

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Пушкина Марка Сергеевича “Процессы самоорганизации и эволюция микроструктуры при получении композитов на основе меди методом взрывного нагружения”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

Изучение природы твердых тел на микро- и наноуровнях является одной из наиболее сложных задач современной физики, но в то же время и чрезвычайно важной как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. При этом одним из наиболее важных и информативных современных методов воздействия на конденсированное вещество является взрывное нагружение, другими словами сварка взрывом. Такой процесс представляет собой высокоинтенсивное и быстротечное воздействие на материал с длительностью примерно 10^{-6} с. Сварка взрывом является весьма эффективной технологией создания биметаллических или многослойных материалов, позволяющая получать большие по площади соединения из разнообразных материалов и сплавов, в частности, таких пар материалов, соединение которых вообще невозможно или затруднено другими способами сварки.

Для оптимизации параметров сварки необходимо исследование структуры соединений и выявление на этой основе закономерностей их формирования. При всем многообразии материалов и режимов сварки центральной является проблема перемешивания в переходной зоне вблизи границы раздела. Именно структура переходной зоны определяет возможность сцепления обоих материалов. Но до сих пор остается неясным, как при таком сильном внешнем воздействии успевает произойти перемешивание за столь короткое время, пока длится сварка. Многие существенные вопросы, описывающих явления, происходящие в реальных кристаллах, остаются еще нерешенными, в первую очередь из-за сложности и многообразия изучаемых объектов.

В связи с вышесказанным актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений.

Целью диссертационной работы Пушкина М.С. явилось изучение фундаментальных закономерностей, определяющих поведение металлических систем и их структуру при взрывном нагружении, включая выявление основных механизмов, контролирующих сцепление материалов.

Среди основных результатов, составляющих научную новизну работы, можно выделить следующие:

1. Предложен подход, использующий теорию самоорганизации, который может объяснить причины формирования того или иного рельефа поверхности раздела, полученного при сварке взрывом.

2. Установлена эволюция микроструктуры сварного соединения при интенсификации режима сварки: на первом этапе возникают отдельные выступы на поверхности, затем объединение выступов в так называемые «всплески», далее формирование квазиволновой границы, на последнем этапе образование волнообразной границы в центре окна свариваемости.

3. Предложено и проанализировано несколько новых механизмов сцепления материалов. Показано, что появление при формировании контактной поверхности “излишней” площади идёт как за счёт роста амплитуды волны (переход от всплесков к волнам), так и за счёт увеличения изрезанности поверхности всплесков и волн.

4. Сформулирован фрактальный подход для численного описания шероховатости

поверхности раздела. В случае минимальной подводимой энергии, при которой образец сваривается, наблюдается максимальная фрактальная размерность, уменьшающаяся при интенсификации режима сварки.

5. Найдены зоны, которые могут негативно влиять на сцепление материалов (так называемые «зоны риска»). Для соединения «Cu-Ta» – это специфическая квазиволновая граница, формирующаяся вблизи нижней границы окна свариваемости. Для соединения «Cu-Ti» – это области, в которых наблюдаются интерметаллиды, образующиеся, благодаря взаимной растворимости исходных материалов, внутри зоны расплава при достаточно интенсивных режимах взрывного нагружения.

Полный объем диссертационной работы составляет 120 страниц, включая 4 таблицы и 63 рисунка. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 106 наименований. В работе дано обоснование выбора и актуальности темы, определены направления, объекты и цели исследования.

Введение включает в себя обоснование темы исследования, цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту, научную новизну и практическую значимость, сведения об апробации результатов, личном вкладе, структуре и объёме диссертации.

В **первой главе** представлен литературный обзор проблемы. Приводятся особенности процессов и структур, связанных со сваркой взрывом. Показаны различные условия, необходимые для реализации сварного соединения. Рассмотрены известные гипотезы свариваемости металлов при взрыве. Для изучения переходной зоны вблизи сварного шва используются принципы теории самоорганизации. Важной отличительной особенностью этой теории является специфическое структурирование объекта изучения. В главе рассмотрены некоторые примеры системы, связанные с данной теорией (так называемые «ячейки Бенара» и структуры в литии после импульсного нагрева лазером). В процессах самоорганизации важнейшую роль играют нелинейные и диссипативные процессы. Для подобных случаев, (например, для описания рельефа поверхности раздела), предлагается использовать теорию фракталов.

