

На правах рукописи



Макарова Евгения Борисовна

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ  
ТОНКОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТЕХНИЧЕСКИ  
ЧИСТОГО ТИТАНА VT1-0 И СПЛАВА VT23**

Специальность 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Батаев Анатолий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Шаркеев Юрий Петрович,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
профессор кафедры теоретической и  
экспериментальной физики

кандидата технических наук, доцент  
Прудников Александр Николаевич,  
Сибирский государственный индустриальный  
университет,  
доцент кафедры физики металлов и новых  
материалов

Ведущая организация: Институт физики прочности и  
материаловедения СО РАН, г. Томск

Защита состоится «18» октября 2012 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «17» сентября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Иванцовский В.В.

## **Актуальность работы**

Развитие многих отраслей современного производства неразрывно связано с разработкой новых материалов, обладающих высоким комплексом механических свойств. При использовании традиционных технологических процессов не всегда удается получать материалы с требуемым уровнем показателей прочности, надежности и долговечности. Один из эффективных путей получения высокопрочных материалов основан на использовании методов интенсивной пластической деформации, позволяющих формировать нано- и субмикроструктурную кристаллическую структуру в различных материалах конструкционного назначения. Недостатком, характерным для этих методов, является низкий уровень пластичности и ударной вязкости материалов. Альтернативой могут служить технологии формирования слоистых металлических материалов, основанные на сварке взрывом тонколистовых заготовок.

Анализ литературных данных и результатов собственных экспериментальных исследований свидетельствует о перспективности разработки многослойных материалов на основе титана и его сплавов, о возможности одновременного повышения комплекса их прочностных свойств и показателей надежности. Материалы такого типа могут эффективно применяться в самолето-, ракето-, автомобиле-, судостроении, химическом машиностроении. Чистый титан, обладающий отличной биосовместимостью, может быть использован также в медицине при изготовлении имплантатов и протезов различного типа. Сварка материалов взрывом позволяет эффективно решать задачи, связанные со снижением металлоемкости, повышением надежности и долговечности разрабатываемых конструкций.

Важным фактором, определяющим комплекс механических свойств сваренных взрывом многослойных пакетов, является структурное состояние исходных заготовок. При выполнении диссертационной работы в качестве заготовок для сварки взрывом использовали пластины отожженного титана ВТ1-0 и сплава ВТ23. Проведенный анализ показал, что предварительное поверхностное и объемное упрочнение титановых заготовок, используемых для сварки взрывом, может быть обеспечено путем формирования нано- и субмикроструктурной кристаллической структуры. Для получения такой структуры были использованы технологии пластической деформации поверхностных слоев листовых заготовок индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, а также технологии ротационной вытяжки трубчатых заготовок.

Особенностью, характерной для титана и его сплавов, является относительно малая теплопроводность, объясняющая склонность этих материалов к локализации пластического течения. При реализации процессов высокоскоростного нагружения эта проблема является особо актуальной. Применение в качестве одного из объектов исследования сплава ВТ23, находящегося в двухфазном состоянии, позволило надежно визуализировать процессы локализации пластического течения при сварке металлических материалов, представить последовательность их развития во времени.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнены в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.».

**Цель** диссертационной работы: повышение комплекса свойств многослойных композиций из технически чистого титана и титанового сплава ВТ23, сформированных сваркой взрывом и изучение процессов структурных преобразований, происходящих при динамическом взаимодействии тонколистовых титановых заготовок.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выявление эффективности объемного упрочнения технически чистого титана посредством ротационной вытяжки трубчатых заготовок и поверхностного упрочнения высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, как методов предварительной подготовки заготовок для сварки взрывом.

2. Изучение процессов локализации пластического течения в титане и двухфазном ( $\alpha+\beta$ ) титановом сплаве ВТ23 при реализации высокоскоростного нагружения.

3. Исследование особенностей структуры и механических свойств многослойных материалов типа «ВТ1-0 – ВТ1-0» и «ВТ1-0 – ВТ23», полученных методом сварки взрывом тонколистовых заготовок.

4. Исследования особенностей статического, динамического и усталостного разрушения многослойных композиций «ВТ1-0 – ВТ1-0» и «ВТ1-0 – ВТ23».

#### **На защиту выносятся**

1. Результаты структурных исследований зон сопряжения пластин технически чистого титана и сплава ВТ23, сформированных в процессе сварки взрывом.

2. Результаты исследования структуры и свойств технически чистого титана ВТ1-0 после ротационной вытяжки трубчатых заготовок и после обработки плоских заготовок высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой.

3. Результаты изучения поведения многослойных материалов из титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ23 в условиях статического, динамического и циклического нагружения.

4. Результаты математического моделирования процессов деформации и нагрева пластин в слоистых композиционных материалах типа «ВТ1-0 – ВТ1-0» и типа «ВТ1-0 – ВТ23» в процессе высокоскоростного нагружения.

#### **Научная новизна**

1. Для сварки взрывом многослойных пакетов из технически чистого титана предложено применять несимметричную угловую схему, способствующую образованию рациональной структуры материала. Показано, что формирование 12-слойного материала «ВТ1-0 - ВТ1-0» с использованием симметричной параллельной схемы сопровождается появлением повышенного количества полос локализованного течения. Наиболее высокой склонностью к об-

разованию полос обладают две центральные пластины титана, что обусловлено удвоением выделяемой энергии при их контакте по отношению к другим парам взаимодействующих заготовок.

2. Установлено, что формирование эффективной структуры семислойного композита «ВТ1-0 - ВТ23» обеспечивает параллельная симметричная схема сварки взрывом. Предел прочности и ударная вязкость семислойного материала, полученного по параллельной симметричной схеме сварки взрывом, на 30 % и 40 % выше по сравнению с композитом, сваренным по угловой симметричной схеме.

3. Установлено, что сохранение в титановых заготовках нано- и субмикроструктурной структуры, предварительно созданной по технологии обработки высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, возможно лишь на глубине, превышающей 200 мкм. В качестве заготовок для сварки взрывом предложено использовать пластины титана, полученные из трубчатых заготовок после холодной ротационной вытяжки со степенью обжатия 50 % и отжига в течение 1 часа при 400...450 °С.

4. Показано, что последовательность развития процессов пластического течения в технически чистом титане и сплаве ВТ23 может быть воспроизведена на основании анализа формы полос локализованного сдвига, возникших при сварке взрывом. Сдвиг, происходящий на позднем этапе, искажает форму полос, возникших ранее. В пределах сварных швов волнообразной формы наблюдаются системы криволинейных полос сдвига. Искажение всех полос сдвига, образующих сетку, свидетельствует о том, что этап их формирования предшествовал возникновению волн.

5. Для изучения процессов пластического течения, имеющих место при сварке взрывом, предложено использовать титановый сплав ВТ23 с двухфазной ( $\alpha+\beta$ ) структурой. Показано, что изменение формы зерен  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы является надежным критерием, характеризующим особенности деформации материала. Наличие или отсутствие этих зерен в полосах локализованной пластической деформации свидетельствует об уровне нагрева материала и развитии в его локальных микрообъемах фазовых превращений.

