

На правах рукописи



Ушанова Элина Артуровна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ЗОНЕ
КОНТАКТА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ**

специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, член-
корреспондент РАН, профессор
Рыбин Валерий Васильевич

Официальные оппоненты: **Глезер Александр Маркович**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Национальный
исследовательский технологический университет
«МИСиС», ведущий научный сотрудник

Мещеряков Юрий Иванович
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН,
заведующий лабораторией «Физики разрушения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Волгоградский
государственный технический университет»

Защита состоится 7 октября 2015 г. в 16 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.229.29 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ
ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на
сайте: <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.29,
к. ф.-м. н., доцент



Ермакова Наталья Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современному машиностроению необходимы конструкционные материалы с повышенными физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками (удельной прочностью и жесткостью, жаропрочностью, износостойкостью, высоким сопротивлением усталостному и коррозионному разрушению, способностью работать в условиях высоких и криогенных температур), а также с хорошей технологичностью изготовления и низкой себестоимостью их производства. Гомогенные металлы и сплавы не отвечают комплексу этих требований. Реализовать его можно, перейдя к слоистым композитам. Сварка взрывом, в силу присущих ей особенностей, является одним из наиболее эффективных, а в ряде случаев и единственно возможным способом создания высококачественных слоистых композитов из разнородных металлических материалов с различающимися физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками.

Основным требованием, определяющим надежность и долговечность полученных сваркой взрывом металлических слоистых композитов, является сплошность и высокая прочность сварных соединений. Очевидно, что решающую роль в образовании физического контакта и прочного сцепления листовых заготовок играет пластическая деформация, локализованная в зоне контакта металлических пластин. По этой причине изучению особенностей пластического течения металла в приконтактной зоне уделяется особое внимание. К началу работ над диссертацией было известно, что пластическая деформация металла неоднородно распределена по сечению сварного соединения и резко нарастает по мере приближения к поверхности контакта свариваемых пластин [1 – 3]. Максимальная локализация пластической деформации, достигает по оценкам Лысака В.И., Кузьмина С.В. [1] сотен процентов и наблюдается в узкой, толщиной 0,1 – 0,2 мм, приконтактной зоне (УКЗ). До сих пор, однако, остается непонятным, как собственно происходит образование УКЗ, какие физические механизмы пластической деформации и структурообразования действуют в этой зоне и, особенно, какие структурные состояния деформационного происхождения формируются непосредственно в зоне контакта.

В связи с этим весьма актуальным представляется изучение структур деформационного происхождения в УКЗ. Однако основная информация, накопленная к настоящему времени на эту тему, получена методами оптической металлографии, что из-за малой разрешающей способности, а также из-за невозможности исследовать этими методами кристаллографические и морфологические характеристики структур деформационного происхождения явно недостаточно.

По этой причине особую ценность приобретают попытки использовать для исследования структурообразования в УКЗ высокоразрешающие методы

электронной микроскопии (ПЭМ, EBSD-анализ). К настоящему времени известно несколько работ этого направления [например, 4 – 6]. К сожалению, в них отсутствует привязка расположения участков, на которых изучалась структура УКЗ, относительно поверхности контакта. В результате полученные данные не позволяют судить о том, как образовались наблюдаемые структуры деформационного происхождения и как структуры такого рода эволюционируют в УКЗ по мере приближения к поверхности контакта. Подобные исследования серьезно сдерживаются отсутствием надежных методов пробоподготовки, позволяющих изготавливать качественные шлифы и фольги для проведения структурных исследований сильнодеформированной неоднородной УКЗ.

В связи с этим представляется актуальным:

- усовершенствовать методики пробоподготовки с тем, чтобы они позволяли получать качественные объекты для исследований структур деформационного происхождения на любом участке УКЗ с обязательной привязкой координат расположения данного участка относительно поверхности контакта;

- прицельно приготовить качественные объекты для исследования структур деформационного происхождения в предварительно выбранных участках УКЗ, в том числе в области, непосредственно прилегающей к поверхности контакта, и на них провести систематические исследования методами ПЭМ и EBSD-анализа;

- идентифицировать физические механизмы структурообразования в зонах, непосредственно примыкающих к поверхности контакта и обеспечивающих там сцепление металла в условиях сварки взрывом, а также сформулировать научно-обоснованные рекомендации по усовершенствованию технологии сварки взрывом.

Целью диссертационной работы является исследование физической природы и фундаментальных закономерностей процесса образования структур деформационного происхождения при пластической деформации в условиях сверхскоростного нагружения при сварке взрывом.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать надежный метод прицельного приготовления качественных объектов для исследования структур деформационного происхождения на предварительно выбранных участках УКЗ.

2. На макро-, мезо- и микроуровнях провести систематические исследования морфологических и кристаллогеометрических особенностей и закономерностей строения сформировавшихся в приконтактных зонах структурных состояний.

3. Исследовать эволюцию структур деформационного происхождения по мере приближения к поверхности контакта материалов, полученных сваркой взрывом.

4. Использовать компьютерное моделирование экспериментальных спектров разориентировок для определения вкладов различных механизмов структурообразования в формирование структур деформационного происхождения в УКЗ.

Научная новизна

1. Методами оптической металлографии, просвечивающей электронной микроскопии и EBSD-анализа проведено систематическое исследование структур деформационного происхождения на макро-, мезо- и микроструктурных уровнях в УКЗ соединения медь М1 – медь М1, полученного сваркой взрывом.

2. Показано, что при сварке взрывом в УКЗ происходит anomalно большая по величине локализация пластического течения, которое реализуется в виде образования и развития специфических структурных элементов макроуровня пластической деформации – вихреподобных пластических струй.

3. Показано, что пластические струи представляют собой набор из множества искривленных мезополос деформации, каждая из которых состоит из разориентированных фрагментов со средним поперечным размером 200 нм.

4. Выявлены закономерности эволюции структур деформационного происхождения по мере приближения к поверхности контакта.

5. Обнаружены и классифицированы механизмы формирования сильноразориентированных структур деформационного происхождения, действующих в УКЗ соединения медь М1 – медь М1: 1) фрагментация объёма, 2) динамическое деформационное двойникование, 3) фрагментация большеугловых границ общего типа и двойниковых границ, 4) динамическая рекристаллизация.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит в том, что полученные в ней результаты, касающиеся эволюции структур деформационного происхождения при сварке взрывом, имеют фундаментальную ценность для построения физики пластической деформации кристаллических твердых тел в экстремальных условиях нагружения. Практическая значимость работы состоит в том, что полученные данные являются научной основой дальнейшего совершенствования технологии создания неразъемных соединений металлических материалов методом сварки взрывом.

