

На правах рукописи



Батаев Иван Анатольевич

**СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ
МАТЕРИАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ
ВЗРЫВОМ ТОНКОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК
ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

Специальность 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования «Новосибирский
государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Мали Вячеслав Иосифович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Тарасов Сергей Юльевич

кандидат технических наук, доцент
Мельников Александр Григорьевич

Ведущая организация: Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «12» ноября 2010 г. в 15⁰⁰ 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 «12» октября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Иванцовский В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одна из наиболее важных задач, решаемых при проектировании конструкционных материалов и оптимизации технологических режимов их обработки, заключается в одновременном обеспечении высоких значений показателей прочности и надёжности, в частности предела текучести, ударной вязкости, трещиностойкости. Анализ основных дислокационных механизмов упрочнения металлических материалов свидетельствует о том, что прочностные свойства, с одной стороны, и показатели пластичности, вязкости и трещиностойкости – с другой, находятся в явном противоречии. Как правило, активизация механизмов дислокационного упрочнения, способствующих росту предела текучести материала и обеспечивающих, соответственно, снижение металлоёмкости проектируемых конструкций, приводит к снижению его вязкости. Таким образом, возрастает опасность хрупкого, внезапного разрушения конструкций.

Разрешением этого противоречия многие годы занимаются как отечественные, так и зарубежные специалисты в области материаловедения, физики металлов, механики разрушения. Были предложены различные подходы к решению отмеченной проблемы, связанные с оптимизацией режимов термического и термопластического упрочнения применяемых в промышленном производстве сталей, обоснованием методов их комбинированного упрочнения, разработкой принципиально новых материалов. Каждый из этих подходов имеет определённые достоинства и недостатки. В то же время универсального решения отмеченной проблемы до сих пор нет.

Решение, развиваемое в настоящей работе, заключается в формировании межслойных границ в сталях и использовании благоприятной роли, которую они оказывают на комплекс механических свойств. Эффективным методом, позволяющим создавать границы такого типа и формировать эффективную дислокационную структуру, является сварка взрывом стальных листовых заготовок. Процессы сварки взрывом активно исследовались примерно 40...50 лет назад. Основное внимание специалистов было направлено на исследование технологических особенностей этого процесса, изучение возможности качественного соединения разнородных материалов. В то же время задача эффективного применения сваренных взрывом многослойных композиций с целью решения противоречия между показателями прочности и трещиностойкости глубоко не изучалась. Анализ работ отечественных и зарубежных специалистов, в том числе и работ, выполненных на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ, свидетельствует о целесообразности проведения дополнительных глубоких научных исследований по указанной проблеме. Эти задачи актуальны и связаны с решением важных прикладных и фундаментальных научных задач.

Исследования по диссертационной работе выполнены в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (мероприятие № 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами», проект П1681); аналитической ведомств-

венной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» на 2009-2010 гг. (мероприятие 2 «Проведение фундаментальных исследований в области естественных, технических и гуманитарных наук», проект РНК: 2.2.1.1/4177); федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы («Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров совместно с малыми инновационными предприятиями в области высокотехнологичной медицинской техники», ГК № 02.740.11.0846).

Цель и задачи работы

Цель диссертационной работы заключалась в повышении конструктивной прочности низкоуглеродистой стали путём формирования эффективной структуры феррито-перлитного типа с множеством межслойных границ раздела при реализации процесса сварки взрывом тонколистовых заготовок.

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

1. Изучение процессов тонких структурных преобразований, происходящих в поверхностных слоях динамически взаимодействующих стальных заготовок.

2. Исследование особенностей статического, динамического и усталостного разрушения многослойных композиций; изучение роли границ раздела в развитии усталостных трещин.

3. Выявление эффективности предварительного поверхностного и объёмного упрочнения тонколистовых стальных заготовок, используемых для последующей сварки взрывом.

4. Изучение влияния сварки взрывом на стабильность структуры, сформированной путем поверхностной ультразвуковой обработки и ротационной вытяжки стали.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований особенностей тонкого строения сварных швов и околошовных зон, сформированных в процессе сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали 20.

2. Результаты исследования процессов статического, динамического и усталостного разрушения многослойных материалов, полученных по технологии сварки взрывом.

3. Результаты математического моделирования процессов деформации и нагрева околошовных зон, формируемых при динамическом взаимодействии тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали.

4. Предложения по формированию эффективной структуры тонколистовых заготовок, используемых для получения многослойных материалов, обладающих высоким комплексом механических свойств.

Научная новизна.

1. Экспериментально установлено, что сварка взрывом является эффективным методом формирования многослойных материалов с высоким комплексом механических свойств. На примере многослойной стали 20 показана возможность одновременного двукратного роста прочностных свойств и ударной

вязкости, а также увеличения усталостной трещиностойкости при существенном снижении пластичности материала.

2. Методами структурного анализа установлено, что причины повышения ударной вязкости и усталостной трещиностойкости связаны с благоприятным влиянием межслойных границ. Границы сварных швов являются эффективными барьерами на пути распространяющихся усталостных трещин. Зафиксированы случаи, когда усталостные трещины, попадая на сварные швы, некоторое время движутся в обратном направлении. Фрактографические исследования показали наличие вязких изломов в окрестности сварных швов при разрушении слоистых материалов.

3. Экспериментально показано, что параметры волн, образующихся при сварке металлических материалов взрывом, зависят от кристаллографической ориентации зерен, участвующих в их построении. В тех случаях, когда длина волны существенно превосходит размер зерна свариваемого материала, влияние кристаллографической ориентации зерен на форму волн нивелируется.

4. Установлено, что при сварке взрывом стальных пластин, имеющих в исходном состоянии феррито-перлитное строение, под действием интенсивной деформации и кратковременного нагрева в ферритных зернах формируется субмикроструктурная структура. С использованием просвечивающей электронной микроскопии показано, что размер зеренно-субзеренных построений, образующихся вблизи сварных швов, составляет 100...400 нм.

5. Методами структурных исследований установлено, что в условиях динамического взаимодействия стальных пластин имеет место двойникование как в ферритных зернах, так и в пластинчатом перлите. Экспериментально установлено, что двойникование в перлите характерно не только при проявлении сжимающих напряжений, но также и для нагружения по схеме растяжения.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Многослойные материалы, полученные по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из углеродистых сталей, обладают повышенным комплексом механических свойств и могут быть использованы для изготовления деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения.

2. В качестве метода повышения комплекса механических свойств исходных заготовок, используемых для получения по технологии сварки взрывом многослойных заготовок предложена ротационная вытяжка стали 20 со степенью 70 % с последующим отжигом в течение 1 часа при 540...560 °С. Такая обработка обеспечивает формирование однородной ультрамелкозернистой структуры с размером зерна ~ 1 мкм.