6. Доказано, что при сварке взрывом тонколистовых заготовок с получением многослойных материалов типа «ВТ1-0 - ВТ1-0» следует избегать безволновых режимов, приводящих к образованию сплошных прослоек жидкого металла. Образующиеся на их месте сварные швы являются особо хрупкими. В центре сплошных прослоек, возникших при кристаллизации расплава, обнаружено присутствие узких зон, отчетливо выявляемых методами химического травления. Показано, что механизм их образования связан с направленной кристаллизацией расплава титана одновременно с двух сторон при отводе тепла в холодные пластины. Повышенное содержание дефектов, характерное для зоны сопряжения растущих навстречу друг другу кристаллов, может являться причиной охрупчивания материала сварного шва.

### **Практическая значимость и реализация результатов работы**

1. Экспериментально установлено, что многослойные материалы на основе титана ВТ1-0 и сплава ВТ23, полученные методом сварки взрывом, обладают

высоким комплексом механических свойств и могут использоваться в качестве изделий ответственного назначения.

2. На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации по измельчению структуры и повышению комплекса механических свойств технически чистого титана с использованием пластической деформации в холодном состоянии по технологии ротационной вытяжки и ультразвуковой обработки.

3. По результатам структурных исследований и механических испытаний материалов на основе титана разработаны рекомендации по улучшению качества многослойных композиций, изготовленных по технологии сварки взрывом.

4. Результаты проведенных исследований применяются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении», а также бакалавров и магистрантов по направлению «Материаловедение и технологии материалов» в Новосибирском государственном техническом университете.

5. Результаты исследований, полученных при выполнении диссертационной работы, отмечены медалями специализированных международных промышленных выставок «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия» (ITE Сибирская ярмарка, 2010 и 2011 гг.).

#### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивалась применением современных методов изучения структуры и механических свойств многослойных материалов, использованием методов статистической обработки экспериментальных результатов, применением взаимодополняющих методов изучения структуры и механических свойств материалов, сопоставлением результатов физических исследований с данными, полученными в ходе математического моделирования.

**Личный вклад автора** состоял в формулировании задач, проведении структурных исследований и механических испытаний материалов, проведении математических расчётов, анализе и обобщении экспериментальных данных, сопоставлении результатов проведенных исследований с имеющимися в литературе данными, формулировании выводов по работе.

#### **Апробация работы**

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на всероссийской молодежной конференции «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов», г. Белгород, 2009 г.; международной конференции «Нанозифика и нанозлектроника. Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях», г. Новосибирск, 2010 г.; всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск 2010 г.; 8 всероссийской научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», г. Новосибирск, 2010 г.; уральских школах металловедов - термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», г. Екатеринбург, 2010 и 2011 г.; V международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и

молодых ученых «Образование, наука, инновации», г. Кемерово, 2010 г.; всероссийских научно-технических конференциях «Наука. Промышленность. Оборона», г. Новосибирск, 2010 и 2011 гг.; международных научно-практических конференциях «Современные техника и технологии», г. Томск, 2010 и 2011 гг.; 9 всероссийской научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», г. Новосибирск, 2011 г.; международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, г. Томск, 2011 г.; IV всероссийской конференции по наноматериалам, Москва, 2011 г.; всероссийской молодежной конференции «Машиностроение – традиции и инновации», Томск, 2011 г.; IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 2011 г.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликованы 16 печатных научных работ, из них: 8 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 8 – в сборниках научных трудов международных и всероссийских конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения и приложения. Основной текст работы изложен на 241 страницах и включает 107 рисунков, 18 таблиц, список литературы из 170 наименований

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, описаны основные направления экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе.

**В первом разделе** «Повышение механических свойств титана и его сплавов» представлен обзор работ отечественных и зарубежных специалистов по исследуемой проблеме. Описаны структура, механические и физические свойства титана и его сплавов. Дана характеристика процессам, развивающимся при термической обработке и холодной пластической деформации анализируемых материалов. Один из разделов обзора посвящен анализу процессов получения слоистых композиционных материалов сваркой взрывом. На основании данных литературного обзора были сформулированы выводы, послужившие основой для постановки задач исследования.

**Во втором разделе** «Материалы и методы экспериментальных исследований» описаны исследуемые в работе материалы и условия формирования из них многослойных композиций. Для сварки взрывом использовали пластины технически чистого титана ВТ1-0 толщиной 1,0; 0,6 и 0,2 мм. Пластины из сплава ВТ23 имели толщину 2,2 мм и находились в двухфазном ( $\alpha+\beta$ ) состоянии. С использованием симметричной параллельной схемы были сварены двенадцатислойные пакеты «ВТ1-0 - ВТ1-0». Шестнадцатислойные материалы из пластин технически чистого титана были получены по угловой несимметричной схеме сварки (рис. 1). С использованием параллельной (рис. 2) и угловой симметричных схем сварки взрывом получили семислойные материалы типа

«BT1-0 – BT23». Во всех случаях в качестве взрывчатого вещества применяли аммонит 6ЖВ.

С целью получения ультрамелкозернистой структуры были реализованы процессы объемного и поверхностного упрочнения. Объемное упрочнение титана осуществляли по технологии ротационной вытяжки трубчатых заготовок с последующим их отжигом. В качестве технологии поверхностного упрочнения использовали обработку пластин высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой.

Структурные исследования выполняли на микроскопах *Axio Observer A1m* и *AxioObserver Z1m*, растровом электронном микроскопе *EVO 50 XVP* и трансмиссионном электронном микроскопе *Tecnaï G2 20TWIN*. Анализ напряженного состояния материала проводили с использованием рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA*. Твердость композитов оценивали на микротвердомере *Wolpert Group 402 MVD*. Для проведения прочностных испытаний слоистых материалов использовали установку *Instron 3369*. Усталостные испытания композитов проводили на установке *Instron 8801*.

В третьем разделе диссертационной работы «Математическое моделирование процессов, протекающих при высокоскоростном косом соударении пластин» приведены результаты оценки ударно-волновых и тепловых процессов, развивающихся в околошовных зонах при высокоскоростном косом соударении металлических пластин. Математическое моделирование выполнено с использованием программного комплекса *AUTODYN 11.0*. В качестве анализируемых материалов использовали технически чистый титан и высокопрочный титановый сплав *Ti-6Al-4V*.

Математическое моделирование выполнено для двух пар соединяемых материалов: «титан – титановый сплав» и «титан – титан». Максимальные значения температуры, давления, степени и скорости пластической деформации зафиксированы в метаемых пластинах. Установлено, что во всех случаях максимальная температура нагрева металла в зоне шва (1927...3207 K) превышает температуру плавления титана. Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о том, что ширина зоны, нагретой до температур полиморфного преобразования, составляет ~ 160...250 мкм. Развитие рекристаллизационных про-

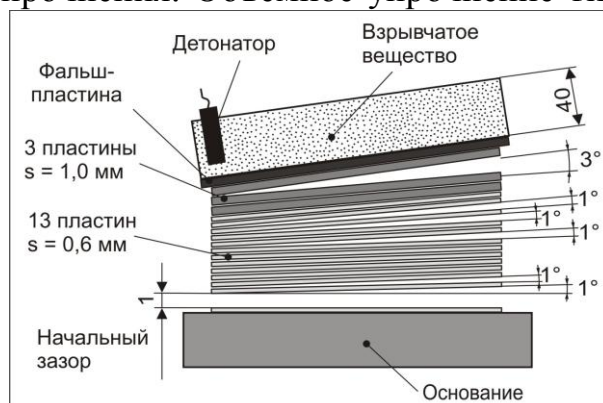


Рис. 1. Схема сварки взрывом 16-слойного композита типа «BT1-0 - BT1-0»