Методология и методы исследования. Для исследования морфологических и кристаллогеометрических особенностей структур деформационного происхождения в соединениях, полученных сваркой взрывом, использовали методы оптической металлографии, растровой (EBSD-анализ) и просвечиваю-

щей (метод одиночных рефлексов, в том числе) электронной микроскопии. Для исследования высокоразрешающими методами электронной микроскопии структур деформационного происхождения на предварительно выбранных участках узкой приконтактной зоны сварного соединения был разработан метод прицельного приготовления качественных шлифов и фольг (на основе технологии ионной полировки и прецизионной вырезки сфокусированным ионным пучком). Компьютерное моделирование спектров разориентировок проводили в среде Matlab.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Экспериментальные данные, подтверждающие многоуровневый характер и особенности пластической деформации на макро-, мезо- и микро-структурных уровнях в УКЗ соединения медь М1 – медь М1, полученного сваркой взрывом.

2. Особенности аномальной локализации пластического течения металла в УКЗ, реализуемого в виде образования и развития вихреподобных пластических струй.

3. Закономерности эволюции структур деформационного происхождения в пределах УКЗ по мере приближения к поверхности контакта сварного соединения медь М1 – медь М1.

4. Механизмы формирования сильноразориентированных структур деформационного происхождения, действующих в УКЗ полученного сваркой взрывом соединения медь М1 – медь М1: 1) фрагментация объема, 2) динамическое деформационное двойникование, 3) фрагментация БУГ общего типа и двойниковых границ, 4) динамическая рекристаллизация.

Достоверность результатов экспериментальных исследований обусловлена: а) использованием современных методов структурного анализа (оптической металлографии, растровой электронной микроскопии (EBSD-анализа, в том числе), метода одиночных рефлексов в просвечивающей электронной микроскопии, б) воспроизводимостью результатов эксперимента, в) сравнением с известными литературными данными. Достоверность результатов, полученных с помощью компьютерного моделирования спектров разориентировок, обеспечена применением известных и апробированных методик и их физической непротиворечивостью.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и научных семинарах: IX конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (Санкт-Петербург, ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2010); Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы-2010» (Уфа, 2010); II-я Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные про-

блемы металловедения» (Пицунда, 2011); XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Волгоград, 2011); // Bulk nanostructured materials: from fundamentals to innovations BNM-2011 (Уфа, 2011); // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металловедов-термистов (Магнитогорск, 2012); XX Петербургские чтения по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2012); XI конференция молодых ученых и специалистов (Санкт-Петербург, ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2012); Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы-2012» (Уфа, 2012); Международная научно-техническая конференция «Нанотехнологии функциональных материалов» (Санкт-Петербург, 2014); XIII Международной конференции «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов – ДСМСМС-2014» (Екатеринбург, 2014); Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы-2012» (Уфа, 2014); VIII Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2014).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 23 научно-технических публикациях, включая 8 статей в изданиях из перечня рецензируемых журналов, рекомендуемых ВАК РФ.

Личный вклад автора состоит в подготовке образцов, разработке методик прицельного приготовления образцов из УКЗ, проведении микроструктурных исследований методами оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, в обработке результатов измерений, в планировании эксперимента, в обсуждении и интерпретация полученных результатов, а также в написании тезисов докладов и статей. В работе использованы результаты компьютерного моделирования, полученные совместно с доцентом, к. ф.-м. н. Золоторевским Н.Ю.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 131 наименования. Общий объем диссертации 135 страниц, в том числе 49 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость работы, а также отражены основные положения, выносимые на защиту, и дан краткий обзор содержания глав диссертации.

Глава 1 Обзор литературы

Обзор литературы состоит из трех параграфов.

В первом параграфе обзора рассмотрены существующие представления о механизмах, обеспечивающих сцепление металла при сварке взрывом. Показано, что сцепление металлов на поверхности контакта в большинстве работ рас-

считается, как следствие диффузионного перераспределения химических элементов в приконтактной зоне, которое резко активизируется в результате локального повышения температуры в приповерхностных слоях за счет интенсивно протекающей там пластической деформации. При этом рассматриваются три различных варианта. Первый относится к случаю, когда интенсивность пластической деформации такова, что в УКЗ вблизи поверхности контакта происходит локальное расплавление металла. В результате взаимная диффузия элементов в приконтактной зоне осуществляется аномально быстро, поскольку протекает в жидкой фазе, так что после затвердевания на поверхности контакта разнородных материалов образуется высокопрочный слой металла переменного химического состава [7, 8]. Если интенсивность пластической деформации в УКЗ недостаточна для расплавления, то взаимное проникновение химических элементов происходит за счет диффузии в твердой фазе. При этом скорость ее также может быть аномально большой, как за счет высоких (предплавильных) температур, так и за счет подключения механизма трубчатой диффузии, если в приконтактной зоне реализуется высокая плотность дислокаций [9]. Третья группа моделей также базируется на представлениях об образовании жидкой фазы. Однако в данном случае предполагается, что она появляется на границе не за счет расплавления приконтактных областей металла, а за счет того, что между свариваемыми пластинами оказывается зажатой жидкоподный металл обратной кумулятивной струи [10].

Во втором параграфе обзора рассмотрены работы, посвященные измерению величины и характера распределения пластической деформации (ПД) металла в соединениях, полученных сваркой взрывом [например, 1]. Для измерения величины ПД применялись многочисленные и порой весьма изощренные методики, в частности методы слоистых модельных вставок и координатных сеток. Показано, что по мере приближения к поверхности контакта величина ПД резко нарастает и достигает сотен процентов. Отмечено также, что используемые методики имеют локальность измерения ~ 30 мкм, что не позволяет измерять величину ПД в непосредственной близости от поверхности контакта, то есть в тех местах, где фактически происходит сцепление свариваемых пластин.