3. Технические решения, основанные на применении ультразвуковых колебаний, были использованы при оптимизации режимов лазерной сварки и лазерной резки на технологическом лазерном комплексе «Сибирь - 2».

4. Результаты экспериментальных и теоретических исследований, полученные при выполнении диссертационной работы, используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и

технология новых материалов» и инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении».

5. Результаты работы отмечены серебряной медалью VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций, золотой медалью Сеульского международного инновационного форума (SIIF-2008), а также медалями специализированных промышленных выставок «Металлы Сибири» (ITE Сибирская ярмарка, 2009 и 2010 гг.) .

Достоверность результатов

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением современного аналитического оборудования, статистических методов оценки погрешности измерений, использованием взаимодополняющих методов изучения структуры и механических свойств материалов, параллельным проведением физического и математического моделирования процессов структурных преобразований при сварке тонколистовых стальных заготовок, соответствием полученных результатов современным представлениям о природе процессов, происходящих при сварке взрывом металлических материалов.

Личный вклад автора состоит в формулировании задач, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обобщении полученных результатов, сопоставлении полученных результатов с литературными данными и формулировании выводов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях «Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2010)», Черногория, г. Бечичи, 2010 г.; «International Symposium on Explosion, Shock wave and High-energy reaction Phenomena 2010 (3rd ESHP Symposium)», Южная Корея, г. Сеул, 2010 г.; «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск, 2010 г., на Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», г. Томск, 2007 г.; на Всероссийской конференции «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов», г. Белгород, 2010 г.; на Уральской школе металловедов-термистов (2008, 2010 гг.), на Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», Новосибирск 2009, 2010 гг.; на Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», г. Новосибирск, 2008-2010 гг.; на Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы технологии машиностроения», Новосибирск, 2010 г.; на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.», г. Новосибирск, 2007-2009 гг.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 17 печатных научных работ, из них: 10 статей в реферируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в сборниках трудов Международных и Всероссийских научно-технических конференций, 1 патент на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов и приложения. Работа изложена на 225 страницах основного текста, включая 90 рисунков, 10 таблиц, библиографический список из 166 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, описаны основные направления проведенных исследований.

В первом разделе «Металлические композиционные материалы со слоистой структурой» представлен обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы по исследуемой проблеме. Проведен анализ теоретических и экспериментальных данных по вопросам, связанным с повышением комплекса механических свойств металлических материалов при использовании различных дислокационных механизмов упрочнения. Особое внимание уделено проблемам объемного поверхностного упрочнения материалов путем измельчения структурных элементов, формирования субмикро- и нанокристаллической структуры. Описаны технологические схемы, основанные на интенсивной пластической деформации в холодном состоянии, проанализированы их достоинства и недостатки. Отмечено, что один из эффективных подходов к решению проблем повышения комплекса механических свойств металлических материалов заключается в формировании многослойных металлических материалов. На основании анализа материалов, отраженных в литературном обзоре, сформулированы цели и задачи исследования.

Во втором разделе «Материалы и методы исследования» обоснован выбор исследуемых материалов, описаны технологические процессы подготовки объектов исследования, представлены методы изучения их структуры и механических свойств. Основным исследуемым в работе материалом являлась широко распространенная низкоуглеродистая углеродистая сталь 20. Дополнительно для решения ряда задач в качестве модельных материалов применяли техническое железо, сталь Гадфильда (110Г13Л), электротехническую сталь 2312, стали 60 и 60Г.

Сварку взрывом выполняли во взрывных камерах Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Листовые заготовки имели размеры 50x100x1 мм и 70x120x1 мм. Взрывчатым веществом служил аммонит 6ЖВ. По технологии сварки взрывом получали многослойные материалы. Максимальное количество слоев составляло 21. В зависимости от количества соединяемых листов сварка осуществлялась за один, два и три этапа. Схема двухэтапного процесса получения тринадцатислойных композитов представлена на рис. 1. Для сварки использовали заготовки из стали 20, находящейся в различном структурном состоянии. С целью формирования однородной феррито-перлитной структуры листовые заготовки отжигали при 920 °С. Кроме того были использованы процессы объемного и поверхностного упрочнения, обеспечивающие формирование ультрамелкозернистой и нанокристаллической

структуры стали. Структуру первого типа получали в процессе ротационной вытяжки трубчатых заготовок и последующего отжига. С целью формирования нанокристаллической структуры в феррите поверхностных слоев применяли технологию обработки стальных заготовок высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой.

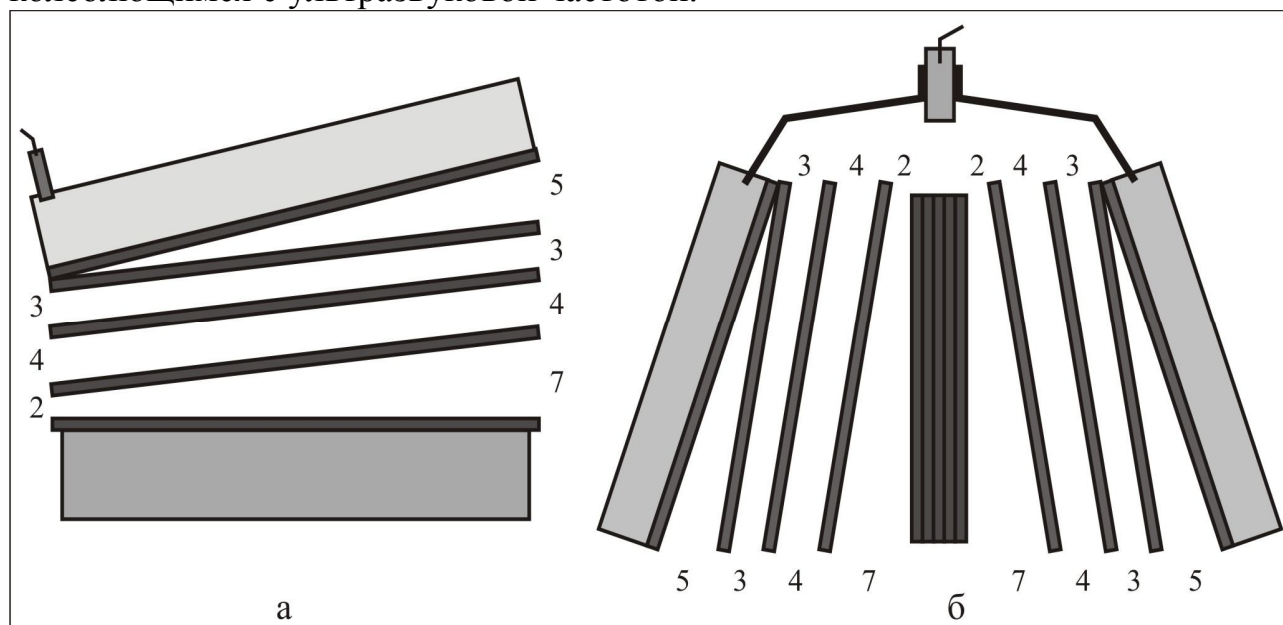


Рис. 1. Схема получения тринадцатислойного композиционного материала методом сварки взрывом пластин из стали 20: а - этап получения пакета из 5 пластин; б - этап соединения пятислойного пакета и боковых комплектов из четырех пластин, цифрами показано расстояние между пластинами в миллиметрах.