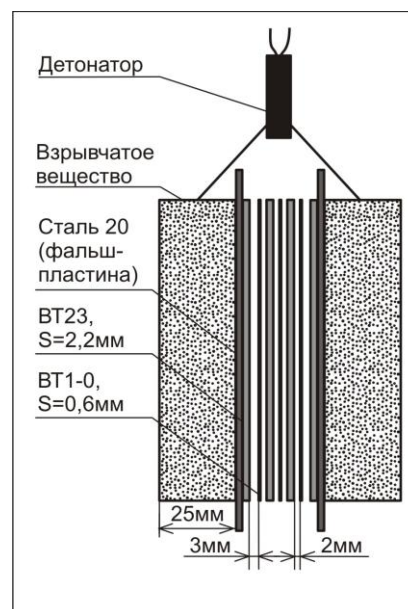


Рис. 2. Схемы получения семислойных композитов типа «BT1-0 - BT23»



цессов возможно в зоне шириной  $\sim 210 \dots 300$  мкм. Ширина зон, в которых развиваются рекристаллизационные процессы и полиморфные превращения, максимальна в случае соударения пластин из чистого титана.

**В четвертом разделе** «Формирование многослойных композиций «ВТ1-0 – ВТ1-0» методом сварки взрывом тонколистовых заготовок из технически чистого титана, находящегося в различном структурном состоянии» отражены результаты исследования структуры и механических свойств двенадцати- и шестнадцатислойных сварных соединений. Форма получаемых швов зависит от выбранной схемы сварки взрывом и от технологических режимов, определяющих геометрию и скоростные параметры взаимодействия соединяемых пластин. При сварке пластин, расположенных ближе к слою взрывчатого вещества, образуются швы волнообразной формы. Сварка более удаленных пластин в случае использования несимметричной схемы установки заготовок сопровождается уменьшением амплитуды и длины волн вплоть до их вырождения.

Формирование 12-слойного композита из тонколистового технически чистого титана ВТ1-0 с использованием симметричной схемы сварки взрывом сопровождается образованием полос локализованного течения (рис. 3, указано стрелками). Наиболее высокой склонностью к образованию полос локализованного течения обладают две центральные пластины титана, что обусловлено удвоением выделяемой энергии при их контакте (по отношению к другим парам взаимодействующих пластин). Максимальная длина полос локализованного течения соизмерима с толщиной соединяемых пластин. При сварке многослойных пакетов из технически чистого титана наиболее рациональной является несимметричная схема сварки, при реализации которой образуется менее дефектный материал.

Характерной особенностью швов, полученных при сварке взрывом титановых заготовок, является наличие резко различающихся по строению зон. Основными из них являются: зоны сформировавшиеся из расплавленного металла, зоны рекристаллизованного материала (рис. 4, указано стрелкой), зоны сильнодеформированных зерен и зоны, имеющие структуру исходного типа. В зависимости от геометрических параметров сварных швов толщина сильнодеформированных слоев, расположенных на безвихревых участках волнообразных границ, составляет  $\sim 20 \dots 100$  мкм. Пластическая деформация зерен  $\alpha$ -титана сопро-

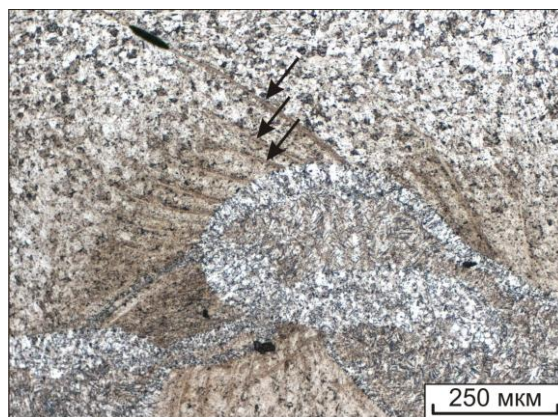


Рис. 3. Полосы локализованного течения вблизи гребней волн

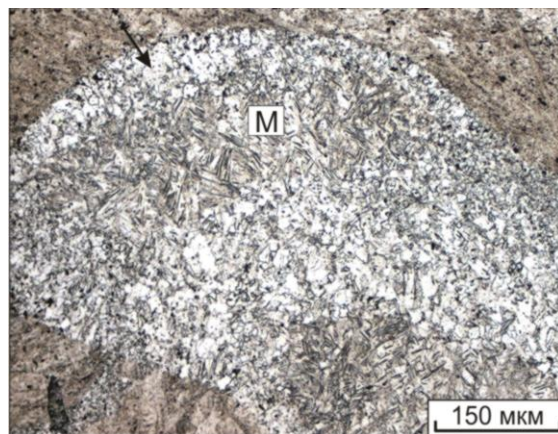
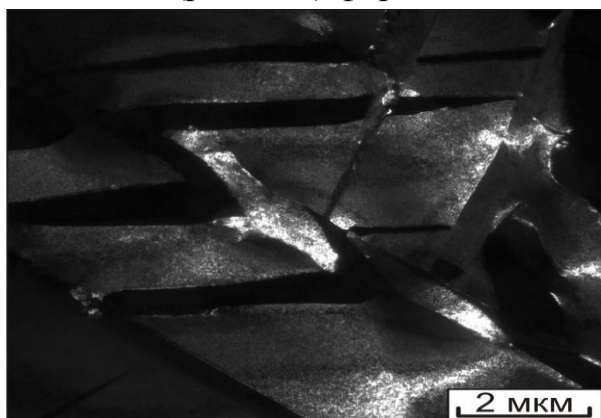
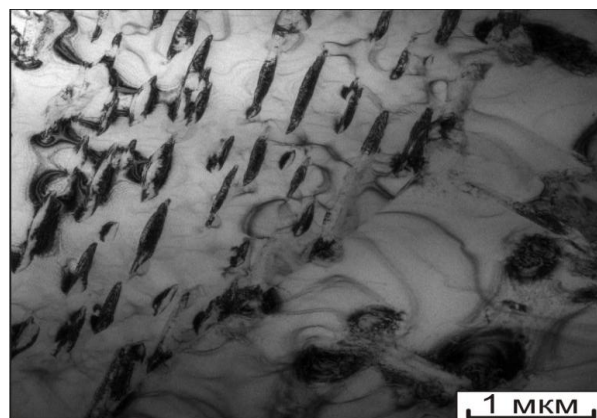


Рис. 4. Рекристаллизация титана вблизи вихревых зон

вождается образованием множества двойников линзовидной (рис. 5, б) и пластинчатой (рис. 5, а) формы.



а



б

Рис. 5. Тонкая структура сварных швов многослойных пакетов из технического чистого титана VT1-0

Вихревые зоны, формируемые вблизи вершин и впадин волн сварных швов, преимущественно имеют литую структуру с характерным столбчатым строением кристаллитов. Локальный характер нагрева околошовных зон, окруженных холодным материалом, и высокая скорость охлаждения микрообъемов, нагретых при сварке до температур выше температуры полиморфного превращения, способствуют реализации мартенситного превращения и образованию в этих микрообъемах структуры  $\alpha'$ -мартенсита (рис. 4, зона М).