В третьем параграфе обзора рассмотрены результаты немногочисленных работ, в которых исследовались структуры деформационного происхождения в УКЗ сварных соединений, выполненные с помощью методов электронной микроскопии [4 – 6 и др.]. В этих работах показано, что в узкой приконтактной зоне образуются типичные фрагментированные структуры, сформировавшиеся там в результате интенсивной пластической деформации. Однако, где конкретно относительно поверхности контакта расположены участки с такой структурой, и как эволюционирует структура от исходной, расположенной вдали от поверхности контакта, до фрагментированной остается не ясным. Очевидно, это сле-

дует связать с отсутствием до последнего времени надежных методик приготовления качественные шлифов и фольг с конкретной привязкой к поверхности контакта сварного соединения.

На основе анализа литературных данных сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Глава 2 Материалы и методы исследования

Исследовали структуру модельного соединения двух листов технической чистой меди (M1 – M1), полученного сваркой взрывом по режиму: скорость соударения $V_c = 500$ м/с, скорость контакта $V_k = 2120$ м/с, угол соударения $13,4^\circ$. Толщина верхней (метаемой) и нижней (неподвижной) пластин составляли 3 мм. Дополнительно исследовали структуру соединений: хромо-никелевый сплав ХН78Т – сталь 09Г2С, медь M1 – M1 (наноструктурированная фольга) – сталь 09Г2С.

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Axio Observer A1m (Carl Zeiss). Статистику распределения зёрен и фрагментов по размерам, степени их вытянутости и разориентировкам изучали на фольгах на растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D FEG, используя стандартные методики EBSD анализа. Для детального исследования особенностей структурных состояний строили карты: IQ+IPF (Image Quality + Inverse Pole Figure) – карту ориентировок, IQ + UGC (Image Quality + Unique Grain Color) – карту зерен, GB+CSL (Grain Boundary + Coincident Site Lattice) – карту двойников, КАМ (Kernel Average Misorientation) – карту напряженного состояния, а также гистограммы распределения зерен по размерам и разориентировкам (состоящим из 32 пакетов с шагом 2°). Шаг сканирования варьировали в диапазоне 50 – 600 нм, угол толерантности при построении карт выбирали 2° . Разориентировки между кристаллитами, а также дислокационные структуры внутри зерен, двойников и фрагментов исследовали на фольгах на высокоразрешающем просвечивающем электронном микроскопе Tecnai S-Twin G2 30 с использованием метода одиночных рефлексов.

Подробно описана разработанная в диссертации методика прицельного приготовления объектов для исследования участков с характерными размерами $\sim 0,1$ мм, что соответствует толщине УКЗ и поэтому гарантирует привязку исследуемого участка к поверхности контакта с той же точностью. Внутри этого участка точность привязки характерного элемента гораздо выше и определяется точностью разрешения электронного микроскопа. В результате этого разработанная методика позволяет получать качественные образцы для исследования эволюции структуры от исходной до сильнодеформированной, включая область, непосредственно прилегающую к поверхности контакта свариваемых материалов. Примеры использования разработанной методики представлены для разнородных соединений, полученных сваркой взрывом: хромо-никелевого

сплава ХН78Т со сталью 09Г2С и технически чистой меди М1 со сталью 09Г2С через наноструктурированную фольгу М1.

Глава 3 Многоуровневый характер пластической деформации в узкой приконтактной зоне при сварке взрывом

В главе 3 проведено систематическое исследование морфологических и кристаллогеометрических особенностей структур деформационного происхождения на макро-, мезо и микроструктурных уровнях в узкой приконтактной зоне соединения медь М1 – медь М1, полученного сваркой взрывом.

Установлено, что при столкновении двух пластин специфика пластического течения в УКЗ при сварке взрывом проявляется в совместной реализации трёх иерархически соподчиненных уровней деформации (макро-, мезо- и микро-). В масштабах, соразмерным сотням и более мкм (макроуровень), пластическое течение металла, помимо сдвиговых, включает в себя крупномасштабные ротационные моды, которые вызывают неупругое перераспределение металла вдоль фронта волны и формируют характерные вихри. На мезоуровне, т.е. в масштабах, соразмерных нескольким мкм, наблюдается явление фрагментации, при котором пластическое течение осуществляется за счет ротационно-сдвиговых процессов, локализованных в масштабах, сравнимыми с размерами фрагментов. Внутри фрагментов, в масштабах, соразмерных ~100 нм (микроуровень), элементарными актами пластической деформации являются трансляционные сдвиги, осуществляемые движением индивидуальных решёточных дислокаций.

Макроуровень. На рисунке 1 а представлена металлографическая структура периодически повторяющегося элемента УКЗ, а на рисунке 1 в – схема его строения. Толстой линией (сплошной и пунктирной) выделена линия поверхности контакта (ПК) сваренных взрывом пластин. На продольно-поперечном срезе она имеет периодическую форму, которую можно описать длиной волны $\lambda = 285$ мкм и амплитудой $a = 60$ мкм. Показано, что пластическая деформация металла неоднородно распределена по сечению сварного соединения и резко нарастает по мере приближения к поверхности контакта свариваемых пластин. На участках, непосредственно прилегающих к поверхности контакта, обнаружено явление аномальной локализации пластического течения металла, которое на макроуровне реализуется в виде образования и развития специфических структурных элементов – вихреподобных пластических струй (на рисунке 1 в они выделены затемнением). Пластические струи дискретны, имеют конечную длину равную длине волны λ и ширину ~50 мкм. Струи зарождаются над каждой вершиной волнообразной линии ПК, примерно в середине своей длины они раздваиваются и вихреобразно закручиваются в двух противоположных направлениях, причем в вершине образующихся вихрей происходит локальное расплавление металла. На рисунке 1 б видно, что пластические струи не имеют

выделенной границы, отделяющей их от материала верхней или нижней пластины. Это показывает, что пластическая струя не является зажатой между пластинами обратной кумулятивной струей, а формируется за счет локальной потери пластичности материала в приконтактной области. Установлено, что внутри пластических струй течение материала происходит дискретно. Каждая пластическая струя состоит из набора параллельных и тонких полос деформации (рисунок 1 б).