Для проведения структурных исследований использовали методы оптической металлографии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Металлографические исследования выполнены на микроскопе типа *AXIO Observer A1m (Carl Zeiss)*. С целью проведения фрактографических исследований применяли растровый электронный микроскоп *EVO 50 XVP (Carl Zeiss)*, оснащенный электроннозондовым микроанализатором. Дислокационную структуру материалов изучали с применением трансмиссионного электронного микроскопа *Tecnai G2 20TWIN*.

Прочностные свойства исследуемых материалов оценивали в соответствии с ГОСТ 1497-84. Для проведения испытаний применяли установку Instron 3369, оснащённую видеоэкстензометром. Испытания на ударную вязкость выполняли по ГОСТ 9454-78 на образцах типа Шарпи. Трещиностойкость полученных в работе материалов оценивали по методике, основанной на построении кинетических диаграмм усталостного разрушения плоских образцов.

Ряд задач, решаемых в диссертационной работе, был связан с необходимостью оценки температуры, деформации и других параметров в поверхностных слоях динамически взаимодействующих стальных заготовок. Важнейшая особенность сварки материалов взрывом заключается в кратковременности процесса и высокой локальности микрообъёмов, в которых имеет место интенсивная деформация и происходят резкие изменения температуры. Точные

физические измерения температуры и других величин для сварки взрывом практически невозможны. Решение этих задач представлено в **третьем разделе** диссертационной работы «Моделирование процессов сварки взрывом листовых сталей в системе AUTODYN 11.0».

Результаты численного моделирования, выполненного по методу конечных элементов, свидетельствуют о том, что даже при относительно невысоком пространственном разрешении (25 ячеек на миллиметр) хорошо воспроизводится процесс образования кумулятивной пелены впереди точки контакта. Повышение пространственного разрешения до 75 ячеек на мм позволяет выявить тонкие особенности течения материалов в области точки контакта. Максимальная температура, зафиксированная в точке контакта, составляет 2000...2300 К, что значительно выше температуры плавления стали. Глубина зоны локального повышения температуры не превышает 0,1 мм.

Четвёртый раздел диссертационной работы «Структурные исследования многослойных материалов, сформированных сваркой взрывом стальных пластин» посвящён выбору эффективной структуры исходных стальных заготовок и анализу структурных преобразований, имеющих место при их динамическом взаимодействии.

На практике получение многослойных материалов возможно при использовании различных схем сварки взрывом. В данной работе в качестве исходных заготовок были использованы стальные пластины толщиной 1 мм. Экспериментально показано, что композиции с количеством слоёв 5 и менее целесообразно получать за один этап. Дальнейшее увеличение количества слоёв осуществляли при использовании симметричных схем сварки путём присоединения с боковых сторон дополнительных пластин. В данной работе были выбраны такие режимы сварки, которые во всех случаях обеспечивали формирование сварных швов волнообразной формы. Показано, что изменяя технологические режимы сварки взрывом, геометрические параметры и механические свойства исходных стальных заготовок, возможно формирование многослойных композиций с параметрами волн в широком диапазоне значений.

В сварном соединении можно выделить зоны слабо- и сильно деформированного основного металла. При химическом травлении шлифов эти зоны выявляются, соответственно, как слабо- и сильноотравляющиеся (рис. 2). Используя методы оптической микроскопии, растровой и трансмиссионной электронной микроскопии были изучены особенности строения сварных швов и прилегающих к ним зон. Одной из наиболее характерных для исследуемых сварных швов особенностей является формирование вихреподобных построений (рис. 3). Методами структурного анализа показано, что вихреподобные построения, формируемые при сварке взрывом, обусловлены переходом материала в жидкое состояние и имеют дендритное строение. Диаметр отдельных дендритов составляет 200...800 нм, длина – несколько микрометров. В процессе ускоренного охлаждения расплавленной зоны образуется структура мелкокристаллического высокопрочного мартенсита.

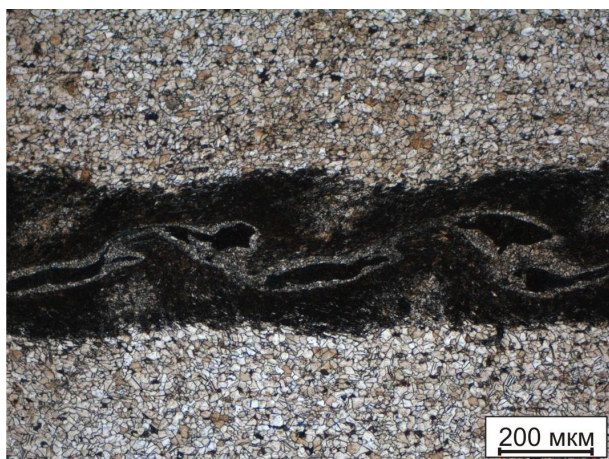
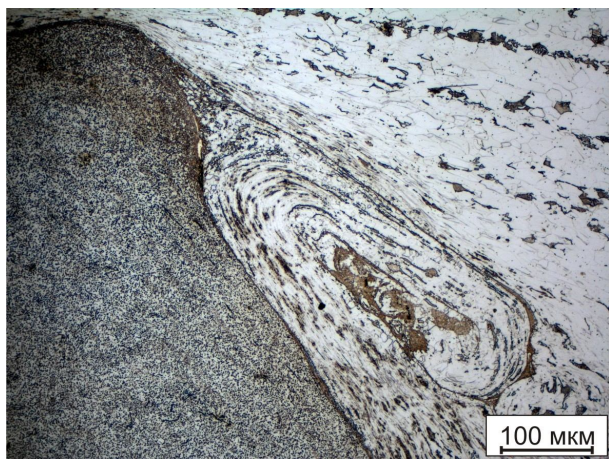
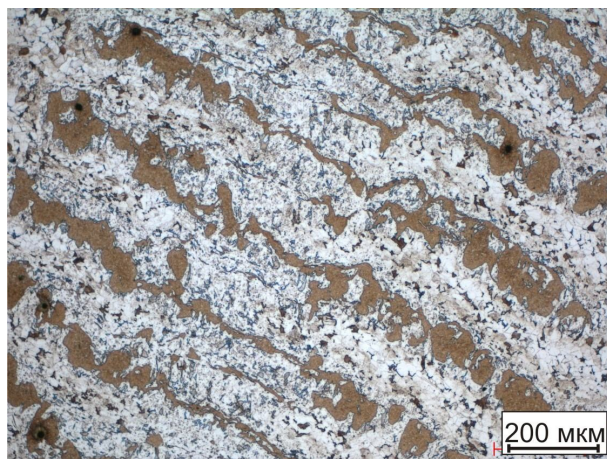


Рис. 2. Сильно- и слабдеформированные зоны в сваренных взрывом стальных пластинах, выявленные методом химического травления.

