

На правах рукописи



Приходько Елена Алексеевна

**ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С  
ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ  
МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ УГЛЕРОДИСТЫХ  
И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

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 технических наук  
Тарасов Сергей Юрьевич,  
Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения РАН, с.н.с. лаборатории  
физики упрочнения поверхности

кандидат технических наук, доцент  
Осколкова Татьяна Николаевна,  
Сибирский государственный индустриальный  
университет, заместитель заведующего кафедрой  
обработки металлов давлением и материаловедения

Ведущая организация: Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова

Защита диссертации состоится «29» мая 2012 г. в 13<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 «\_\_» апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Иванцовский В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Разработка современных конкурентоспособных на внешнем и внутреннем рынках конструкций невозможна без использования новых материалов, обладающих повышенным комплексом механических свойств. Один из наиболее эффективных подходов к проблеме повышения комплекса механических свойств материалов конструкционного назначения заключается в формировании анизотропной гетерофазной структуры. Для изготовления деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения во многих случаях целесообразно применение слоистых заготовок на металлической основе, полученных по технологии сварки взрывом. Анализ экспериментальных результатов, полученных в зарубежных и отечественных лабораториях, в том числе в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирском государственном техническом университете, Волгоградском государственном техническом университете, свидетельствует о том, что высокий комплекс механических свойств может быть обеспечен при получении многослойных материалов, состоящих из различных по химическому составу и структуре сталей. Различные сочетания заготовок позволяют сформировать материалы, предназначенные для эксплуатации в условиях статического, динамического и усталостного нагружения.

Широкий выбор исходных заготовок в сочетании с различными видами последующей термической обработки обеспечивает возможность для эффективного управления комплексом важнейших механических свойств многослойных материалов. Несмотря на широкие перспективы материалов, полученных на базе разнородных сталей и других сплавов, изучены они крайне ограниченно. По этой причине целесообразно проведение дополнительных исследований с применением широкого спектра методов, направленных на изучение структуры и комплекса механических свойств композитов. Особого внимания заслуживают исследования, ориентированные на изучение тонких структурных преобразований в околошовных зонах динамически взаимодействующих заготовок. Важное практическое значение имеют данные о влиянии этих преобразований на характер пластической деформации и разрушения многослойных пакетов. В представленной работе с использованием современных аналитических методов проведен анализ отмеченных особенностей. В качестве заготовок для получения многослойных материалов были использованы широко распространенные в современном машиностроении стали 20, 5ХВ2С и 12Х18Н10Т.

Исследования по диссертационной работе выполнены в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы («Проведение научных исследований целевыми аспирантами...»), ГК № 14.740.11.1228).

**Цель** диссертационной работы заключалась в повышении конструктивной прочности слоистых материалов из разнородных сталей путем формирования эффективной структуры с множеством межслойных границ раздела при

реализации процесса сварки взрывом тонколистовых заготовок и последующей термической обработки сварных пакетов.

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

1. Изучение процессов структурных изменений, происходящих в поверхностных слоях динамически взаимодействующих заготовок из разнородных сталей.

2. Анализ структурных преобразований в зоне сварки стальных пластин, обусловленных термической обработкой многослойных материалов.

3. Исследование особенностей разрушения многослойных композиций после сварки взрывом и последующей термической обработки сварных пакетов.

4. Выявление структурных факторов, определяющих скорость развития усталостных трещин в пакетах, полученных методом сварки взрывом.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты исследований особенностей градиентного строения многослойных материалов, полученных по технологии сварки взрывом разнородных сталей.

2. Результаты исследований особенностей строения термически обработанных сварных пакетов, полученных по технологии сварки взрывом.

3. Результаты математического моделирования процессов деформации и нагрева пластин из сталей 20, 5ХВ2С и 12Х18Н10Т при их динамическом взаимодействии.

4. Результаты исследования поведения многослойных материалов, полученных по технологии сварки взрывом разнородных сталей, в условиях статического, динамического и усталостного нагружения.

**Научная новизна**

1. Показано, что характер разрушения многослойных металлических материалов «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т» и «сталь 5ХВ2С – сталь 12Х18Н10Т», полученных по технологии сварки взрывом, в значительной степени определяется наличием множества межслойных границ, оказывающих тормозящее влияние на распространяющиеся трещины. Благоприятное влияние околошовных зон обусловлено субмикроструктурной структурой, образующейся при динамическом взаимодействии стальных пластин, а также структурой, сформированной в процессе термической обработки многослойных пакетов при развитии диффузионных и рекристаллизационных процессов. Пластические свойства высоковязкой в исходном состоянии хромоникелевой стали 12Х18Н10Т, находящейся в пределах многослойного пакета, снижаются. Проявления эффекта торможения усталостной трещины слоями из стали 12Х18Н10Т не зафиксировано.

2. При сварке взрывом разнородных сталей формируется околошовная зона шириной ~ 200 мкм с проходящей внутри нее явно выраженной границей раздела. Переходная граница между материалами проявляется в пределах одного-двух слоев зерен и субзерен. Строение околошовных зон, находящихся по разные стороны от границ раздела, соответствует разным стадиям развития процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения

соединяемых сваркой взрывом сталей, которые в свою очередь определяются их химическим составом.

3. Показано, что амплитуда волн сварных швов, сформированных по технологии сварки взрывом, оказывает неоднозначное влияние на характер разрушения многослойных материалов. С одной стороны рост амплитуды благоприятно отражается на изменении траектории продвижения трещины, что приводит к росту энергоемкости процесса разрушения. С другой стороны, увеличение амплитуды сопровождается уменьшением минимального поперечного сечения пластины вплоть до ее полного разрушения. При реализации процесса динамического взаимодействия разнородных сталей обнаружен не описанный ранее эффект деления волнами большой амплитуды внутренних пластин многослойного пакета на отдельные, не связанные друг с другом фрагменты.