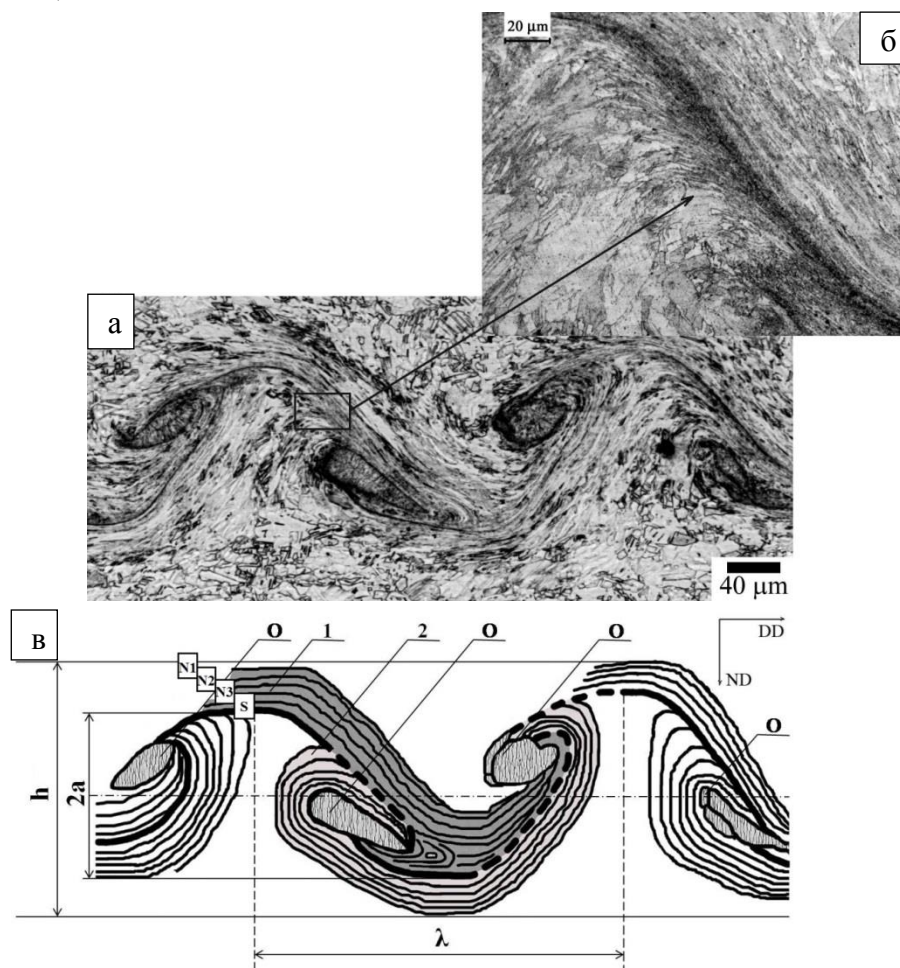


Рисунок 1 – Структура узкой приконтактной зоны сварного соединения медь М1 – медь М1: а – оптическая металлография (б – увеличенное изображение участка УКЗ); в – схема строения (толстой линией выделена поверхность контакта пластин меди): 1, 2 – пластические струи, О – участок оплава; h – ширина УКЗ, $2a$ – высота волны, λ – длина волны. N1, N2, N3, S – участки УКЗ, исследованные методами электронной микроскопии. DD – направление детонации, ND – направление, перпендикулярное направлению детонации

Мезоуровень. На рисунке 2 представлена полученная методом EBSD карта ориентировок на участке пластической струи, отмеченном на рисунке 1 в прямоугольнике S. Видно, что каждая пластическая струя состоит из искривленных и параллельных между собой мезополос деформации толщиной 5 мкм. По толщине, длине и направлению они соответствуют структурным образованиям, выявляемым внутри пластических струй с помощью оптической металлографии. Каждая мезополоса состоит из разориентированных фрагментов со средним поперечным размером 0,2 мкм.

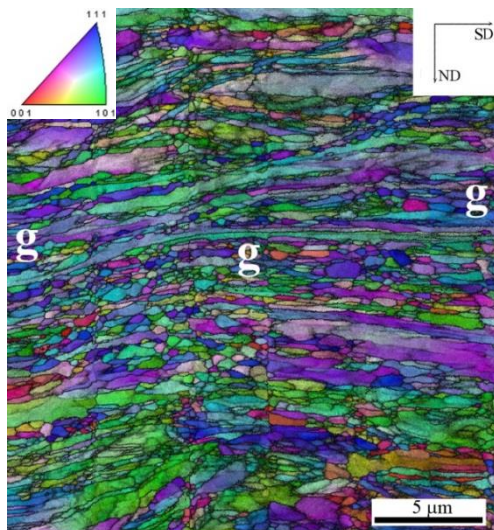


Рисунок 2 – Ориентационная карта участка пластической струи (с участка, отмеченного прямоугольником S на рисунке 1 в): g-g-g – граница между верхней и нижней пластинами. SD – направление, параллельное локальному участку поверхности контакта, ND – направление, перпендикулярное SD

Микроуровень. Методами ПЭМ исследованы участки, соответствующие ранним и поздним стадиям развития фрагментированной структуры внутри УКЗ. На рисунке 3 а изображены три микрополосы, разориентированные между собой на углы $\sim 5^\circ$, поперечные их размеры составляют $\sim 0,2$ мкм. Микрополосы формируются на фоне слабоориентированной дислокационной ячеистой структуры из дипольных конфигураций и типичны для начальных стадий развитой пластической деформации и фрагментации. На рисунке 3 б представлена типичная фрагментированная структура, соответствующая поздним стадиям развитой пластической деформации внутри пластической струи. Поперечные размеры фрагментов по-прежнему близки к $0,2$ мкм. В границах фрагментов наблюдается высокая плотность дислокаций. В объеме фрагментов ячеистая структура отсутствует. Разориентировки между фрагментами (обозначенными на рисунке 3 б цифрами 1, 2, 3, 4, 5) резко увеличились и превышают 15° .