Установлено, что структура, формирующаяся при сварке взрывом множества стальных пластин, является существенно неоднородной как в поперечном направлении, так и вдоль профиля волны. Экспериментально показано, что параметры волн, образующихся при сварке металлических материалов взрывом, зависят от кристаллографической ориентации зерен, участвующих в их построении. В тех случаях, когда длина волны существенно превосходит размер зерна свариваемого материала, влияние кристаллографической ориентации зерен на форму волн нивелируется.



а



б

Рис. 3. Вихри, образующиеся вблизи гребней и впадин волн при сварке взрывом: а – в поперечном сечении, б – в сечении, параллельном плоскости сопряжения пластин.

В процессе динамического взаимодействия стальных пластин в зоне сварного шва имеют место резкие изменения структуры. В зонах, в которых отсутствуют фазовые превращения, обусловленные интенсивным нагревом материала, перестройка исходной структуры связана с проявлением механизмов деформационного двойникования и дислокационного скольжения. Механизм деформационного двойникования реализуется как в ферритных зёрнах, так и в пластинчатом перлите сталей (рис. 4). Экспериментально установлено, что двойникование в перлите характерно не только при проявлении сжимающих напряжений, но также и для нагружения по схеме растяжения.

С использованием просвечивающей электронной микроскопии показано, что размер зеренно-субзеренных построений, формируемых вблизи сварных швов, составляет 100...400 нм (рис. 5 а). При удалении от границ на 50 – 100 мкм размер этих построений возрастает до 500...800 нм (рис. 5 б).

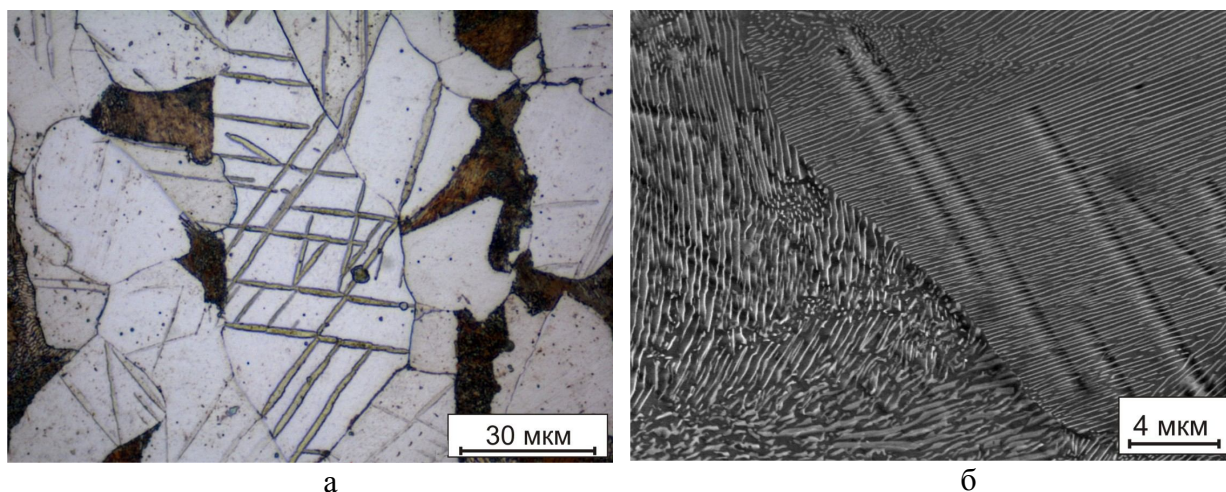


Рис. 4. Двойники в ферритных зёрнах (а) и в структуре пластинчатого перлита (б), сформированные в условиях динамического нагружения сталей.

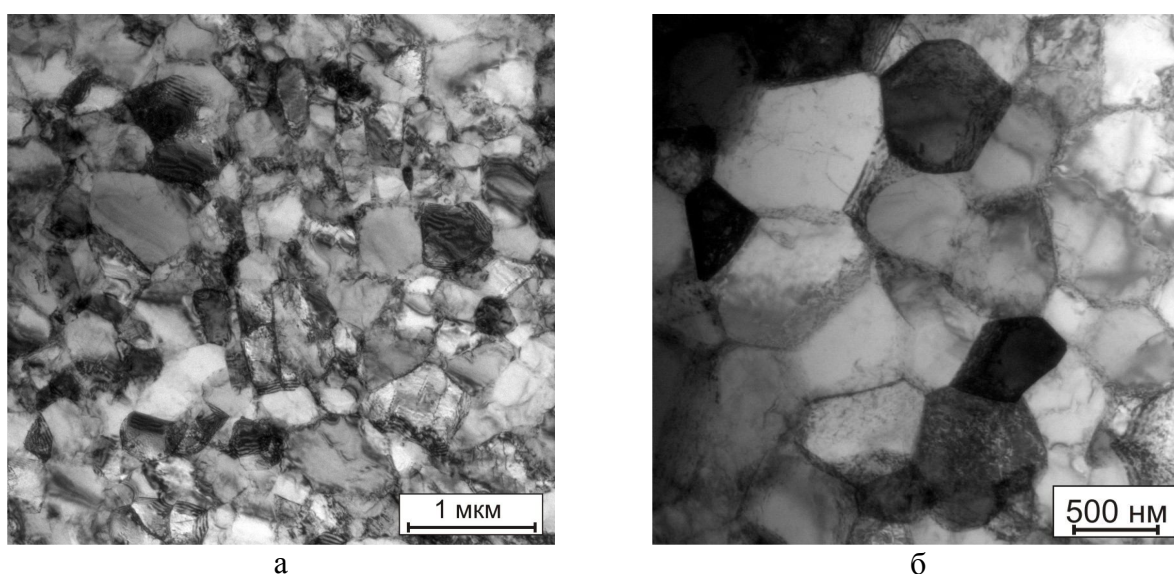


Рис. 5. Зеренно-субзеренная структура феррита, сформированная в околошовной зоне при реализации процесса сварки взрывом пластин из стали 20.