При одновременной сварке взрывом тонколистовых заготовок из титана VT1-0 по несимметричной схеме с получением пакетов, содержащих более десяти слоев, следует избегать безволновых режимов, приводящих к образованию прослоек жидкого металла. Соединения со сплошными прямолинейными прослойками, возникшими на месте пленок расплавленного титана, являются наиболее хрупкими (рис. 6). Расслоение материала вдоль этих прослоек приводит к формированию излома без признаков пластической деформации (рис. 7). В центре анализируемых прослоек формируются узкие зоны, отчетливо выявляемые методами химического травления. Механизм их образования предпо-

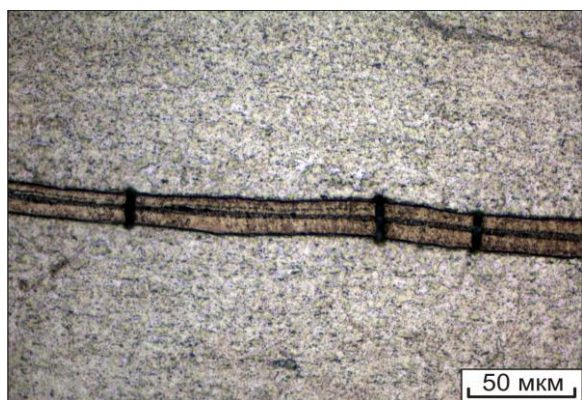


Рис. 6. Плоские сварные швы в многослойных материалах «VT1-0 – VT1-0»

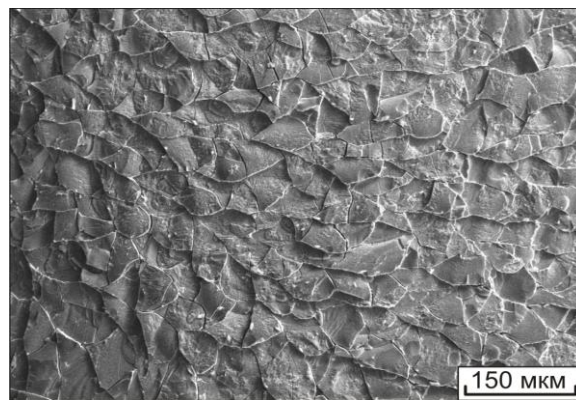


Рис. 7. Поверхность разрушения многослойного материала вдоль прослойки, возникшей на месте расплавленного материала

ложительно связан с направленной кристаллизацией расплава титана одновременно с двух сторон при отводе тепла в холодные пластины.

Результаты дюрометрических исследований свидетельствуют об относительно слабом повышении микротвердости центральных зон пластин технически чистого титана и о существенном упрочнении материала в зонах сильнодеформированных зерен и в зонах, возникших на месте расплавленных прослоек материала (до  $\sim 3000$  и  $\sim 5000$  МПа, соответственно). В процессе сварки взрывом 16-слойного композита по несимметричной угловой схеме предел прочности титана ВТ1-0 возрастает на 33 % (от 450 до 600 МПа, рис. 8, а). При этом относительное удлинение снижается с 27 % до 18 %.

Испытания на ударный изгиб композита, сформированного по несимметричной схеме сварки взрывом, свидетельствуют о явной зависимости ударной вязкости от ориентации надреза относительно сваренных пластин рис. 8, б. При испытании 16-слойных образцов, линии надреза на которых параллельны поверхности сопряжения пластин, зафиксирован уровень ударной вязкости ( $190 \text{ Дж/см}^2$ ), соответствующий исходному титану ( $185 \text{ Дж/см}^2$ ). На слоистых образцах с поперечным расположением надреза ударная вязкость снижается до  $80 \text{ Дж/см}^2$ .

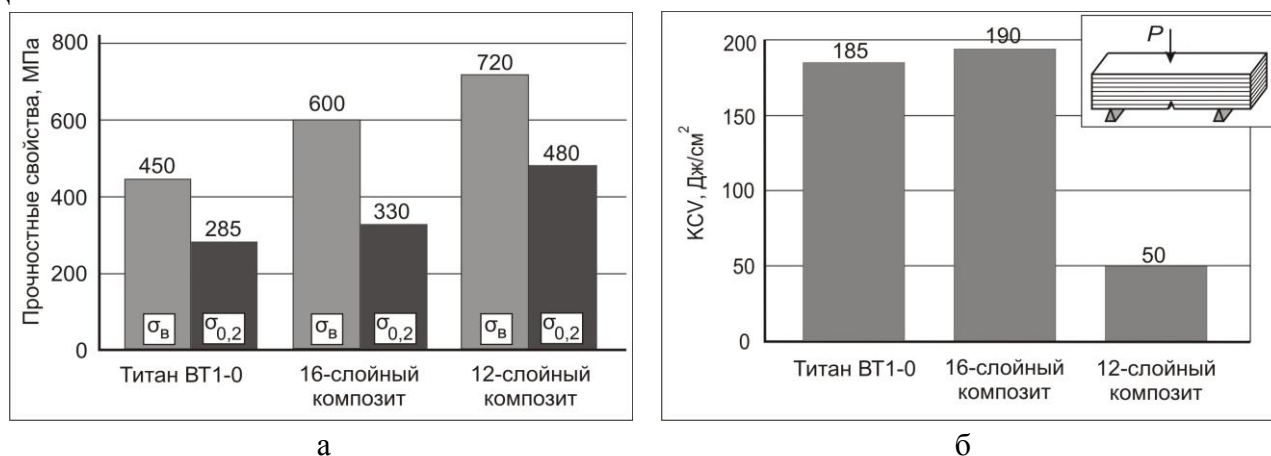
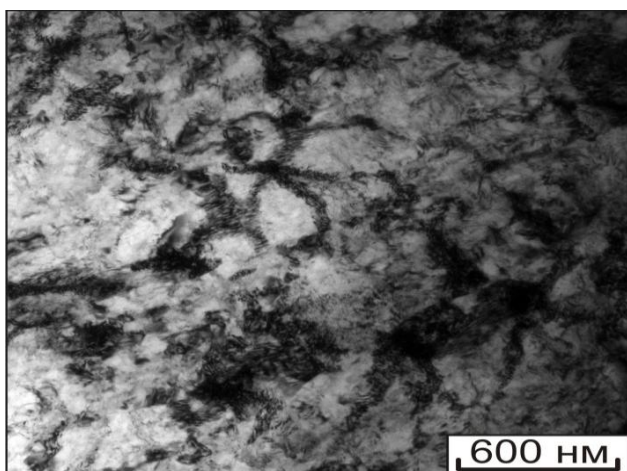
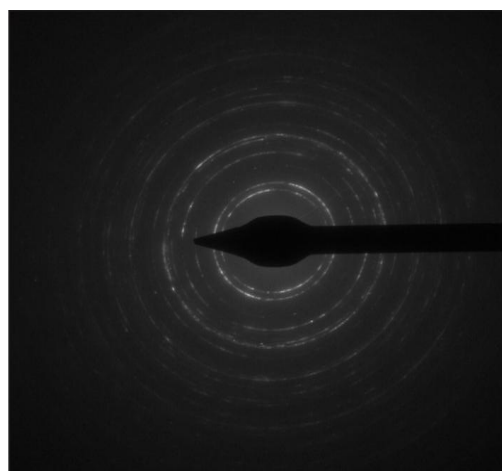


Рис. 8. Прочностные свойства (а) и ударная вязкость (б) титана ВТ1-0 в исходном состоянии, 16-слойного и 12-слойного композитов «ВТ1-0 –ВТ1-0»

Эффективным способом объемного упрочнения технически чистого титана является ротационная вытяжка трубчатых заготовок, обеспечивающая повышение плотности дислокаций. Результатом коллективной перестройки дислокационной структуры титана является формирование ячеистых построений диаметром  $\sim 200 \dots 500$  нм, а также построений полосового типа (рис. 9). Интенсивная пластическая деформация заготовок трубчатой формы по технологии ротационной вытяжки с обжатием на 50...55 % обеспечивает двукратный рост предела прочности (от 390 до 700 МПа, рис. 10, а). Величина относительного удлинения холоднодеформированного титана составляет не менее 10 %. Эффективное решение проблемы снижения внутренних напряжений и хрупкости трубчатых титановых заготовок заключается в их отжиге при  $400 \dots 450 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 1 часа (рис. 10, б).