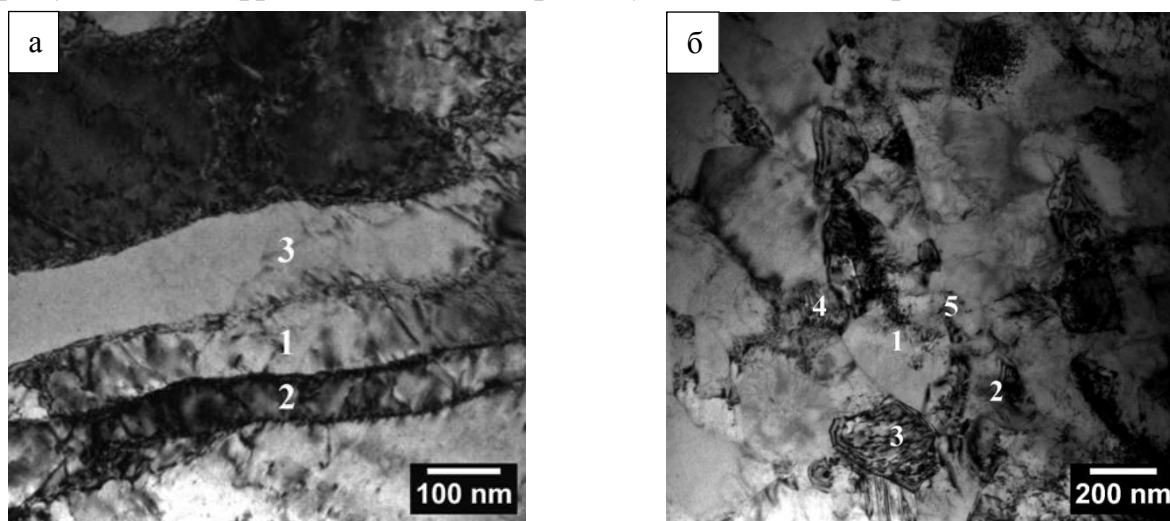


Рисунок 3 – Структура (соответствующая а – начальным, б – поздним стадиям развитой пластической деформации) внутри УКЗ при наблюдении методами ПЭМ

Глава 4 Эволюция структур деформационного происхождения по мере приближения к поверхности контакта материалов, полученных сваркой взрывом

Подробно проанализированы морфологические и кристаллогеометрические особенности структур деформационного происхождения на участках, расположенных на различных расстояниях от поверхности контакта (рисунок 1 в) и потому находящихся на разных этапах процесса формирования пластической струи. Участок R (референтная структура) находится на расстоянии $\sim 1,5$ мм от поверхности контакта; участки – N1, N2, N3 расположены внутри узкой приконтактной зоны, но за пределами пластической струи; участок S находится внутри пластической струи. Кроме того проанализирован участок O, расположенный внутри вихря, замыкающего пластическую струю.

Показано, что референтная структура представляет собой типичную крупнозернистую структуру листовой заготовки меди с большой плотностью границ двойников отжига (50 %) (рисунок 4 а). Внутри зерен и двойников отжига наблюдается слаборазориентированная ячеистая структура, хорошо известная из курсов классической физики пластической деформации. На фоне сохраняющейся ячеистой структуры отмечены единичные случаи зарождения микродвойников деформации, которые представляют собой тонкие стамескообразной формы пластины толщиной 1 мкм и углом в вершине 30° . Кроме того, в отдельных тройных стыках границ зёрен наблюдаются элементарные акты динамической рекристаллизации в виде зарождения двойников отжига (с характерными размерами 0,2 – 1 мкм), приводящих вблизи них к разрушению ячеистой структуры.

На участке N1, соответствующему началу УКЗ, выделены два качественно новых процесса структурообразования (рисунок 4 б).

1) Образование тонких протяжённых и изогнутых пластинок двойников деформации, оканчивающихся в теле зёрен.

2) Формирование структур, связанных с началом явления фрагментации. Выделены три различных типа фрагментации:

- фрагментация вблизи изломов и стыков большеугловых границ зёрен,
- фрагментация двойников деформации,
- фрагментация границ двойников отжига и одиночных границ.

По мере приближения к поверхности контакта (на участках N2, N3) перечисленные особенности структурообразования усиливаются (рисунок 4 в, г).

Выявленные на участках N1, N2, N3 особенности эволюции структур непосредственно вблизи поверхности контакта (участок S) приводят к формированию качественно нового элемента макроуровня, названного нами пластической струей. На мезоуровне пластическая струя представляет собой набор искривлённых и параллельных между собой мезополос деформации (рисунок

2), а на макроуровне проявляется, как область локальной потери пластической устойчивости течения материала.

Участок О (расположенный внутри вихря, замыкающего пластическую струю) представляет собой достаточно крупную область мелкозернистого рекристаллизованного металла, на которой отчётливо проявляются следы вихреобразного пластического течения, сходящегося к центру вихря, внутри которого может происходить либо рекристаллизация фрагментированной структуры, либо расплавление и последующая кристаллизация металла (рисунок 5 а, в).

Классифицированы парциальные механизмы формирования сильноориентированных структур деформационного происхождения, действующих в УКЗ полученного сваркой взрывом соединения медь М1 – медь М1: 1) динамическое деформационное двойникование, 2) фрагментация БУГ общего типа и двойниковых границ, 3) фрагментация объёма, 4) динамическая рекристаллизация.