В зависимости от решения поставленных задач при получении многослойных стальных композиций может быть реализован промежуточный или окончательный отжиг в диапазоне температур от 540...560 °С до 700 °С. В этих условиях структура сварных швов является более благоприятной по сравнению со структурой окружающего материала (рис. 6).

Для повышения комплекса механических свойств сварных соединений целесообразно выбрать благоприятную исходную структуру заготовок. В работе оценивали возможность получения в поверхностных слоях стальных пластин структуры нанокристаллического типа. Для решения этой задачи использовали метод обработки поверхности индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой.

Анализ результатов структурных исследований показал, что при использовании выбранных в работе режимов нанокристаллическая структура формируется в слое толщиной не более 50 мкм. Сравнение полученных данных с результатами математического моделирования свидетельствует о том, что сохра-

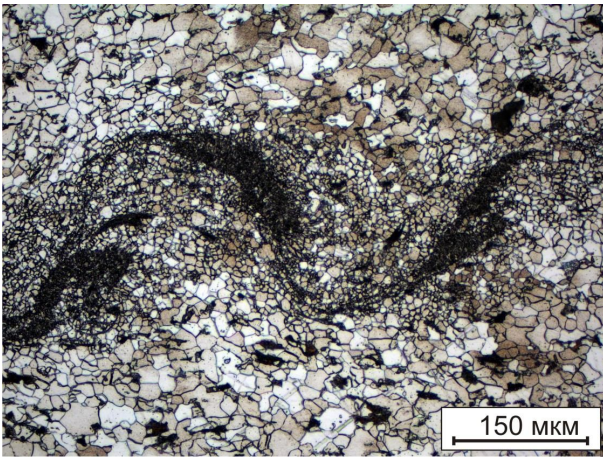
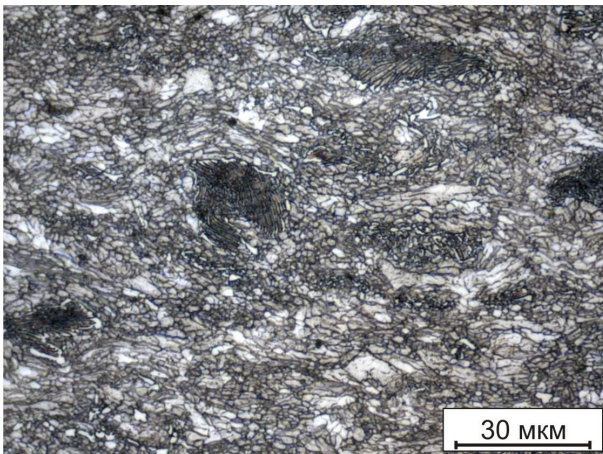
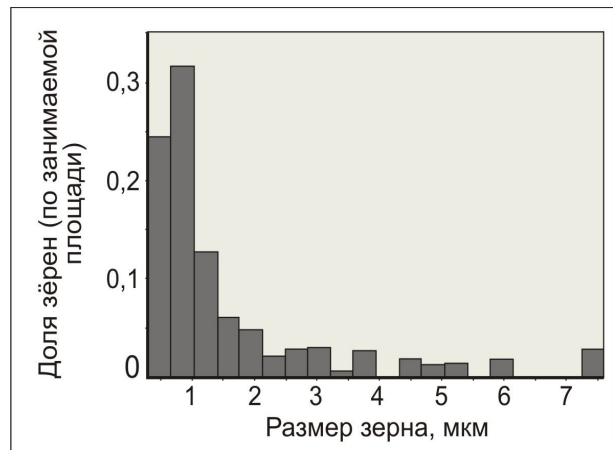


Рис. 6. Структура сварного соединения «сталь 20 – сталь 20» после отжига при 600 °С.



а



б

Рис. 7. Ультрамелкозернистая структура феррита стали 20, сформированная при ротационной вытяжке и отжиге при 540 °С (а) и 580 °С (б). б – данные *EBS*D-анализа.

В пятом разделе «Механические свойства многослойных материалов со структурой, сформированной в процессах холодной пластической деформации и сварки взрывом» приведены результаты прочностных испытаний материалов, оценки ударной вязкости и усталостной трещиностойкости. В общем случае следует отметить, что сварка взрывом является эффективным методом формирования многослойных материалов с высоким комплексом механических свойств. На примере материалов, состоящих из 13 и 21 слоев стали 20, показана возможность одновременного двукратного роста прочностных свойств и ударной вязкости, а также увеличения усталостной трещиностойкости при существенном снижении пластичности материала.

Результаты прочностных испытаний образцов, состоящих из 21 слоев стали 20 (сваренных за три этапа), приведены на рис. 8. Исследованы свойства образцов типов А, Б и В. Наиболее высокий уровень прочностных свойств зафиксирован у образцов типа Б, отожженных в течение 1 часа при 580 °С после первого и второго этапов сварки.

В процессе испытаний на ударную вязкость показано, что сопротивление слоистых композиционных материалов разрушению в значительной степени зависит от характера нагружения образцов. Максимальный эффект достигается

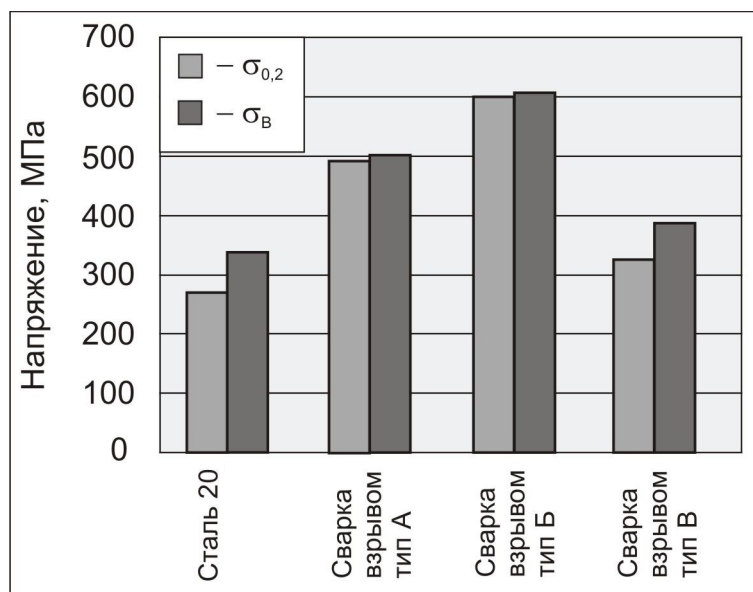


Рис. 8. Результаты испытаний массивной стали 20 и 21-слойной композиции на растяжение: образцы типа А - отжиг после первого этапа сварки; образцы типа Б - отжиг после первого и второго этапов сварки; образцы типа В - отжиг после первого, второго и третьего этапов сварки.

