



**Институт механики
сплошных сред
Уральского отделения
Российской академии наук
филиал
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Пермского федерального
исследовательского центра
(ИМСС УрО РАН)**

614013, г. Пермь, ул. Ак. Королёва, 1
Тел. (342) 237-84-61, факс 237-84-87
E-mail: mvp@icmm.ru

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор Института механики
сплошных сред УрО РАН – филиала
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Пермского федерального
исследовательского центра Уральского
отделения Российской академии наук
Академик РАН
Матвеевко

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

о диссертационной работе Пушкина Марка Сергеевича “Процессы самоорганизации и эволюция микроструктуры при получении композитов на основе меди методом взрывного нагружения”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Пушкина М.С. посвящена получению и анализу фундаментальных закономерностей, определяющих поведение металлических систем и их структуру при сильном внешнем воздействии на примере сварки взрывом, включая выявление основных механизмов, контролирующих сцепление материалов.

Актуальность темы диссертации

В качестве объектов исследования выбраны композиты на основе меди. Некоторые из них, а именно Cu-Ta, Cu-Ti, привлекают особое внимание исследователей. К началу работы над диссертацией имелся ряд спорных вопросов, которые касались доказательства существования неоднородностей поверхности раздела, таких как выступы, всплески, зоны локального расплавления, влияния интенсификации режима на переход от плоской границы, содержащей всплески, к квазиволновой поверхности, содержащей одновременно всплески и волны, а также влияния взаимной растворимости исходных элементов на рельеф поверхности раздела и внутреннюю структуру зон локального расплавления. Для соединения медь-медь, которое заменялось на соединение медь-мельхиор, спорным являлся вопрос о наблюдении тех же элементов структуры рельефа, как и для разнородных пар. Диссертационная работа М.С. Пушкина направлена на выяснение этих вопросов, рассмотрение и анализ структуры и свойств различных композитов с единой точки зрения как материалов с неоднородным состоянием рельефа поверхности раздела, выяснение вопроса о связи рельефа с взаимной растворимостью исходных элементов. Результаты работы позволяют построить более полную картину процессов и структуры при сварке взрывом.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. В работе дано обоснование выбора и актуальности темы, определены направления, объекты и цели исследования. Работа изложена на 120 страницах, включая 4 таблицы и 63 рисунка. Список литературы включает 106 наименований.

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 объеме диссертации.

В первой главе представлен литературный обзор проблемы. Приводятся особенности процессов и структур, связанные 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.

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. Сварку выполняли при разных внешних параметрах, в качестве которых выбраны угол соударения γ и скорость точки контакта V_k . При выполнении исследований в работе использовались несколько методик, с помощью которых была получена информация о рельефе поверхности. Исследовались посредством СЭМ продольные и поперечные сечения образцов. Кроме того, для соединений Cu-Ta и Cu-Ti исследовался рельеф поверхностей тантала и титана после того, как была удалена медь. Приводятся данные о составе исходных материалов, размерах пластин, подготовленных для сварки. Кроме того, приводятся данные 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. Исследованы как плоские и волнообразные поверхности раздела, так и переходные состояния между ними. Для изучения таких состояний, которое ранее не проводилось, был рассмотрен набор соединений, получаемых при промежуточных режимах сварки. Исследовался рельеф поверхности раздела ниже нижней границы (НГ) окна свариваемости, на НГ и несколько выше НГ. При этом была выявлена последовательность изменяющихся структурных состояний поверхности раздела. Ниже НГ на поверхности тантала отчетливо видны изолированные выступы. Выступы образованы тем из исходных материалов, который обладает большей твердостью и более высокой температурой плавления. В данном случае это тантал. Переход из области ниже НГ к области непосредственно вблизи нее сопровождается драматическим изменением рельефа поверхности: отдельные выступы сменяются на регулярное распределение контактирующих друг с другом выступов. Хотя выступы являются твердофазными, больше всего они похожи на всплески на воде. 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 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 последующей интенсификации режима и переходе к центру окна свариваемости наблюдается достаточно совершенная волнообразная поверхность. В данной главе показано, что

именно квазиволновая граница является одной из возможных зон риска для соединения Cu-Ta. 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.

Четвертая глава посвящена изучению сварного соединения Cu-Ti. У данной сварной пары, в отличие от соединения Cu-Ta, имеет место довольно высокая взаимная растворимость исходных материалов, которая предопределяет протекание интерметаллических реакций внутри зоны расплава. 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.