Во **второй главе** представлены методики исследования и способы приготовления образцов, полученных сваркой взрывом. Исследуемые системы представляют собой композиты на основе меди: «Cu-Ta», «Cu-Ti» и «Cu-Cu». Все композиты были получены сваркой взрывом, методом параллельно расположенных пластин. Неподвижная пластина располагалась на металлической подложке. Сварку выполняли при разных внешних параметрах, в качестве которых выбраны угол соударения и скорость точки контакта. При выполнении исследований в работе использовались несколько методик, с помощью которых была получена информация о рельефе поверхности. Исследовались посредством сканирующей электронной микроскопии продольные и поперечные сечения образцов. Кроме того, для соединений «Cu-Ta» и «Cu-Ti» были подобраны реактивы, с помощью которых удалялась медь и исследовался рельеф поверхностей тантала и титана. Приводятся данные о составе исходных материалов, размерах пластин, подготовленных для сварки, и зазорах между ними, а также о составе взрывчатого вещества. Кратко излагаются методики, использованные при исследовании микроструктуры.

В **третьей главе** представлены результаты изучения сварного соединения «Cu-Ta». Особое внимание уделено эволюции поверхности раздела при интенсификации режима сварки. Известны две достаточно простые формы поверхности раздела сварного соединения: плоская и волнообразная. Исследования переходных состояний между ними ранее не проводилось. Для изучения таких состояний был рассмотрен набор соединений, получаемых при промежуточных режимах сварки. При этом была выявлена последовательность

изменяющихся структурных состояний поверхности раздела. Прежде всего, обнаружено, что поверхность раздела является неоднородной: она содержит выступы и зоны локального расплавления. Выступы образованы тем из исходных материалов, который обладает большей твердостью и более высокой температурой плавления. В данном случае это тантал. Внутри выступов не обнаружено присутствие второго материала. На самом деле, в случае выступов речь вообще идет не о перемешивании, а о взаимопроникновении материалов. Исследовался рельеф поверхности раздела ниже нижней границы (НГ) окна свариваемости, на НГ и несколько выше НГ.

Ниже НГ сцепления пластин в общем случае не происходит. На поверхности тантала отчетливо видны изолированные выступы, не контактирующие друг с другом. Переход из области ниже НГ к области непосредственно вблизи нее сопровождается драматическим изменением рельефа поверхности: отдельные разъединенные выступы сменяются при интенсификации режима на регулярное распределение контактирующих друг с другом выступов. Хотя выступы являются твердофазными, больше всего они похожи на всплески на воде. На всех СЭМ изображениях, видны плотные группы контактирующих друг с другом всплесков. Характерный рельеф, полностью заполненный всплесками, является особенностью, присущей плоской поверхности раздела. Здесь можно обратить внимание на существенную особенность изображения всплесков: самоподобие элементов рельефа, которое было положено в основу фрактального описания рельефа.

При переходе от НГ к области несколько выше НГ можно ожидать наблюдения волнообразной поверхности. Однако ситуация является более сложной. Наблюдается волнообразная поверхность, но очень неоднородная: в разных областях разные длины и амплитуды волн. Такую поверхность можно назвать квазиволнообразной. В отдельных областях видны волны, а между ними всплески. При большем увеличении отчетливо видны волны, имеющие разное направление в разных областях. При последующей интенсификации режима и переходе к центру окна свариваемости наблюдается достаточно совершенная волнообразная поверхность. Для соединения Cu-Ta соотношение характерных температур таково, что в зоне расплава образуется дисперсионно упрочнённая суспензия, что и обеспечивает прочность соединения. Однако, для обеспечения качественного сцепления, зона расплава не должна покрывать всю границу раздела.

В данной главе также продемонстрировано, что одной из возможных «зон риска» для соединения «Cu-Ta» является квазиволновая граница. Это связано с её неоднородной структурой, а именно наличием разнонаправленных волновых участков, всплесков, разрывов и др. Для того, чтобы иметь возможность оценить изрезанность поверхности сварного шва, был использован фрактальный подход, который здесь применяется впервые для описания сварки взрывом. Чтобы рассчитать фрактальную размерность продольного сечения соединения «Cu-Ta», использовался метод «Береговой линии» и было разработано соответствующее программное обеспечение. Описывается итерационная процедура, которая используется при вычислении фрактальной размерности.