в том случае, если нагрузка перпендикулярна плоскости сопряжения пластин (рис. 9б). По сравнению с контрольным материалом (монолитная сталь 20 без слоёв) ударная вязкость образцов типа 2 возросла на 27 % и составила 0,98 МДж/м² (рис. 10). Отжиг композиции «сталь 20 – сталь 20» без фазовой перекристаллизации, проведенный в течение 1,5 часов при 600 °С, увеличивает ее ударную вязкость с 0,98 МДж/м² до 1,48 МДж/м². Это обусловлено дислокационными преобразованиями сильнодеформированного металла, рекристаллизацией феррита, приводящей к резкому измельчению зерен, распадом локальных микрообъемов мартенсита и релаксацией остаточных напряжений в зоне шва. Несмотря на повышенную прочность сварных швов в их окрестности формируются изломы с явными признаками вязкого разрушения.

Ещё в большей степени формирование структуры слоистого типа отражается на характере усталостного разрушения материалов. Благодаря присутствию межслойных границ со свойствами, отличающимися от свойств основного металла, энергоёмкость процесса усталостного разрушения резко возрастает. В отличие от прямолинейного развития трещин в обычной стали 20 (рис. 11г), для трещины, движущейся по слоистому материалу, характерно резкое изменение траектории (рис. 11б,в). На кинетических диаграммах усталостного разрушения это отражается в виде провалов (рис. 11а). Таким образом, наличие множества межслойных границ благоприятно отражается не только на ударной вязкости, но также и на усталостной трещиностойкости сталей. Границы сварных швов являются эффективными барьерами на пути распространяющихся усталостных трещин. Зафиксированы случаи, когда усталостные трещины, попадая на сварные швы, некоторое время движутся по волне в обратном направлении (рис. 11б,в). Наиболее существенное влияние на изменение траектории распространения усталостных трещин в многослойных материалах оказывают рельефные сварные швы с высоким профилем волн.

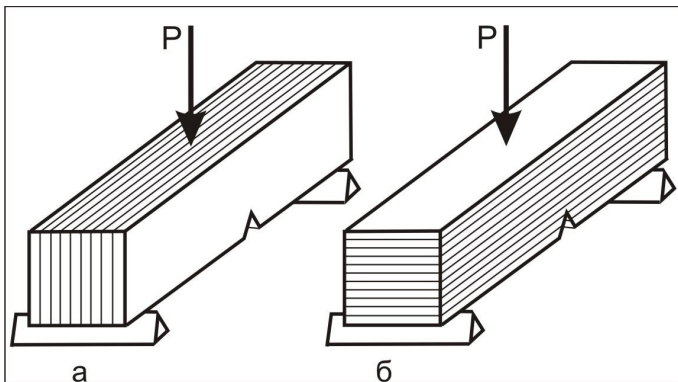


Рис. 9. Схемы испытания слоистых материалов на ударную вязкость.

ностные свойства композиции не оказывает. Данный результат согласуется с выводами, полученными при проведении математического моделирования и изучении параметров поверхностных слоёв, формируемых при обработке стали индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой.

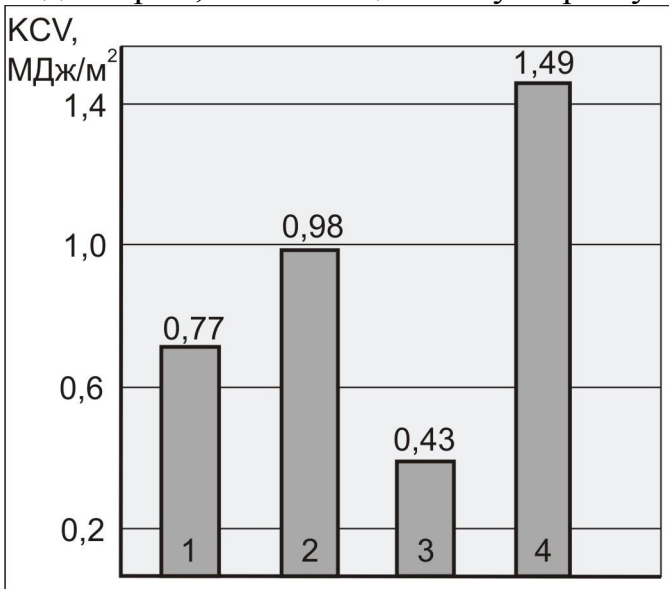


Рис. 10. Ударная вязкость слоистых композиционных материалов и материалов для сварки в исходном состоянии: 1 - сталь 20 в исходном состоянии; 2 - слоистые образцы без отжига (испытание по схеме б, рис. 9); 3 - слоистые образцы без отжига (испытание по схеме рис. 9а); 4 - слоистые образцы после отжига (испытание по схеме рис. 9б).

ция обоснован подход к решению проблемы повышения показателей надежности материалов конструкционного назначения. В качестве барьеров для распространяющихся трещин предложено использовать тонкие прослойки высокопластичных материалов.

Технические решения, основанные на применении ультразвуковых колебаний, были использованы при оптимизации режимов лазерной сварки и

Формирование ультрамелкозернистой структуры в исходных стальных заготовках представляет собой дополнительный эффективный механизм повышения комплекса механических свойств соединений, полученных сваркой взрывом. Измельчённая до наноразмерного состояния структура феррита в слое толщиной ~ 30 мкм существенного влияния на проч-

В шестом разделе «Промышленные испытания результатов экспериментальных исследований» представлены материалы, характеризующие практическую значимость работы. Анализ экспериментальных результатов, полученных при выполнении диссертационной работы, свидетельствует о том, что многослойные материалы, полученные по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из углеродистых сталей, обладают повышенным комплексом механических свойств и могут быть использованы для изготовления деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения.