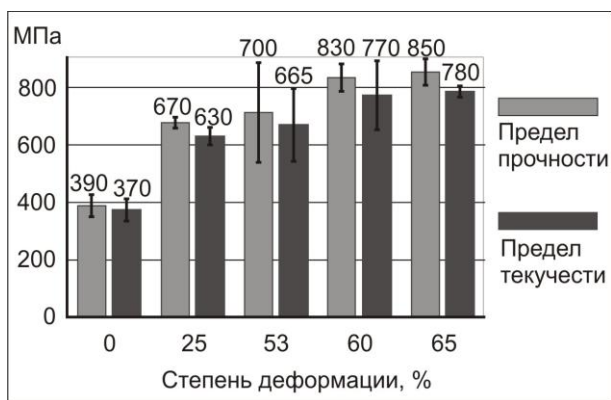


а

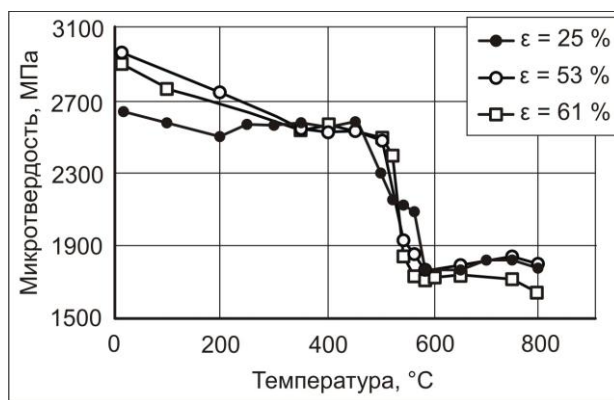


б

Рис. 9. Тонкое строение технически чистого титана после ротационной вытяжки: а - светлопольное изображение титана; б – микродифракционная картина того же участка



а



б

Рис. 10. Прочностные характеристики титановых труб после ротационной вытяжки (а). Влияние температуры нагрева на микротвердость титана, деформируемого по технологии ротационной вытяжки (б)

При сварке взрывом поверхностные слои титановых пластин с высокой скоростью прогреваются на глубину 200...300 мкм. В этом слое на месте исходной структуры формируется новая зеренно-субзеренная структура с размерами структурных элементов, равными 200...500 нм. Сохранение в титановых заготовках нано- и субмикроструктурной структуры, предварительно созданной по технологии обработки высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, возможно лишь на глубине, превышающей зону высокотемпературного нагрева титана. Более рационально применение в качестве заготовок для сварки взрывом пластин титана, полученных из труб после холодной ротационной вытяжки со степенью обжатия 50 % и отжига в течение 1 часа при 400...450 °C.

**Пятый раздел** диссертационной работы «Структура и свойства слоистого материала «ВТ1-0 – ВТ23», сформированного методом сварки взрывом», посвящен анализу структуры и свойств композиций, состоящих из чередующихся разнородных сплавов. Установлено, что одновременная сварка взрывом множества пластин приводит к формированию сварных швов, характеризующихся различной геометрией и структурой. При формировании композитов по несим-

метричной схеме наиболее рельефной формой обладают швы, находящиеся на минимальном расстоянии от слоя взрывчатого вещества.

Характерной особенностью сварки взрывом сплавов на основе титана является локализация пластического течения, обусловленная низким коэффициентом теплопроводности этих материалов (рис. 11, а). В процессе высокоскоростного нагружения происходит быстрый нагрев локальных участков деформируемого материала и замедленный отвод тепла. Наличие термически разупрочненных зон препятствует однородности пластического течения титана при его динамическом нагружении. Формирование полос локализованного сдвига приводит к неэффективному исчерпанию запаса пластических свойств титановых сплавов. Результатом такого процесса является формирование зон сильно- и слабodeформированного материала. В процесс интенсивной пластической деформации вовлечено менее 5 % объема пластин из сплава ВТ23.

Анализ формы полос сдвига позволяет воспроизвести последовательность развития процессов пластического течения материалов во времени. Искажение систем полос сдвига, образующих сетку и расположенных в пределах сварных швов волнообразной формы, свидетельствует о том, что этап формирования полос предшествовал возникновению волн (рис. 11, б).

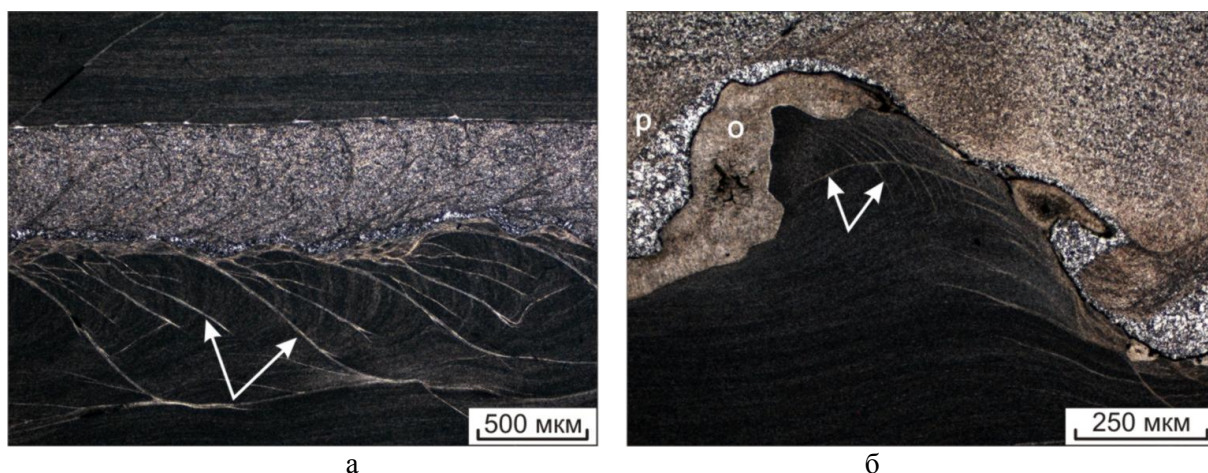


Рис. 11. Полосы локализованного течения в сплаве ВТ23 (указаны стрелками).

Титановый сплав ВТ23 с двухфазной ( $\alpha+\beta$ ) структурой является эффективным модельным материалом для изучения процессов пластического течения, имеющих место при сварке взрывом. Изменение формы зерен  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы, видимых в электронном микроскопе в виде светлых и темных микрообъемов, является надежным критерием, характеризующим степень деформации материала (рис. 12). Наличие или отсутствие этих зерен в полосах локализованной пластической деформации свидетельствует об уровне нагрева материала и развитии в его локальных микрообъемах фазовых превращений.