Были обнаружены зоны расплавленной (затем застывшей) меди, которая содержит не испытывавшие расплавления частицы тантала, а также отдельные частицы интерметаллидов. Приведены дифрактограммы, которые указывают на присутствие интерметаллида Cu_3Ti . Проведенный анализ показывает также, что зонами риска для соединения Cu-Ti, т.е. областями с пониженной прочностью и склонностью к разрушению, как раз и является образование 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, которые сами по себе весьма хрупкие.

В случае Cu-Ti, для каждого режима была найдена фрактальная размерность в соответствие с подводимой энергией. Было показано, что правило: «при интенсификации режима сварки фрактальная размерность падает» справедливо и для соединения Cu-Ti. Принимая во внимание совокупность различных факторов, сделан вывод, 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. В результате физических процессов, реализующихся при сварке взрывом, для однородной пары становится меньше. Исследование пары медь-медь затруднено из-за неразличимости материалов. Вместо этой пары 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 позволяет приближённо считать их однородными. Для всех исследуемых режимов сварки наблюдаются выступы на границе раздела. Также наблюдаются многочисленные зоны локального расплавления. Выступы, как и зоны локального расплавления, формируют тонкую структуру контактной границы, как и в случае соединений Cu-Ta, Cu-Ti. Для соединения медь-мельхиор, как и для других рассмотренных здесь соединений, были также обнаружены все три типа границ: волнообразная, квазиволновая и плоская. 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, возможно, обусловлена тем фактом, что для сильно неоднородных пар (Cu-Ta, Cu-Ti) один из материалов (Ta или Ti) является существенно более твердым и хрупким. Это приводит к преимущественной фрагментации с возникновением выступов отдельных частиц твердой фазы в более пластичной.

В заключение диссертации приводятся **выводы** по всем результатам работы. Впервые установлено закономерное изменение микроструктуры соединений Cu-Ta, Cu-Ti, Cu-Cu при интенсификации режима сварки: на первом этапе изолированные выступы, затем их консолидация и образование всплесков, далее формирование квазиволновой границы, а затем волнообразной границы. Излагаются результаты исследования зон локального расплавления. Они представляют собой дисперсионно упрочнённую суспензию (Cu-Ta), они содержат частицы интерметаллидов (Cu-Ti), они представляют собой разбавленный твёрдый раствор никеля в меди (медь-мельхиор). Обнаружены различные зоны риска: квазиволновая граница (Cu-Ta); образование интерметаллидов на поверхности раздела (Cu-Ti). Сформулирован фрактальный подход для сравнения рельефа контактных поверхностей, полученных при сварке взрывом.

Научная новизна результатов диссертационной работы

В качестве новых и наиболее важных результатов работы можно отметить следующие:

1. Экспериментально доказана последовательность событий, определяющих эволюцию микроструктуры сварного соединения при интенсификации режима сварки. Эта последовательность включает в себя возникновение изолированных выступов, их объединение в так называемые «всплески», формирование квазиволновой границы, последующее образование волнообразной границы.

2. Для объяснения причин формирования и особенностей рельефа различных поверхностей раздела предложен подход, использующий теорию самоорганизации, включая такие процессы как фрагментация типа дробления, локальное расплавление, формирование выступов на поверхности раздела. Проанализировано несколько новых механизмов сцепления материалов, связанных, в частности, не только с переходом от всплесков к волнам, но и с увеличением изрезанности поверхности всплесков и волн.

3. Найдены зоны риска, которые могут быть опасными для сцепления материалов. Показано, что зоной риска может быть как квазиволновая граница (Cu-Ta), так и область локального расплавления, содержащая интерметаллиды (Cu-Ti).

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.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием аттестованных образцов и современных методов исследования, проведением измерений на сертифицированном оборудовании, согласием и непротиворечивостью результатов с данными, опубликованными в литературе другими авторами. Основные выводы диссертационной работы изложены в статьях, опубликованных в реферируемых научных журналах из списка ВАК.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Значимость для фундаментальных исследований заключается в том, что полученные результаты позволяют лучше понять природу физических явлений, происходящих в материалах в условиях взрывного нагружения, и указать на пути оптимизации использования таких процессов для прикладных целей. Было достигнуто значительное продвижение в решении таких спорных вопросов, как роль взаимной растворимости исходных материалов, роль расплавления

(локального или захватывающего значительную часть поверхности раздела), влияния на прочность соединения образования интерметаллидов при сварке взрывом. Вопрос о том, какие из переходов между элементами рельефа поверхности раздела, такими как выступ-всплеск, всплеск-квазиволна-волна “выживают” в тех или иных сварных соединениях, остается открытым.

