропных сил возникающих за счет очень большого давления, создаваемого в зоне оплавления.

Рассмотрим более подробно результаты металлографического и рентгеноспектрального анализа зоны нерасплавленного железа, в которую из расплавленной зоны проникли включения меди и свинца (рис. 3). На рис. 3а и б показаны участки зоны оплавления при различных увеличениях.

На рис. 4а показан участок железа, граничащий с зоной сплавления в котором четко видны протяженные треки, содержащие медь и свинец, предположительно повторяющие очертания границ зерен и субзерен.

На рис. 4б в характеристическом излучении свинца показана граничная область, включающая зону оплавления и неоплавленного железа. В зоне оплавления четко видна волнообразно сгруппированные точечные включения свинца, что связано, по-видимому, с периодическим прохождением импульсных волн. В зоне железа также четко видны треки свинца, простирающиеся на значительную глубину.

Выводы

Подтверждено, что в результате (электро)-импульсного воздействия жидких металлов на твердый происходит их глубокое проникновение в объем твердого металла преимущественно по границам дефектов (в частности зерен и субзерен).

Движущими силами наблюдаемых процессов являются силы, развиваемые в результате действия электрического импульса и давления, связанного с быстрым расплавлением зоны контакта разнородных металлов.

Моноэктическая реакция, имеющая место в изученных системах, может существенно понизить энергетический барьер наблюдаемых процессов, но не является принципиально необходимым условием.

Характер распространения легкоплавких металлов по тугоплавкому (геометрия треков) определяется механизмами неравномерной деформации материалов под воздействием импульсных нагрузений.

Авторы выражают благодарность Ю. С. Авраамову и А. Д. Шляпину за помощь в обсуждении результатов.

Литература

1. А.С. 703585 СССР. Ушеренко С.М., Фетисов И.И., Загорский Г.Г. Способ изготовления инструмента. Оpubл. в Б.И., 1979, № 46.
2. Альтшулер Л.В., Андиленко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. О модели сверхглубокого проникания. Письма ЖТФ, 1989, т. 15, вып.5, с. 55 – 57.
3. Андиленко С.К., Ушеренко С.М., Шилкин В.А. Эффективность процесса сверхглубокого проникания. Письма ЖТФ, 1998, т. 24, вып.17, с. 81 – 84.
4. Черный Г.Г. Механизм аномального сопротивления при движении тел в твердых телах. ДАН СССР. Теория упругости. 1987, т. 292, № 6, с. 1324 – 1328.
5. Григорян С.С. О природе “сверхглубокого” проникания твердых микрочастиц в твердые материалы. ДАН СССР. Механика. 1987, т.292, № 6, с.1319 – 1322.
6. Макаров П.В. Модель сверхглубокого проникания твердых микрочастиц в металлы. Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 3, с.61 – 70.
7. Авраамов Ю.С., Шамшев К.Н., Шляпин А.Д. Явление увеличения скорости массопереноса жидкофазной системы через твердофазную при моноэктическом превращении (Диплом № 164. Приоритет 04.11.1980): В.В. Потоцкий. Регистрация научных открытий (методология и практика). М.: МААНОИ, 2004, с. 208 – 209.
8. Авраамов Ю.С., Калашников Н.П., Кошкин В.И., Панин В.Е., Шамшев К.Н., Шляпин А.Д. Явление взаимного массопереноса контактирующих твердых металлических веществ при импульсном воздействии. (Диплом № 322.) В.В. Потоцкий. Научные открытия, идеи, гипотезы (1992 – 2007). М.: РАЕН, МААНОИ, 2007, с. 302 – 303.
9. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Хон Ю.А., Елсукова Т.Ф. Атом-вакансионные состояния в кристаллах. Изв. вузов, Физика, 1982, №12, с. 5 ч- 27.
10. Панин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д., Шляпин А.Д., Авраамов Ю.С., Кошкин В.И. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. II. Явление взаимного проникания частиц разнородных твердых тел без нарушения сплошности под воздействием концентрированных потоков энергии. Физическая мезомеханика. 2006, т. 9, № 4, с. 5 – 13.
11. Авраамов Ю.С., Кошкин В.И., Нижник В.А., Руденко И.Б., Шляпин А.Д. Структурные превращения в сплавах на основе несмешивающихся компонентов при электроимпульсной обработке. Перспективные технологии и оборудование для материаловедения, микро- и наноэлектроники: Труды IV российско-японского семинара. М.: МГИУ, 2006, с. 99 – 103.

Истомин-Кастровский Владимир Владимирович — Государственный технологический университет Московского института стали и сплавов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики конденсированного состояния.

Кошкин Валерий Иванович — Московский государственный индустриальный университет, кандидат технических наук, доцент, проректор по информатизации и методической работе. Специалист в области физики конденсированного состояния.

Руденко Игорь Борисович — Московский государственный индустриальный университет, заместитель директора информационного аналитического центра. Специалист в области компьютерных систем.