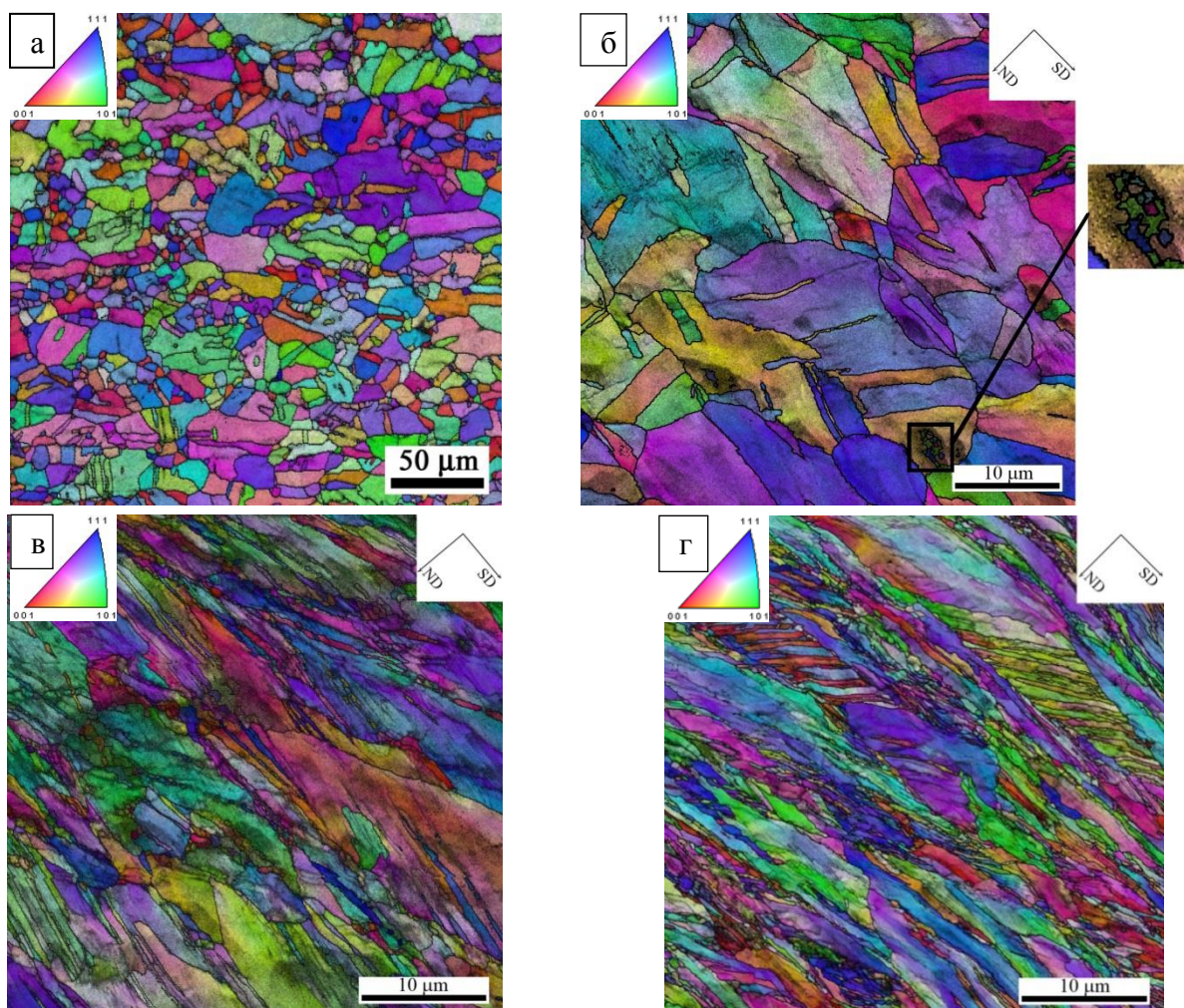


Рисунок 4 – Ориентационные карты исследованных участков в соединении медь М1 – медь М1: а – референтная структура; б – участок N1, в – участок N2, г – участок N3. SD – направление, параллельное локальному участку поверхности контакта, ND – направление, перпендикулярное SD

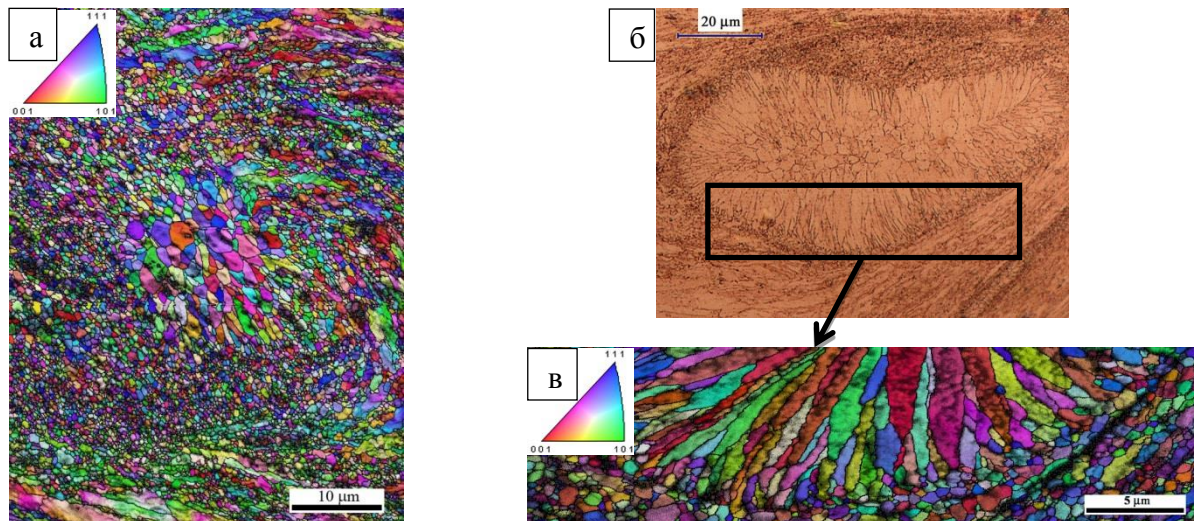


Рисунок 5 – Ориентационные карты участка О: вихрь без расплавления (а) и с расплавлением металла (в); б – металлографическая структура вихря с расплавлением

Гистограммы распределения разориентировок (ГРР) структур деформационного происхождения для участков (R, N1, N3, S) в соединении М1 – М1 представлены на рисунке 6 (кривые обозначены круглыми символами). На ГРР для референтной структуры (рисунок 6 а) выделяются две парциальные составляющие: с максимумами 60° и 40° . Они связаны с существованием двух типов большеугловых границ (БУГ): двойниковых и общего типа. 60° пик целиком помещается в область разориентировок, близких по критерию Брэндона к специальным границам $\Sigma = 3$.

На ГРР для участка N1 (рисунок 6 б) выделяются три парциальные составляющие: 1) 60° пик, 2) слабо выраженный 40° пик, 3) слабо выраженный малоугловой пик с максимумом 3° . 60° пик выходит за пределы брэндоновского интервала, включает в себя не только близкие к двойниковым границы, но общего типа, в том числе генетически связанные с двойниковыми границами. Малоугловой пик обусловлен начавшейся фрагментацией объема кристаллических областей.

ГРР для участка N3 (рисунок 6 в) отличается от предыдущей тем, что: 1) увеличился по высоте, расширился и сместился в сторону больших углов пик, связанный с фрагментацией ($\theta_p = 5^\circ$), 2) 60° пик расширился и вышел за пределы брэндоновского интервала, поглотив правый склон 40° пика, вследствие чего 40° пик стал незаметен.

ГРР для участка пластической струи S (рисунок 6 г) состоит из двух равных по высоте и площади пиков, плавно переходящих друг в друга. Малоугловой пик превратился в среднеугловой. 60° пик существенно расширился и вышел далеко за пределы брэндоновского интервала.

Глава 5 Компьютерное моделирование спектров разориентировок

На рисунке 6 представлены результаты компьютерного моделирования описанных в главе 4 экспериментальных спектров разориентировок.