В качестве замечаний/пожеланий по диссертационной работе можно отметить следующие:

1. В диссертации, посвященной неоднородным состояниям в композитах, конспективно рассмотрены вопросы зарождения неоднородностей, их пространственно-временная кинетика, является ограниченным сравнение новых данных с известными ранее. Проводится сравнение результатов, полученных для трех пар Cu-Ta, Cu-Ti, Cu-Cu, но отсутствует сравнение с соединениями на другой основе, как имеющими, так и не имеющими взаимной растворимости исходных элементов, а также с принципиально другими соединениями металл-интерметаллид. Целесообразной является оценка изменений параметров сварки, влияющим на структурно-обусловленные формы поверхности раздела: превращение изолированных выступов в группы с последующим превращением во всплески – коллективный процесс, начало которого определяется параметрами взаимодействия в предшествующих структурах. Квазиволновая поверхность содержит и волны, и всплески, поэтому закономерен вопрос о том, насколько универсальными являются полученные в диссертации закономерности.
2. Содержательным результатом является установленные зоны риска, которые могут негативно влиять на сцепление материалов, например, квазиволновая граница для соединения Cu-Ta и область локального расплавления, содержащая интерметаллиды, для соединения Cu-Ti. Однако, сварные соединения, которые весьма многочисленны и имеют разнообразную структуру и свойства, могут иметь и другие зоны риска. Достаточно упомянуть соединение однородной пары материалов, таких, например, как изучаемое в диссертации соединение медь-медь, для которого зоны риска, по-видимому, не будут совпадать с упоминаемыми выше.
3. В качестве пожелания для дальнейшего продолжения исследований хотелось бы указать на необходимость более детального изучения вопроса о том, какие физические механизмы способствуют самоорганизации процессов и образованию всплесков и волн, т. е. появлению в системе элементов с различными характерными размерами при различных условиях сварки взрывом.

Сделанные замечания, однако, не снижают общую положительную оценку работы, ее научную и практическую значимость.

Общая оценка диссертационной работы

Полученные в диссертационной работе результаты соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Содержание диссертации соответствует пункту 3. «Изучение экстремального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния» и пункту 1. «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» Паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа выполнялась в рамках гранта РФФИ №16-32-00235 мол_а, гранта РФФИ №17-02-00025, проекта РНФ №14-29-00158, программы УрО РАН 15-17-2-18; стипендии Президента Российской Федерации 2017. государственного задания ФАНО по теме «Деформация» (номер госрегистрации 01201463327), что подчеркивает актуальность и значимость проводимых исследований и полученных результатов.

Личный вклад автора в диссертационную работу не вызывает сомнения. Работа достаточно хорошо апробирована, а её результаты докладывались на многих российских и международных конференциях, школах, семинарах и симпозиумах. Основные результаты по теме диссертационной работы М.С. Пушкина опубликованы в 9 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, которые входят в Перечень ВАК и индексируются в системе Web of Science, а также в одной коллективной монографии.

Автореферат диссертации и публикации автора полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Заключение


Резюмируя вышесказанное, можно констатировать, что диссертация Пушкина М.С. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание эволюции микроструктуры композитов, получаемых методом взрывного нагружения.

Диссертационная работа Пушкина М.С. удовлетворяет требованиям п.9 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

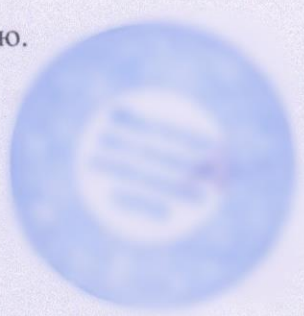
Таким образом, диссертационная работа «Процессы самоорганизации и эволюция микроструктуры при получении композитов на основе меди методом взрывного нагружения» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Пушкин Марк Сергеевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Настоящий отзыв обсуждён и утверждён на заседании семинара Института механики сплошных сред УрО РАН (протокол № 22/18 от 14.11.2018).

Заведующий лабораторией
Физических основ прочности ИМСС УрО РАН
доктор физико-математических наук,
профессор Наймарк Олег Борисович

 / Наймарк О.Б.

Личную подпись О.Б.Наймарка заверяю.
Учёный секретарь ИМСС УрО РАН
кандидат физ.-мат.наук

 / Н.А.Юрлова

С отзывом ознакомлен 26.11.2018

(Пушкин М.С.)