В **четвертой главе** представлены результаты изучения сварного соединения Cu-Ti. У данной сварной пары, в отличие от соединения Cu-Ta, имеет место довольно высокая взаимная растворимость исходных материалов. Такая взаимная растворимость предопределяет значительную взаимную диффузию компонент и протекание интерметаллических реакций внутри зоны расплава при тех температурах, когда эти зоны формируются. Все образцы были разделены на три группы по мере увеличения интенсивности режима сварки: плоская граница; квазиволновая граница; волнообразная граница.

Плоская граница. - Поверхность не является волнообразной и периодический рельеф не наблюдается. После того, как медь была вытравлена, на поверхности титана были обнаружены всплески, подобные тем, что наблюдались для плоской границы сварного соединения «Cu-Ta». Квазиволновая граница. - В данном случае на поверхности также наблюдались всплески, однако, в отличие от плоской границы, эти всплески выстраиваются в ряды, образуя тем самым квазиволновую форму волны, которая достаточно сильно отличается от подобной формы для соединения «Cu-Ta». Волнообразная граница. - Наблюдались разрывы волн, приводящие к образованию прерывистых волн, которые не наблюдались в соединениях «Cu-Ta».

В данной главе представлены также результаты изучения структуры зоны локального расплавления. Были обнаружены зоны расплавленной (затем застывшей) меди, которая содержит не испытывавшие расплавления частицы тантала. Зафиксирована вихревая структура зон локального расплавления. Также надо отметить, что внутри зоны расплава нечётко, но всё же прослеживаются отдельные частицы (интерметаллиды). Приведены дифрактограммы, которые указывают на присутствие в возникающем соединении интерметаллида Cu_3Ti .

Проведенный анализ показал, что «зонами риска» для соединения «Cu-Ti» являются области образования интерметаллидов на поверхности раздела двух материалов. Однако действительно опасными данные интерметаллиды являются при интенсификации режима сварки, когда частицы образуют сплошные или почти сплошные объёмы данной фазы.

В случае «Cu-Ti», для каждого режима была найдена фрактальная размерность в соответствии с подводимой энергией. Было установлено сильное уменьшение значений фрактальной размерности для волнообразных границ в сравнении с квазиволновыми. Таким образом, показано, что правило: «при интенсификации режима сварки фрактальная размерность падает» выполняется и для соединения «Cu-Ti».

Были описаны следующие процессы изменения структуры материалов вблизи контактной поверхности и, соответственно, изменения внутренней энергии, которые успевают произойти за короткое время взрывчатого воздействия (или непосредственно вслед за ним): образование выступов, образование всплесков, формирование изрезанности на поверхности раздела, образование волны, зоны локального расплавления, фрагментация типа дробления, вихри и др.

В работе сделан вывод о том, что система из всех возможных способов самоорганизации поверхности раздела «выбирает» такой, для которого скорость преобразования подводимой механической энергии во внутреннюю энергию – максимальна.

В пятой главе представлены результаты изучения однородного сварного соединения на основе меди. Для такой сварной пары исчезает ряд механизмов самоорганизации, реализующихся для соединений медь-тантал, медь-титан. К ним относятся процессы, обусловленные как различиями в физических свойствах свариваемых образцов (разница в температуре плавления, плотности и т.д.), так и особенностями, связанными с взаимной растворимостью. Таким образом, физических процессов, реализующихся при сварке взрывом для однородной пары, становится меньше, а оставшиеся механизмы становятся более определёнными.

Исследование пары «медь-медь» затруднено из-за неразличимости материалов. Вместо этого исследовалась пара «медь-мельхиор». Подобный выбор обусловлен тем, что медь и мельхиор во многом имеют весьма близкие свойства, включая близкую температуру плавления и плотность. Это позволило приближённо считать их однородными. Режимы сварки для соединения медь-мельхиор были условно разделены на две группы. Внутри первой группы была выбрана строгая интенсификация режима сварки от самого

низкоэнергетического к самому высокоэнергетическому, при этом варьировался только один параметр: скорость точки контакта. Для второй же группы характерны изменения обоих внешних параметров: скорости точки контакта и угла соударения.