Использование параллельной симметричной схемы сварки взрывом при создании многослойного композита «ВТ1-0 - ВТ23» позволяет сформировать материал с меньшим количеством полос локализованного течения по сравнению с угловой симметричной схемой сварки, что снижает вероятность преждевременного разрушения материала (рис. 13). Предел прочности и ударная вязкость семислойного материала, полученного по параллельной симметричной

схеме сварки взрывом, на 30 % и 40 % выше по сравнению с композитом, сваренным по угловой симметричной схеме.

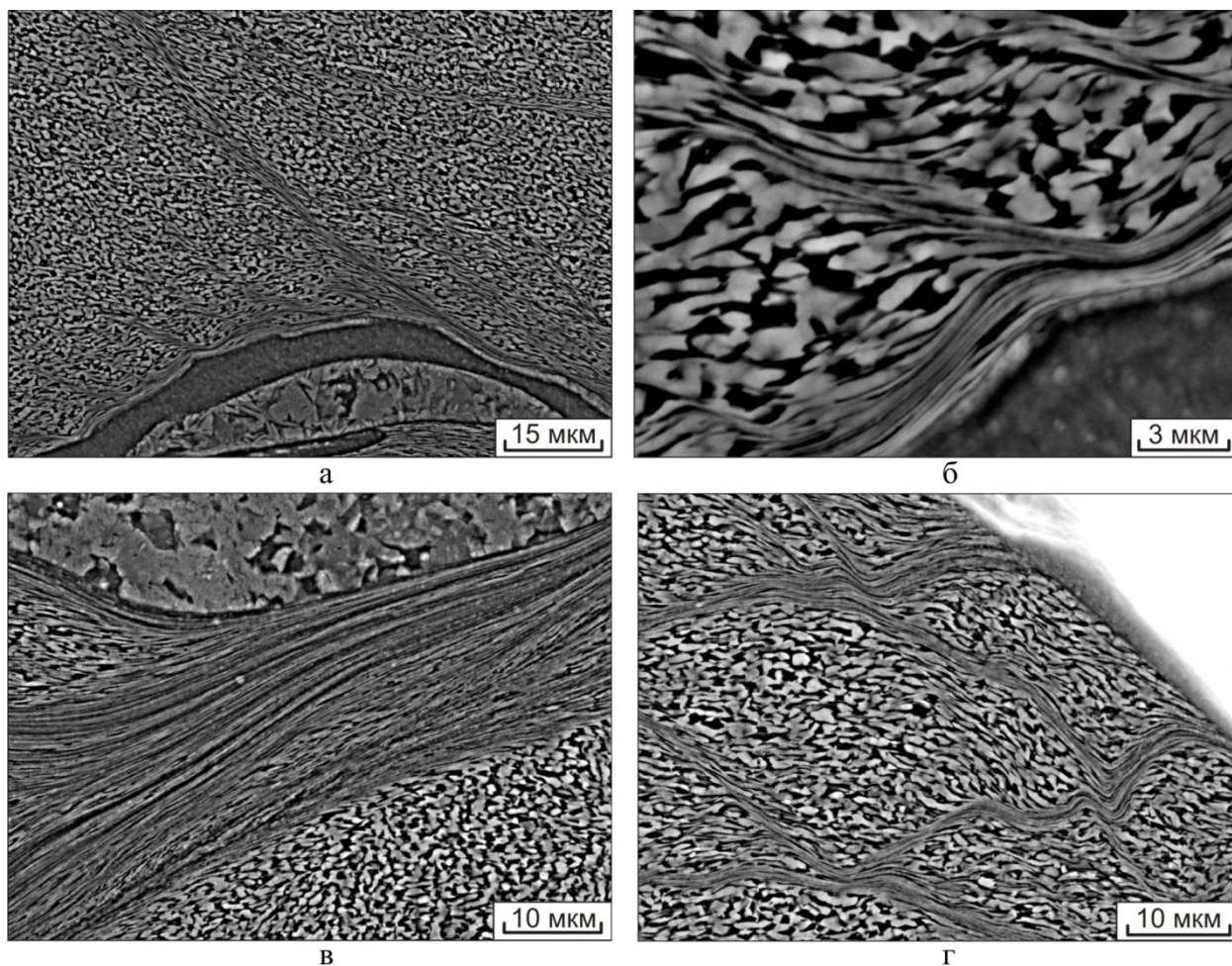


Рис. 12. Полосы локализованного пластического течения в пластине BT23

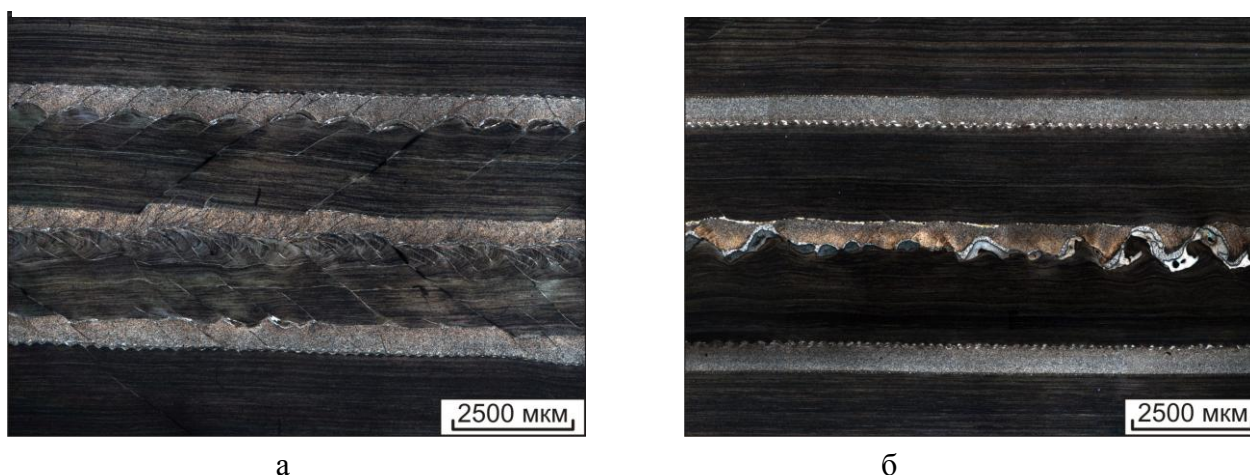


Рис. 13. Общий вид семислойных композитов «BT1-0 – BT23», полученных методом сварки взрывом по угловой (а) и параллельной (б) симметричной схеме

Установлено, что в результате деформационного упрочнения и фазовых превращений, имеющих место при сварке взрывом, микротвердость титана BT1-0 и сплава BT23 возрастает. Средний уровень микротвердости упрочненных пластин титана BT1-0 и BT23 составляет 2550 МПа и 3900 МПа соответственно. В зоне сильнодеформированных зерен титана BT1-0 и сплава BT23

значения микротвердости достигают 3000 МПа и 4500 МПа (рис. 14). Долговечность слоистой композиции, полученной по параллельной симметричной схеме сварки взрывом, почти в 10 раз превышает долговечность сплава ВТ23, находящегося в отожженном состоянии.