С учетом вывода об особой благоприятной роли границ в многослойных сварных компози-

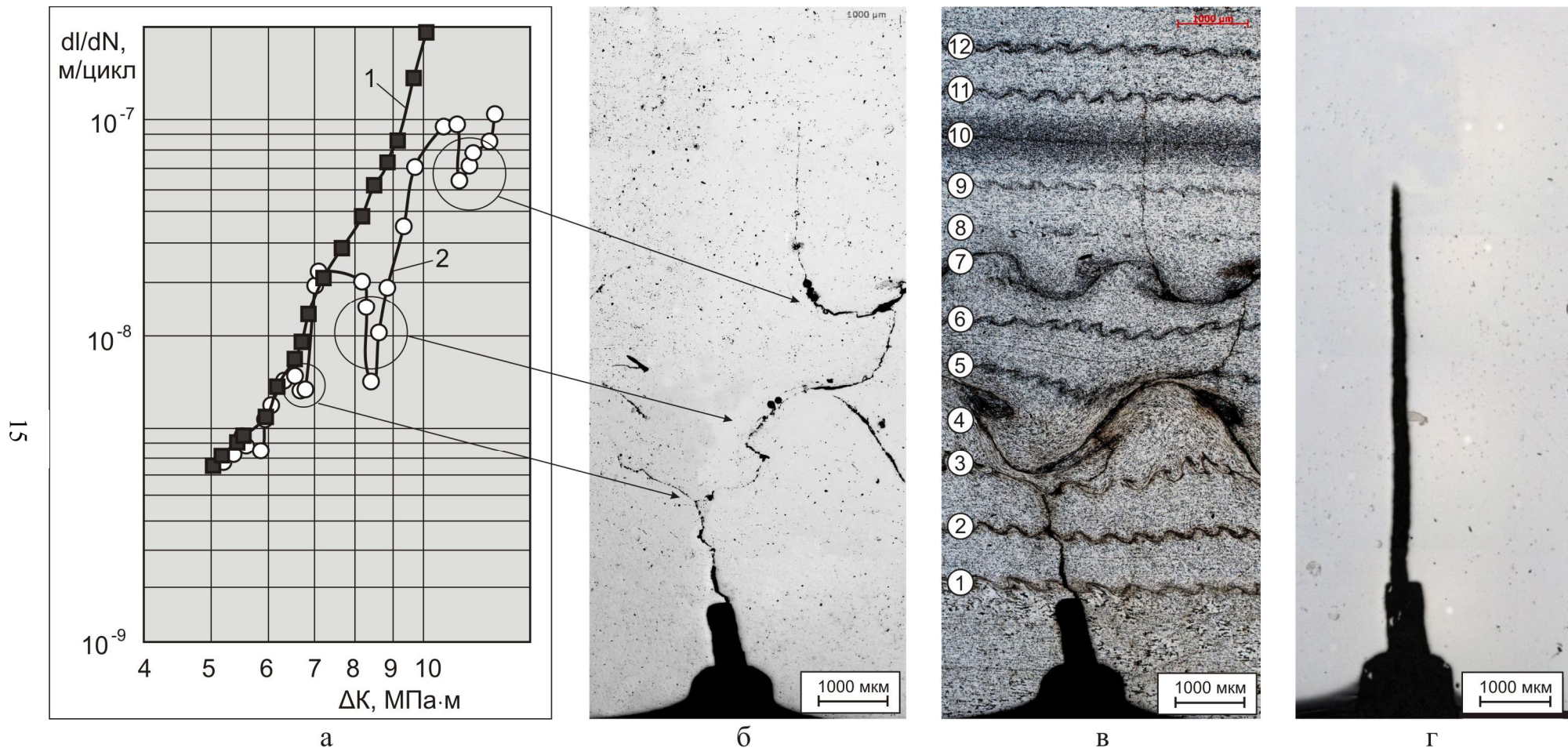


Рис. 11. Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость слоистого композиционного материала (2) и стали 20 в исходном состоянии (1):

а - кинетические диаграммы усталостного разрушения; б - траектория распространения трещины в слоистом композиционном материале; в - траектория распространения трещины в образце стали 20 в исходном состоянии.

лазерной резки на технологическом лазерном комплексе «Сибирь - 2». Результаты исследований используются в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск) при назначении режимов высокоэнергетической обработки углеродистых и высоколегированных сталей, а также сплавов на основе титана и алюминия.

Материалы экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в работе, используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» и инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении».

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, были представлены на ряде научно-технических выставок. Экспонаты, подготовленные с участием автора, отмечены серебряной медалью VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций, золотой медалью Сеульского международного инновационного форума (SIIF-2008), а также медалями специализированных промышленных выставок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что структура, формирующаяся при сварке взрывом множества стальных пластин, является существенно неоднородной как в поперечном направлении, так и вдоль профиля волны. Механические свойства сварных швов по разные стороны от гребней волн различны. Экспериментально показано, что параметры волн, образующихся при сварке металлических материалов взрывом, зависят от кристаллографической ориентации зерен, участвующих в их построении. В тех случаях, когда длина волны существенно превосходит размер зерна свариваемого материала, влияние кристаллографической ориентации зерен на форму волн нивелируется.

2. Установлено, что в процессе динамического взаимодействия стальных пластин в зоне сварного шва имеют место резкие изменения структуры. В зонах, в которых отсутствуют фазовые превращения, обусловленные интенсивным нагревом материала, перестройка исходной структуры связана с проявлением механизмов деформационного двойникования и дислокационного скольжения. С использованием просвечивающей электронной микроскопии показано, что размер зеренно-субзеренных построений, формируемых вблизи сварных швов, составляет 100...400 нм. Экспериментально установлено, что двойникование в перлите характерно не только при проявлении сжимающих напряжений, но также и для нагружения по схеме растяжения.

3. Сварка взрывом является эффективным методом формирования многослойных материалов с высоким комплексом механических свойств. На примере многослойной стали 20, показана возможность одновременного двукратного роста прочностных свойств и ударной вязкости, а также увеличения усталостной трещиностойкости при существенном снижении пластичности материала. Установлено, что причины повышения ударной вязкости и усталостной трещиностойкости связаны с благоприятным влиянием межслойных границ. Несмот-

ря на повышенную прочность сварных швов в их окрестности формируются изломы с явными признаками вязкого разрушения. Границы сварных швов являются эффективными барьерами на пути распространяющихся усталостных трещин. Зафиксированы случаи, когда усталостные трещины, попадая на сварные швы, некоторое время движутся по волне в обратном направлении.

4. С применением программного комплекса *ANSYS AUTODYN 11.0* численно исследованы процессы, имеющие место в зоне, прилегающей к точке соударения двух стальных пластин, соединяемых взрывом взрывом. Установлено, что при реализации использованных для расчетов моделей воспроизводится процесс образования кумулятивной пелены впереди точки контакта. Максимальная температура в точке контакта динамически взаимодействующих пластин, определенная в процессе математического моделирования, составляет 2000...2300 К, что значительно выше температуры плавления стали. Показано, что глубина зафиксированной зоны локального повышения температуры не превышает 0,1 мм.

5. Экспериментально установлено, что при реализации технологии поверхностного упрочнения высокопрочным индентором диаметром 8 мм, колеблющимся с ультразвуковой частотой и прижатым к обрабатываемой заготовке с усилием 98 Н, глубина интенсивно деформированного слоя со структурой нанокристаллического типа не превышает 30...50 мкм, что соизмеримо с глубиной зоны локального повышения температуры до температуры фазовых превращений. Измельчённая до наноразмерного состояния структура феррита в слое толщиной ~ 30 мкм существенного влияния на прочностные свойства получаемых сваркой взрывом композиций не оказывает.