Для всех исследуемых режимов сварки наблюдаются выступы на границе раздела. Они отчётливо видны на продольных сечениях, представляющих собой набор чередующихся полос, соответствующих различным материалам. Также наблюдаются многочисленные зоны локального расплавления. Выступы, как и зоны локального расплавления, формируют тонкую структуру контактной границы, которая обеспечивает диссипацию подводимой энергии. Такое поведение было характерно и для соединений «Cu-Ta» и «Cu-Ti». Для соединения «медь-мельхиор», как и для других рассмотренных соединений, были обнаружены все три типа границ: волнообразная, квазиволновая и плоская.

На основе анализа продольных сечений для сварных соединений в работе отмечена следующая весьма чёткая закономерность: при увеличении интенсивности режима сварки уменьшается изрезанность поверхности раздела. Подобное поведение хорошо сочетается с выводами предыдущих глав. Можно отметить, что фрактальные размерности, полученные ранее для соединений «медь-тантал» и «медь-титан», в среднем оказываются выше, чем для соединений «медь-мельхиор», т.е. для однородных или почти однородных пар границы раздела являются более гладкими. Причина, по мнению автора, обусловлена тем, что для сильно неоднородных пар («Cu-Ta» и «Cu-Ti») один из материалов (Ta или Ti) является существенно более твердым и хрупким. Это приводит к преимущественной фрагментации с возникновением выступов твердой фазы, проникающих в более пластичную.

Выводы включают в себя сформулированные выше положения, составляющие научную и практическую значимость работы. Излагается последовательность событий, приводящих к переходам между структурными состояниями поверхности раздела. Приводятся результаты исследования зон локального расплавления. Сформулирован фрактальный подход для сравнения рельефа контактных поверхностей, полученных при сварке взрывом. Обнаружены различные «зоны риска» в зависимости от состава сварных пар.

Считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Она является законченным, актуальным и оригинальным исследованием. Новизна и выводы, которые выносятся на защиту, хорошо обоснованы и в достаточной мере доказаны. Проведенные в диссертации исследования указывают на весьма нетривиальную картину структурных и фазовых переходов, знание которых позволяет получать весьма перспективные материалы. В этом аспекте данная диссертационная работа, несомненно, представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается тем, что при выполнении работы использовались методы, тестированные при решении подобных задач, а основные результаты находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными. Работа будет полезна специалистам, работающим в области физики твердого тела. Работу выгодно отличает и то обстоятельство, что она апробирована на многих международных конференциях.

Тем не менее, диссертация не лишена и некоторых недостатков. Отметим здесь некоторые из них.

1. В диссертации сравнение новых данных с известными ранее является ограниченным. Проводится сравнение результатов, полученных для трех бинарных систем «Cu-Ta», «Cu-Ti», «Cu-Cu», но отсутствует сравнение с соединениями, для которых нет взаимной растворимости исходных элементов, а также для соединений, в которых исходная

растворимость исходных элементов достаточно велика. Кроме того, отсутствует сравнение с соединениями типа «металл – интерметаллид». Остается неясным вопрос, насколько универсальными являются полученные в диссертации закономерности.

2. При исследовании переходов от «выступов» к «всплескам» и далее к квазиволновой, а затем и волновой поверхностям, отсутствуют оценки тех изменений параметров сварки, которые к этим переходам приводят.

3. Автор диссертации отмечает, что предлагаемый в диссертации фрактальный подход для анализа поверхности раздела впервые применяется для описания сварки взрывом. Однако, фрактальный подход применялся и ранее для описания поверхности разрушения. Это следовало отметить в главе 1, содержащей литературный обзор.

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертации М.С. Пушкина. В значительной мере их можно рассматривать как пожелание для будущей работы.