Суть компьютерного моделирования заключалась в следующем. Каждый из четырех экспериментально выявленных механизмов структурообразования генерирует свой парциальный ансамбль границ деформационного происхождения. Разориентировки в каждом парциальном вкладе описываются присущей только ему парциальной функцией распределения разориентировок (ФРР) $F_\alpha(\theta)$, где $\alpha = fr$ (классическая фрагментация объема кристалла), $\alpha = tw$ (фрагментация границ двойников первого и второго порядка), $\alpha = ch$ (динамическая рекристаллизация). Линейная суперпозиция этих парциальных ФРР определяет результирующий спектр разориентировок:

$$F(\theta) = \eta^{fr} F_{fr}(\theta) + \eta^{tw} F_{tw}(\theta) + \eta^{ch} F_{ch}(\theta),$$

где η^α – парциальный вклад границ фрагментов, генерируемых парциальным механизмом типа α .

Подбирали такие значения парциальных вкладов η^α , которые минимизировали среднеквадратичное отклонение смоделированной функции распределения $F^{mod}(\theta_i) \equiv F_i^{mod}$ от экспериментальной $F^{exp}(\theta_i) \equiv F_i^{exp}$.

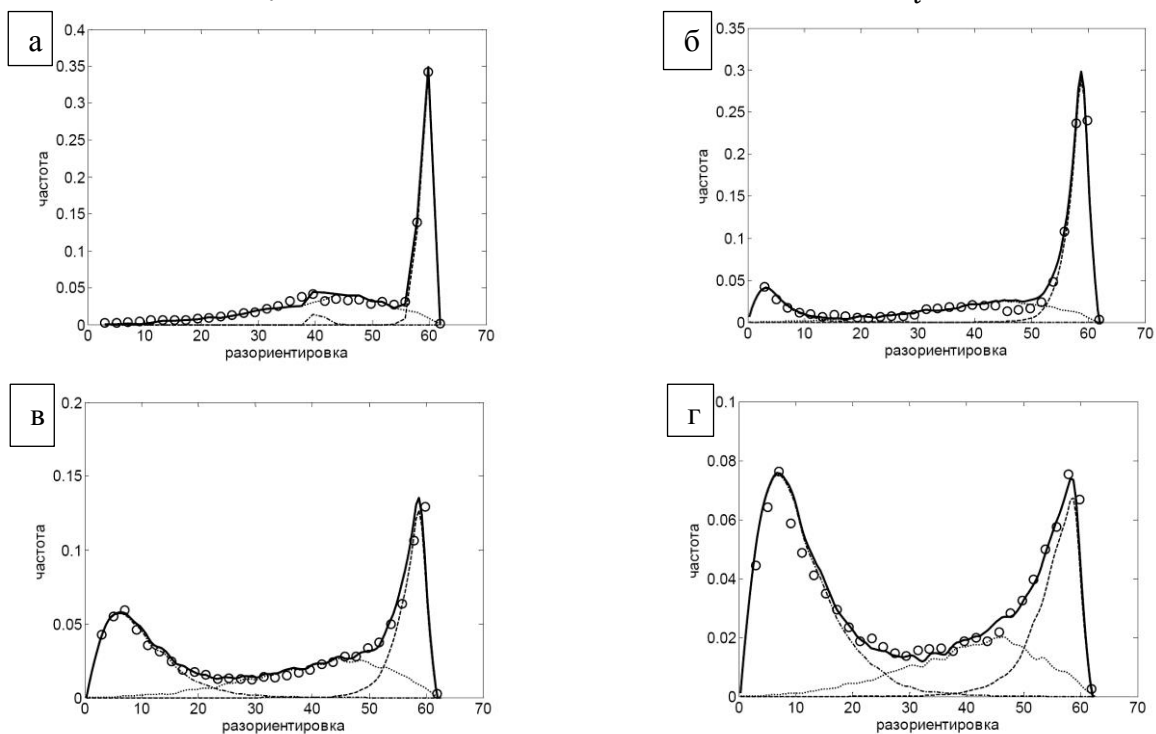


Рисунок. 6 – Сравнение экспериментальных (круглые символы) и теоретических (линии) распределений разориентировок: а – референтная структура; б – участок N1, в – участок N3; г – пластическая струя S. Тонкими прерывистыми линиями изображены парциальные распределения, отвечающие различным механизмам фрагментации, толстыми сплошными линиями – интегральные распределения

Для сравнения и оптимизации компьютерного моделирования применяли данные экспериментальных спектров разориентировок с измерением, а в ряде случаев с дополнительным уточнением следующих параметров: доли БУГ, значений максимумов для каждого из пиков, средней разориентировки.

На рисунке 6 толстыми сплошными линиями изображены смоделированные таким образом функции распределения по разориентировкам для четырёх участков (R, N1, N3, S) сварного соединения. Тонкими пунктирными и штрихпунктирными линиями изображены вклады парциальных механизмов фрагментации, которые наилучшим образом согласуют экспериментальные и теоретические интегральные распределения. Площади фигур, которые эти линии обозначают, равны величинам соответствующих парциальных вкладов η_α , а их форма и расположение позволяют определить локальную для данного участка структуры пластическую деформацию ε . Найденные таким образом параметры ε и η_α приведены в таблице 1 для каждого из изученных участков сварного соединения. На каждой диаграмме представлены две итоговые кривые. Одна соответствует экспериментально найденной функции распределения по разориентировкам F^{exp} (круглые символы), другая – модельной функции F^{mod} (сплошная линия). Среднеквадратичные отклонения ξ также приведены в таблице 1. Видно, что экспериментальные и смоделированные функции распределения разориентировок с высокой точностью совпадают.

Таблица 1 – Эволюция характеристик разориентированных структур деформационного происхождения по результатам компьютерного моделирования

	$\eta_{fr}, \%$	$\eta_{ch}, \%$	$\eta_{\Sigma 3}, \%$	$\eta_{\Sigma 9}, \%$	ε	ξ
R	-	50	47	3	0,1	0,005
N1	13	32	55	-	0,5	0,012
N3	35	33	32	-	1,4	0,078
S	50	25	25	-	1,6	0,006

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод прицельного приготовления высококачественных шлифов и фольг, предназначенный для исследования высокоразрешающими методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии морфологических и кристаллогеометрических особенностей структур деформационного происхождения в областях непосредственно примыкающих к поверхности контакта сварного соединения.