6. В качестве метода повышения комплекса механических свойств исходных заготовок, используемых для получения многослойных композиций по технологии сварки взрывом, предложена ротационная вытяжка стали 20 со степенью 70 % с последующим отжигом в течение 1 часа при 540...560 °С. Повышение прочностных свойств обусловлено формированием однородной ультрамелкозернистой структуры с размером зерна ~ 1 мкм.

7. Результаты исследований, проведенных при выполнении диссертационной работы, используются в учебном процессе в НГТУ при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» и инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении». Материалы диссертационной работы применяются при чтении лекций по материаловедческим и технологическим курсам, а также в ряде лабораторных работ, проводимых на кафедре «Материаловедение в машиностроении» НГТУ. Полученные материалы экспонировались на всероссийских и международных выставках и были отмечены серебряной медалью VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций, золотой медалью Сеульского международного инновационного форума (SIIF-2008), а также медалями специализированных промышленных выставок, организованных в 2009 и 2010 гг. международным выставочным центром «*ITE* Сибирская ярмарка».

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Формирование сваркой взрывом слоистых композиционных материалов из разнородных сталей [Текст] / И. А. Батаев, Д. В. Павлюкова, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова // *Обработка металлов*. – 2010. – № 1 (46). – С. 6–8.

2. Интенсивная пластическая деформация и упрочнение титана в процессе ротационной раскатки труб [Текст] / И. А. Батаев, Е. Б. Макарова, А. И. Попелюх, Т. В. Журавина, Д. В. Павлюкова, А. А. Руктуев, З. Б. Батаева // *Обработка металлов*. – 2010. – № 2 (47). – С. 32–35.

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

4. Экспериментальное исследование явления фокусировки энергии во взрывных системах, включающих высококомплесные упругие элементы [Текст] / И. А. Балаганский, К. Nokamoto, Р. Manikandan, А. Д. Матросов, И. А. Стадниченко, Н. Miyoshi, И. А. Батаев, А. А. Батаев // *Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2010. – № 1 (14). – С. 62–73.

5. Пластическая деформация и поверхностное упрочнение высокомарганцовистой стали индентором сферической формы, колеблющимся с ультразвуковой частотой [Текст] / И. А. Батаев, А. А. Батаев, Ю. Н., Ромашова, Е. Б. Макарова, Т. В. Журавина, Д. В. Павлюкова // *Деформация и разрушение материалов*. – 2010. – № 4. – С. 32–36

6. Влияние исходного состояния на неоднородность структуры углеродистых сталей, упрочненных методом электронно-лучевой обработки при атмосферном давлении [Текст] / Е. А. Дробяз, И. А. Батаев, В. Г. Буров, Л. И. Тушинский, М. Г. Голковский // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2009. – № 3. – С. 3–8.

7. Особенности строения кристаллов видманштеттова феррита и цемента [Текст] / И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. Г. Буров, Я. С. Лизункова, Е. Е. Захаревич // *Сталь*. – 2008. – № 8. – С. 99–102.

8. Восстановление валов электрических машин с использованием технологии наплавки и ультразвуковой обработки покрытий [Текст] / А. М. Кручинин, Е. Е. Захаревич, И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. Г. Буров, А. А. Никулина // *Материаловедение*. – 2008. – № 3. – С. 45–49.

9. Особенности структурных превращений, обусловленные высокоскоростным нагревом углеродистых сталей [Текст] / А. А. Батаев, В. В. Иванцовский, И. А. Батаев, В. Г. Буров, А. М. Кручинин // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2006. – № 10. – С. 31–33.

10. Пластическое деформирование ультразвуковым инструментом наплавленных упрочняющих слоев [Текст] / В. Г. Буров, А. М. Кручинин, С. В. Буров, А. А. Бивалькевич, И. А. Батаев // *Обработка металлов*. – 2005. – № 3. – С. 21.

11. Mali, V. I. Structural features of wave formation in explosive welding of electrotechnical steel / V. I. Mali, A. A. Bataev, I. A. Bataev // *Explosive production*

of new materials: science, technology, business, and innovations : abstr. of 10 intern. symp. ENPM–2010, Bechichi, Montenegro, 7–11 June 2010. – Moscow : Torus press, 2010. – P. 42–43.

12. Structure and properties of multilayer steel stacks produced by explosive welding / A. A. Bataev, I. A. Bataev, M. A. Esikov, V. I. Mali // Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations : abstr. of 10 intern. symp. ENPM–2010, Bechichi, Montenegro, 7–11 June 2010. – Moscow : Torus press, 2010. – P. 3–4.

13. Peculiarities of weld seams and adjacent zones structures formed in the process of explosive welding of sheet steel plates / I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. I. Mali, M.A. Esikov // Explosion, shock wave and high-energy reaction phenomena 2010 (3 ESHP symp.) : abstr. of intern. symp., Seoul, Korea, 1–3 Sept. – Seoul, 2010. – P. 31.

14. Transformation of structure in carbon steel specimen under loading by mach stem, formed in preliminary compressed high explosive charge TG-40 / I. A. Bataev, A. A. Bataev, I. A. Balagansky, K. Hokamoto // Explosion, shock wave and high-energy reaction phenomena 2010 (3 ESHP symp.) : abstr. of intern. symp., Seoul, Korea, 1–3 Sept. – Seoul, 2010. – P. 30.

15. Сварка взрывом тонколистовых заготовок из разнородных сталей [Текст] / И. А. Батаев, М. А. Есиков, В. И. Мали, Д. В. Павлюкова // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 8 всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 24 марта 2010 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – С. 159–162.

16. Увеличение ударной вязкости слоистых композитов, полученных методом сварки взрывом стальных пластин [Электронный ресурс] / И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. И. Мали, М. А. Есиков // Забабахинские научные чтения = Zababakhin scientific talks : 10 междунар. конф., Снежинск, 15–19 марта 2010 г. – Режим доступа: <http://www.vniitf.ru/images/zst/2010/sec4/4-38.pdf>. – Загл. с экрана.

17. Пат. 2361030 Российская Федерация, МПК, E01B 11/44, B23K 11/04. Способ сварного соединения крестовины из марганцовистой стали с рельсом из углеродистой стали / А. А. Батаев, В. А. Батаев, В. Г. Буров, А. А. Никулина, Е. Е. Захаревич, И. А. Батаев и др; патентообладатель Новосибирский государственный технический университет.- № 2007142082/11; заявлен 13.11.2007 г; опубликован 10.07.2009, Бюл. № 19.- 6 с.

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 № 1497 подписано в печать 07.10.10 г.