Характер распространения усталостных трещин в процессе малоцикловых испытаний многослойных материалов «ВТ1-0 – ВТ23» имеет ряд принципиальных отличий от процесса разрушения монолитных материалов. Полученные результаты объясняются благоприятным влиянием межслойных границ, при прохождении которых происходит смена траектории и торможение усталостных трещин. Неравномерность развития трещин особо проявляется на сварных швах с большой амплитудой.

**Шестой раздел** диссертационной работы посвящен апробации результатов экспериментальных исследований. Слоистые композиционные материалы, полученные сваркой взрывом листов титана и титановых сплавов, обладают рядом достоинств, позволяющих применять их в различных отраслях промышленности. Из них могут быть изготовлены емкости для хранения и транспортировки химически агрессивных сред.

По сравнению с традиционными титановыми сплавами процессы усталостного повреждения композиционных материалов развиваются медленнее, что позволяет обеспечить высокие характеристики надежности изделий. Целесообразно применение разработанных материалов для изготовления элементов авиационных конструкций, требующих сочетания высоких показателей сопротивления ударному и усталостному разрушению, высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Формирование на поверхности изделий слоя нелегированного титана обеспечивает высокие показатели биологической инертности и совместимости с живой тканью. При этом использование высокопрочных титановых сплавов позволяет более чем в два раза повысить прочностные характеристики имплантатов.

Результаты работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете. Материалы, полученные при выполнении диссертационной работы, отмечены двумя медалями международной промышленной выставки «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия» (2010 и 2011 гг.).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сварка взрывом пластин титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ23 характеризуется особенностями, обусловленными низким коэффициентом теплопроводности материалов. При высокоскоростном нагружении происходит

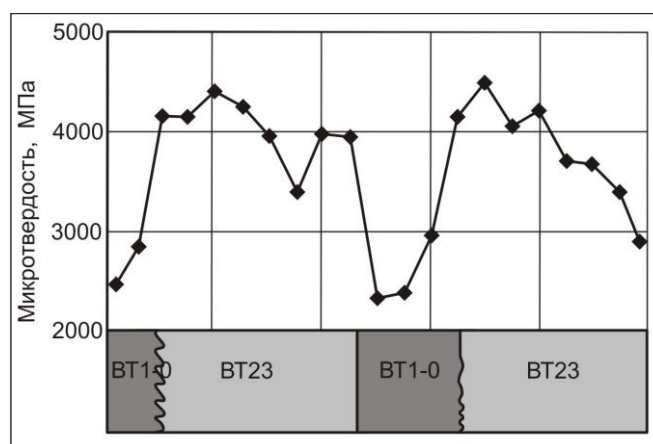


Рис. 14. Результаты измерений микротвердости образца в направлении, перпендикулярном плоскости соединения исходных пластин

быстрый нагрев локальных участков деформируемого материала и замедленный отвод тепла. Наличие термически разупрочненных зон является причиной локализации пластического течения и неэффективного исчерпания запаса пластических свойств титановых сплавов.

2. При сварке многослойных пакетов из технически чистого титана наиболее рациональной является несимметричная схема сварки, обеспечивающая получение менее дефектного материала. Формирование 12-слойного материала «BT1-0 - BT1-0» с использованием симметричной угловой схемы сварки взрывом сопровождается образованием повышенного количества полос локализованного течения. Наиболее высокой склонностью к образованию полос обладают две центральные пластины титана, что обусловлено удвоением выделяемой энергии при их контакте (по отношению к другим парам взаимодействующих пластин). Для швов, формируемых при сварке центральных пластин, характерны волнообразная форма и наиболее высокие значения амплитуды и длины волн.

3. Использование параллельной симметричной схемы сварки взрывом позволяет сформировать многослойный композит «BT1-0 - BT23» с меньшим количеством полос локализованного течения по сравнению с угловой симметричной схемой сварки. Предел прочности и ударная вязкость семислойного материала, полученного по параллельной симметричной схеме сварки взрывом, на 30 % и 40 % выше по сравнению с композитом, сваренным по угловой симметричной схеме. В условиях малоциклового усталостного нагружения долговечность композиции, полученной по параллельной симметричной схеме сварки взрывом, почти на порядок превышает долговечность отожженного сплава BT23. Полученные результаты объясняются благоприятным влиянием межслойных границ, при прохождении которых происходит смена траектории и торможение усталостных трещин. Неравномерность развития трещин особо проявляется на сварных швах с большой амплитудой.

4. Сварка взрывом сопровождается высокоскоростным нагревом поверхностных слоев титановых пластин на глубину ~ 200...300 мкм. В пределах этого слоя происходит кардинальное преобразование исходной структуры и формируется зеренно-субзеренная структура с размерами структурных элементов, равными 200...500 нм. Сохранение в титановых заготовках нано- и субмикроструктурной структуры, предварительно созданной по технологии обработки высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, возможно лишь на глубине, превышающей зону высокотемпературного нагрева титана. Более рационально применение в качестве заготовок для сварки взрывом пластин титана, полученных из трубчатых заготовок после холодной ротационной вытяжки со степенью обжатия 50 % и отжига в течение 1 часа при 400...450 °С.

5. Испытания на ударный изгиб композита, сформированного по несимметричной схеме сварки взрывом, свидетельствуют о явной зависимости ударной вязкости от ориентации надреза относительно сваренных пластин. При нагружении 16-слойных образцов силой, ориентированной перпендикулярно плоскости сопряжения слоев, зафиксирован уровень ударной вязкости (190



Дж/см<sup>2</sup>), соответствующий исходному титану (185 Дж/см<sup>2</sup>). При этом предел прочности сварного композита на 33 % выше по сравнению с исходным титаном ВТ1-0. Существенное снижение показателей ударной вязкости при испытании 12-слойного композита, сформированного по симметричной угловой схеме, обусловлено формированием множества протяженных полос локализованного пластического течения.

6. В результате деформационного упрочнения и фазовых превращений, имеющих место при сварке взрывом, микротвердость титана ВТ1-0 и сплава ВТ23 возрастает. Средний уровень микротвердости упрочненных пластин титана ВТ1-0 и ВТ23 составляет 2550 МПа и 3900 МПа, соответственно. В зоне сильнодеформированных зерен титана ВТ1-0 и сплава ВТ23 значения микротвердости достигают 3000 МПа и 4500 МПа, соответственно. Максимальное значение микротвердости наблюдается в вихревых зонах сварного шва и составляет 6300 МПа.

7. Анализ формы полос сдвига позволяет воспроизвести последовательность развития процессов пластического течения материалов во времени. Полосы, сформировавшиеся на позднем этапе, искажают форму полос, возникших ранее. Искажение всех полос сдвига, образующих сетку и расположенных в пределах сварных швов волнообразной формы, свидетельствует о том, что этап формирования полос предшествовал возникновению волн. Наибольшее число дефектов наблюдается в титановом сплаве ВТ23 в непосредственной близости от сварных швов в окрестностях гребней и впадин волн. В процесс интенсивной пластической деформации вовлечено менее 5 % объема пластин. Самые протяженные полосы локализованного сдвига, расположенные под углом 30° к плоскости сопряжения пластин, зафиксированы в центральной части семислойного композиционного материала.

8. Титановый сплав ВТ23 с двухфазной ( $\alpha+\beta$ ) структурой является эффективным модельным материалом для изучения процессов пластического течения, имеющих место при сварке взрывом. Изменение формы зерен  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы является надежным критерием, характеризующим степень деформации материала. Наличие или отсутствие этих зерен в полосах локализованной пластической деформации свидетельствует об уровне нагрева материала и развитии в его локальных микрообъемах фазовых превращений.