Сведения о ведущей организации
 по диссертационной работе Пушкина Марка Сергеевича на тему «Процессы самоорганизации и эволюция микроструктуры при получении композитов на основе меди методом взрывного нагружения»
 представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
 по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра (ИМСС УрО РАН)
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ИМСС УрО РАН
Почтовый индекс, адрес организации	614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1
Веб-сайт	https://www.icmm.ru/
Телефон	(342) 237-84-61
Адрес электронной почты	mvp@icmm.ru
Список основных публикаций работников структурного подразделения, в котором будет готовиться отзыв, по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<p>1. Соковиков, М.А. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации / М.А. Соковиков, Д.А. Билалов, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.А. Плехов, А.И. Терехина, О.Б. Наймарк // ПЖТФ. – 2014. – Т. 40, вып. 23. – С. 82-88.</p> <p>2. Bayandin, Yu.V. Numerical simulation of multiscale damage-failure transition and shock wave propagation in metals and ceramics / Yu.V. Bayandin, N.V. Saveleva, A.S. Savinykh, O.B. Naimark // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – V. 500, part 15. – P. 152001.</p> <p>3. Наймарк, О.Б. Кинетика накопления дефектов и дуальность кривой Веллера при гигацикловой усталости металлов / О.Б. Наймарк, О.А. Плехов, В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, вып. 3. – С. 89-93.</p> <p>4. Петрова, А.Н. Механические свойства и особенности диссипации энергии в ультрамелкозернистых алюминиевых сплавах АМЦ и В95 при динамическом сжатии / А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, О.А. Плехов, О.Б. Наймарк, Е.В. Шорохов // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, вып. 7. – С.</p>

5. Савельева, Н.В. Модель формирования откола / Н.В. Савельева, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 3. – С. 210-221.
6. Сокоиков, М.А. Неустойчивость пластического сдвига и локализация пластической деформации при динамическом нагружении как результат структурно-кинетических переходов в системе мезодефектов / М.А. Сокоиков, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.А. Плехов, Е.А. Ляпунова, А.Н. Петрова, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк, И.Г. Бродова // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 2. – С. 154-175.
7. Hwang, Y.-M. Finite element analyses of extrusion with a two stage die and manufacturing of gradient micro-structures / Y.-M. Hwang, S. Alexandrov, Y.-R. Jeng, T.-H. Huang, O.B. Naimark // Key Engineering Materials. – 2013. – V. 528. – P. 23-31.
8. Петрова, А.Н. Влияние размера зерна на механизмы разрушения алюминиевого сплава В95 / А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, И.Г. Ширинкина, Е.А. Ляпунова, О.Б. Наймарк // Физика металлов и металловедение. – 2012. – Т. 113, № 7. – С. 767-772.
9. Ляпунова, Е.А. Исследование морфологии многомасштабных дефектных структур и локализации пластической деформации при пробивании мишеней из сплава А6061 / Е.А. Ляпунова, А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, О.Б. Наймарк, М.А. Сокоиков, В.В. Чудинов, С.В. Уваров // ПЖТФ. – 2012. – Т. 38, вып. 1. – С. 13-20.
10. Оборин, В. Длиннокорреляционные многомасштабные взаимодействия в ансамблях дефектов и оценка надежности алюминиевых сплавов при последовательных динамических и усталостных нагружениях / В. Оборин, М. Банников, О. Наймарк, С. Froustey // ПЖТФ. – 2011. – Т. 37, вып. 5. - С. 105-110.
11. Plekhov O., Naimark O., Narykova M., Kadomtsev A., Betehtin V. The study of a defect evolution in iron under fatigue loading in gigacyclic fatigue regime // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2016. – V. 35. – P. 414-423.
- 12 Bannikov M.V., Naimark O.B., Oborin V.A. Experimental investigation of crack initiation and propagation in high and gigacycle fatigue in titanium alloys by study of morphology of

fracture // *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*. – 2016. – V. 35. – P. 51-56.

13. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Yu., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands // *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*. – 2016. – V. 38. – P. 280-287.

14. Naimark O.B., Bayandin Yu.V., Zoher M.A. Collective properties of defects, multiscale plasticity, and shock induced phenomena in solids//*Физическая мезомеханика.*-2017.- Т.20.- №1.- С.14-32.

15. Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Наймарк О.Б. Формирование упруго-пластических фронтов и откольное разрушение в сплаве АМг6 при ударных воздействиях // *Письма в ЖТФ.* – 2018. – Т.44, Вып. 18. – С. 39-46.

Верно:

Руководитель организац

Матвеевко В.П.

«19» ноября 2018 г.