2. Проведено систематическое исследование морфологических и кристаллогеометрических особенностей структур деформационного происхождения на макро-, мезо и микроструктурных уровнях в узкой приконтактной зоне соединения медь М1 – медь М1, полученного сваркой взрывом.

3. На участках, непосредственно прилегающих к поверхности контакта свариваемых пластин, обнаружено явление аномальной локализации пласти-

ческого течения металла, которое на макроуровне реализуется в виде образования и развития специфических структурных элементов – вихреподобных пластических струй.

4. Показано, что каждая пластическая струя состоит из искривленных и параллельных между собой мезополос деформации толщиной 5 мкм, каждая из которых в свою очередь состоит из разориентированных фрагментов со средним поперечным размером 0,2 мкм.

5. Изучена эволюция структур деформационного происхождения в пределах узкой приконтактной зоны по мере приближения к поверхности контакта сварного соединения медь М1 – медь М1.

6. Экспериментально идентифицированы и подтверждены методами компьютерного моделирования действующие в узкой приконтактной зоне парциальные механизмы формирования сильноразориентированных структур деформационного происхождения. В изученном соединении медь М1 – медь М1 ими являются: 1) фрагментация объема, 2) динамическое деформационное двойникование, 3) фрагментация БУГ общего типа и двойниковых границ, 4) динамическая рекристаллизация. Для каждого парциального механизма методами компьютерного моделирования определен парциальный вклад, который он вносит в результирующий спектр разориентировок.

7. Полученные в диссертационной работе результаты, касающиеся эволюции структур деформационного происхождения при сварке взрывом, имеют фундаментальную ценность для построения физики пластической деформации кристаллических твердых тел в экстремальных условиях нагружения и являются научной основой дальнейшего совершенствования технологии создания неразъемных соединений металлических материалов методом сварки взрывом.

СПИСОК СТАТЕЙ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ушанова, Э. А. Новые методики пробоподготовки и аттестации нанокристаллических зон в разнородных соединениях, полученных сваркой взрывом / Э. А. Ушанова, Е. В. Нестерова, С. Н. Петров, В. В. Рыбин // Перспективные материалы. – 2011. Спец. вып. (12). – С. 516–522.

2. Ушанова, Э. А. Разработка технологии подготовки образцов для электронно-микроскопических исследований нанокристаллических зон сцепления в разнородных соединениях на основе методов ионной полировки Э. А. Ушанова, Е. В. Нестерова, С. Н. Петров, В. В. Рыбин, С. В. Кузьмин, Б. А. Гринберг // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 110–117.

3. Рыбин, В. В. Природа пластического течения металлов в приконтактной зоне при сварке взрывом / В. В. Рыбин, Э. А. Ушанова, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. Вып. 23. – С. 26–33.

4. Rybin, V. V. Explosively welded materials bond zone: morphology and crystallography / V. V. Rybin, E. A. Ushanova, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak // Reviews on Advanced Materials Science. – 2012. – 31 – P. 14–34.

5. Рыбин, В. В. Особенности строения разориентированных структур в бислойной пластине медь – медь, полученной сваркой взрывом / В. В. Рыбин, Э. А. Ушанова, Н. Ю. Золоторевский // ЖТФ. – 2013. – Т. 83. Вып. 9. – С. 63–72.

6. Рыбин, В. В. Особенности двойникования в условиях высокоскоростного нагружения / Рыбин В. В., Ушанова Э. А. // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3. Вып. 2. – С. 145–149.

7. Рыбин, В. В. Анализ разориентированных структур в модельном соединении медь-медь, полученном сваркой взрывом / В. В. Рыбин, Н. Ю. Золоторевский, Э. А. Ушанова // ЖТФ. – 2014. – Т. 84. Вып 12. – С. 81–95.

8. Рыбин, В. В. Фрагментация кристаллов при наличии деформационного двойникования и динамической рекристаллизации / В. В. Рыбин, Н. Ю. Золоторевский, Э. А. Ушанова // ФММ. – 2015. – Т. 116. № 7. – С. 1–16.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение, – 2005. – 544 с.

2. Шморгун, В. Г. Исследование основных закономерностей процесса пластической деформации при сварке взрывом / В. Г. Шморгун // Сварочное производство. – 2000. – №3. – С.23–25.

3. Кузьмин, С. В. Особенности пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием / С. В. Кузьмин, А. П. Пеев, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 1. – С. 71–76.

4. Song, J. Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding / J. Song, A. Kostka, M. Veehmayer, D. Raabe // Materials Science and Engineering A. – 2011. – V. 528. – P. 2641–2647.

5. Yang, Y. Adiabatic Shear Bands on the Titanium Side in the Titanium/Mild Steel Explosive Cladding Interface: Experiments, Numerical Simulation, and Microstructure Evolution / Y. Yang, B.F. Wang, J. Xiong, X.Y. Yang, Y. Zeng, Z.P. Chen // Metallurgical and materials transactions A. – 2006. – V. 37A. – P. 3131–3137.

6. Paul, H. Changes in the bonding zone of explosively welded sheets / H. Paul, M. Faryna, M. Prazmowski, R. Banski // Archives Of Metallurgy And Materials. – 2011. – V. 56. – Iss. 2. – P. 463–474.

7. Kreye, H. Transmission electron microscope investigation of the microstructure affected by the bonding process during oblique collision of metallic surfaces / H. Kreye, M. Hammerschmidt // Proc. V. Intern. Symp. on Use of explosive energy in manufacturing metallic materials of new properties, Gottwaldov CSSR. – 1982. – P. 130–146.

8. Nobili, A. Recent developments in characterization of a titanium-steel explosion bond interface / A. Nobili, T. Masri and M.C. Lafont // Proceedings of reactive metals in corrosive applications conference, Wah Chang, Albany, OR, Sept. – 1999. – P. 89–98.

9. Davenport, D. E. Explosive welding / D. E. Davenport // Advanced high energy rate forming, book II. New York: American society of tool and manufacturing engineers. – 1961-62. – P. 62–77.

10. Bahrani, A. S. The mechanics of wave formation in explosive welding / A. S. Bahrani, T. J. Black, B. Crossland // Proceedings of the Royal Society, Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1967. – V. 296. – № 1445. – P. 123–136.