9. При сварке взрывом тонколистовых заготовок с получением многослойных материалов типа «ВТ1-0 - ВТ1-0» следует избегать безволновых режимов, приводящих к образованию сплошных прослоек жидкого металла. Образующиеся на их месте сварные швы являются особо хрупкими. В центре сплошных прослоек, возникших при кристаллизации расплава, формируются узкие зоны, отчетливо выявляемые методами химического травления. Механизм их образования связан с направленной кристаллизацией расплава титана одновременно с двух сторон при отводе тепла в холодные пластины. Повышенное содержание дефектов, характерное для зоны сопряжения растущих навстречу друг другу кристаллов, может являться причиной охрупчивания материала сварного шва. Данные рентгеноспектрального анализа свидетельствуют о повышенном содержании кислорода в зонах расплава.

10. Вихревые зоны, формируемые вблизи вершин и впадин волн сварных швов, преимущественно имеют литую структуру с характерным столбчатым строением кристаллитов, ориентированных в направлении отвода тепла. Образование структурных построений последнего типа свидетельствует о высокой температуре нагрева титана и сплава ВТ23 в сварных швах. Локальный характер нагрева околошовных зон до температур выше температуры полиморфного превращения и высокая скорость охлаждения микрообъемов за счет теплоотвода в холодный материал способствуют реализации мартенситного превращения и образованию в этих микрообъемах структуры  $\alpha'$ -мартенсита.

11. Для обеспечения повышенных прочностных свойств и биосовместимости при изготовлении изделий медицинского назначения (имплантатов и протезов), длительное время находящихся в контакте с живой тканью, целесообразно применение слоистых композиционных материалов с плакирующими слоями из пластичного чистого титана и центральным слоем из прочного титанового сплава, соединенными между собой сваркой взрывом по параллельной симметричной схеме. Реализация такой схемы исключает высокоскоростной перегиб центрального слоя, обладающего пониженной пластичностью и снижает вероятность образования полос адиабатического сдвига, оказывающих охрупчивающее воздействие на материал.

12. Результаты диссертационной работы используются при реализации учебного процесса по направлению «Материаловедение и технология материалов» и специальности «Материаловедение в машиностроении» в качестве составных частей курсов «Материаловедение», «Технология материалов и покрытий», «Технологические основы производства порошковых материалов и изделий». Материалы, полученные при выполнении диссертационной работы, отмечены серебряной медалью международной промышленной выставки «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия - 2010 г.» и золотой медалью международной промышленной выставки «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия - 2011 г.».

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Влияние температуры нагрева на структуру и свойства титана ВТ1-0 после ротационной вытяжки / Е.Б. Макарова, А.А. Батаев, Т.В. Журавина, И.А. Батаев, Д.В. Павлюкова, А.А. Руктуев // СТИН. 2012, № 4, С. 38-40.

2. Структура и механические свойства многослойных композиционных материалов из титана ВТ1-0 / И.А. Балаганский, И. А. Батаев, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, В.И. Мали, А. И. Смирнов // Обработка металлов. 2011, № 2, С. 43-45.

3. Неоднородность пластической деформации титановых сплавов при высокоскоростном нагружении в процессе сварки взрывом / Д. В. Павлюкова, И. А. Батаев, В.И. Мали, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, П. С. Ярцев // Обработка металлов. 2011, № 2, С. 46-47.

4. Формирование сваркой взрывом слоистых композиционных материалов из разнородных сталей / И. А. Батаев, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, Д. В. Павлюкова, Д. С. Терентьев // Обработка металлов. 2010, № 1, С. 6-8.

5. Интенсивная пластическая деформация и упрочнение титана в процессе ротационной раскатки труб / И. А. Батаев, З.Б. Батаева, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, Д. В. Павлюкова, А. И. Попелюх, А. А. Руктуев // Обработка металлов. 2010, № 2, С. 32-35.

6. Пластическая деформация и поверхностное упрочнение высокомарганцовистой стали индентором сферической формы, колеблющимся с ультразвуковой частотой. / А. А. Батаев, И. А. Батаев, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, Д. В. Павлюкова, Ю.Н. Ромашова // Деформация и разрушение материалов. 2010, № 4, С. 32-35.

7. Особенности процессов, происходящих при ультразвуковой поверхностной пластической деформации и термической обработке технического железа / А. А. Батаев, В. А. Батаев, И. А. Батаев, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, Д. В. Павлюкова, Ю. Н. Ромашова // Физическая мезомеханика. 2010, Т. 13, № 2, С. 97-101.

8. Особенности поверхностного упрочнения стали Гадфильда при воздействии высокопрочного индентора / В. А. Батаев, И. А. Батаев, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, А. Ю. Огнев, Д. В. Павлюкова, А. М. Теплых // Научный вестник НГТУ. 2010, № 1 (38), С. 181-184.

9. Макарова Е. Б., Великосельская Е. Ю., Прохов Д. П. Структура и свойства композиционных материалов, полученных методом сварки взрывом титановых пластин // Машиностроение – традиции и инновации: сборник трудов Всероссийской молодежной конференции. – Юрга: изд-во Юргинский технологический институт. 2011, С. 238-240.

10. Особенности пластической деформации поверхностных слоев титановых заготовок при сварке взрывом / Павлюкова Д.В., Мали В.И., Батаев А.А., Батаев И.А., Макарова Е.Б. // IV Международная Конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов»: сборник материалов. – М.: изд-во ИМЕТ РАН, 2011. С. 481-483.

11. Макарова Е. Б., Журавина Т. В., Руктуев А.А. Структура и прочностные свойства титана ВТ1-0 деформированного в холодном состоянии по технологии ротационной вытяжки // Современные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 2 – Томск: изд-во Томский политехнический университет. 2011, С. 181-182.

12. Макарова Е. Б., Голиков А. Ю., Степанова Н. В. Особенности структуры и прочностных свойств титановых труб, полученных в процессе ротационной вытяжки // Труды XII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» - Новосибирск: изд-во НГТУ. 2011, С. 430-432.

13. Структурные исследования стали 20, подвергнутой сварки взрывом / И. А. Батаев, Е. Д. Головин, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, Д. В. Павлюкова // Наука. Промышленность. Оборона.: труды XI Всероссийской научно-технической конференции. - Новосибирск: изд-во НГТУ. 2010, С. 37-40.

14. Структурные особенности сваренных взрывом листовых заготовок разнородных сталей / И. А. Батаев, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, Д. В. Павлю-

кова, Д. С. Терентьев // Труды всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». - Новосибирск: изд-во НГТУ. 2010, С. 41-43.

15. Батаев И. А., Макарова Е. Б., Мали В.И. Сварка взрывом тонколистовых пластин из низкоуглеродистой стали 20 // Образования, наука, инновации - вклад молодых исследователей: материалы V (XXXVII) Международной научно-практической конференции. – Кемерово: изд-во ООО «ИНТ». 2010, Вып. 11, Т.2, С. 560-563.

16. Особенности строения соединений, полученных методом сварки взрывом листовых заготовок из низкоуглеродистых сталей / В. А. Батаев, И. А. Батаев, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, В. И. Мали // Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» - Новосибирск: изд-во НГТУ. 2010, С. 155-158.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20, тел./факс: (383)346-08-57  
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.  
заказ №            подписано в печать 14.09.2012 г.