Оценивая данную диссертацию в целом, следует отметить, что в ней был получен ряд принципиально важных и новых результатов, как экспериментальных, так и теоретических, сформулированы и обоснованы научные положения и выводы, которые позволяют прояснить сложную природу процессов и изменения структурного состояния различных материалов под влиянием сильного внешнего воздействия, включая сварку взрывом. Представленные результаты, их обоснование и анализ, безусловно, будут стимулировать дальнейшие исследования свойств, структуры и поведения материалов в различных условиях интенсивного внешнего воздействия, а также способствовать и максимально стимулировать их практическое применение. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена важная задача, связанная с физическими закономерностями процессов, протекающих при сварке взрывом и других явлениях, протекающих под воздействием взрывного нагружения.

Автореферат диссертации и публикации автора в высоко рейтинговых научных журналах полностью отражают научную новизну и содержание работы. Диссертационная работа Пушкина М.С. «Процессы самоорганизации и эволюция микроструктуры при получении композитов на основе меди методом взрывного нагружения», удовлетворяет всем требованиям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней (постановление правительства РФ от 24.09.13), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доктор физ.-мат. наук (01.04.07), профессор,
главный научный сотрудник НИТУ «МИСиС»,
119049 Москва, Ленинский просп., 4;
E-mail: a.glezer@mail.ru;
тел. 8 (916)1221974.

ГЛЕЗЕР
Александр Маркович

23.11.2018

«Подпись доктора физ.-мат. наук Глезера А.М. заверяю»

С отзывом ознакомлен 27.11.2018
(Пушкин М.С.)

ПОДПИСЬ _____
Проректор по общим вопросам
и общим вопросам
НИТУ «МИСиС»

СВЕДЕНИЯ
об официальном оппоненте диссертанта

Глезер Александр Маркович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, профессор, главный научный сотрудник кафедры физического материаловедения Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Москва, 119049, Ленинский проспект, д. 4; тел. : 8(495)955-01-33; эл. почта: a.glezer@mail.ru).

Глезер А.М. является специалистом в области физики конденсированного состояния и имеет публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация:

1. Структурны аспекты деформационной амортизации кристаллического сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ при кручении под высоким давлением // Р.В. Сундеев, А.В. Шалимова, А.М. Глезер, Е.А. Печина, М.В. Горшенков // Физика твёрдого тела. – 2018. – Т.60, N6. – С. 1157-1161.
2. Formation and evolution of the structure and phase composition of stainless steel during electron beam treatment multiple-cycle fatigue // S.V. Vorob'ev, V.V. Sizov, V.E. Gromov, S.V. Konovalov, A.M. Glezer, Y.F. Ivanov / Inorganic Materials: Applied Research. – 2017. – V. 8/4. – P. 521-527.
3. Структурные механизмы разрушения нанокристаллических материалов / В.А. Поздняков, А.М. Глезер. – 2005. – Т.47/5. – С. 793-800.
4. Effect of high pressure torsion at different temperatures on the local atomic structure of amorphous Fe-Ni-B alloys / R.V. Sundeev, A.M. Glezer, A.P. Menushenkov et al. // Mater. Design. – 2017. – V. 135. – P. 77-83.
5. Structure of electro-explosion resistant coatings of immiscible components / D.A. Romanov, V.E. Gromov, A.M. Glezer et al. // Mater. Lett. – 2017. – V. 188. – P. 25-28.
6. On the nature of the “double” yield point in $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ alloy upon high pressure torsion / A.M. Glezer, L.S. Metlov, R.V. Sundeev et. al. // JETP Lett. – 2017. – V. 105/5. – P. 332-334.
7. Effect of γ -(Fe,Ni) crystal-size stabilization in Fe-Ni-B amorphous ribbon / M.V. Gorshenkov, A.M. Glezer, O.A. Korchuganjva et.al. // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – V. 188/2. – P. 176-182.
8. Evolution of the stricter and mechanical properties of a FeNi alloy during annealing after megaplastic deformation. / A.M. Glezer, A.A. Tomchuk, V.I. Betekhtin et.al // Techn. Phys. Lett. – 2017. – V. 43/4. – P. 395-397.

Не является членом экспертного совета ВАК.

Ученый секретарь
совета Д 004.003.01

26.11.2018

Тя. Б. Чаршова

Чаршова

щего отдела
Н.Ф.Лямина

“26” 11 2018 г.