4. В процессе многослойной сварки взрывом сталей 5ХВ2С и 12Х18Н10Т в хромоникелевой стали реализуется механизм локализации пластической деформации, результатом которого является сдвиг вершин гребней инструментальной стали вдоль вектора скорости точки контакта соединяемых пластин. Величина сдвига достигает периода волны сварного шва. Установлено, что участками инициирования полос локализованной пластической деформации являются вихревые зоны, материал которых находился в расплавленном состоянии.

5. При сварке взрывом сталей 20 и 12Х18Н10Т на безвихревых участках волнообразных границ по разные стороны от поверхности соединения заготовок формируется структура различного типа. Для хромоникелевой аустенитной стали характерно образование слоя сильнодеформированных, не претерпевших рекристаллизации зерен с повышенной плотностью дислокаций, построений ячеистого и субзеренного типа. Несмотря на кратковременность теплового воздействия в поверхностном слое стали 20 развиваются рекристаллизационные процессы. Зерна минимального размера (менее 0,5 мкм) располагаются на безвихревых участках сварных швов в слое шириной ~ 10...15 мкм вдоль поверхности сопряжения заготовок.

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

1. Полученные при выполнении работы многослойные материалы обладают повышенным комплексом прочностных свойств и усталостной трещиностойкости. При соединении сваркой взрывом пластин из сталей 20 и 12Х18Н10Т предел прочности композиции достигает 760 МПа, что в 2,4 раза выше по сравнению с исходной сталью 20 и в 1,5 раза выше по сравнению со сталью 12Х18Н10Т. Предел текучести при этом увеличился в 2,1 раза по сравнению с исходной сталью 20 и в 1,1 раза по сравнению со сталью 12Х18Н10Т. Предел прочности многослойной композиции «сталь 12Х18Н10Т – сталь 5ХВ2С» возрос в 1,7 раза по сравнению с отожженной сталью 5ХВ2С и в 2,3 раза по сравнению с исходной сталью 12Х18Н10Т. Предел текучести композита возрос в 2,6 раза по сравнению со сталью 5ХВ2С и в 5,1 раза по сравнению со сталью 12Х18Н10Т. Ударная вязкость многослойных материалов, полученных по технологии сварки взрывом разнородных по химическому

составу сталей, занимает промежуточное значение между показателями ударной вязкости составляющих их материалов.

2. Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технология новых материалов».

3. Материалы, полученные при выполнении работы, отмечены серебряной медалью специализированной международной промышленной выставки «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия - 2011» (ITE Сибирская ярмарка, 2011 г.) и большой золотой медалью выставки «Исследования, инновации и технологии», г. Касабланка (Марокко, 2011 г.).

#### **Достоверность результатов**

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается сочетанием физического и математического моделирования процессов, развивающихся при сварке взрывом, применением современного аналитического оборудования, статистических методов оценки погрешности измерений, использованием взаимодополняющих методов изучения структуры и механических свойств материалов и соответствием полученных результатов современным представлениям о процессах, происходящих при сварке стальных заготовок.

**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 международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, г. Томск, 2011 г.; на международной конференции «XII Харитоновские тематические научные чтения», г. Саров, 2011 г.; шестом международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST)», Китай, г. Харбин, 2011 г.; на Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», Новосибирск, 2010, 2011, 2012 гг.; на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.», г. Новосибирск, 2011 г.; на Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.», г. Новосибирск, 2011 г.

#### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных научных работ, из них: 4 статьи в рецензированных научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в международном журнале, 5 – в сборниках трудов Международных и Всероссийских научно-технических конференций.

#### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, основных результатов и выводов, приложения. Работа изложена на 221 странице основно-

го текста, включая 112 рисунков, 13 таблиц, библиографический список из 217 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первом разделе** «Металлические слоистые композиционные материалы» дана краткая справка о развитии способов повышения механических свойств материалов. Описаны технологические схемы, в основе которых лежит как термопластическое воздействие, так и интенсивная пластическая деформации в холодном состоянии. Отмечено, что один из наиболее эффективных подходов к проблеме повышения механических свойств заключается в формировании в материалах множества границ раздела. Рассмотрены классификации металлических слоистых композиционных материалов, их достоинства и недостатки, а также области применения. Особое внимание уделено изучению способов получения слоистых композитов по технологии сварки взрывом. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** обоснован выбор материалов, используемых в работе, представлены методы изучения их структуры и механических свойств. Основными материалами исследования являлись хромоникелевая сталь 12X18H10T, инструментальная сталь 5XB2C и углеродистая сталь 20.

Сварка взрывом пластин из разнородных сталей осуществлялась в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Толщина пластин составляла 1 мм, общее количество слоев - 13. В качестве взрывчатого вещества использовали аммонит 6ЖВ. Формирование слоистых заготовок осуществлялось по симметричной угловой схеме (рис. 1). Сварка взрывом пластичных сталей (сталь 20, сталь 12X18H10T) осуществлялась за один этап (рис. 1, а). Сварка аустенитной стали 12X18H10T с менее пластичной сталью 5XB2C выполнялась за 2 этапа (рис. 1, б). При реализации двухэтапной сварки с целью снятия внутренних напряжений и улучшения качества получаемых пакетов применялся промежуточный отжиг при 550 °С.

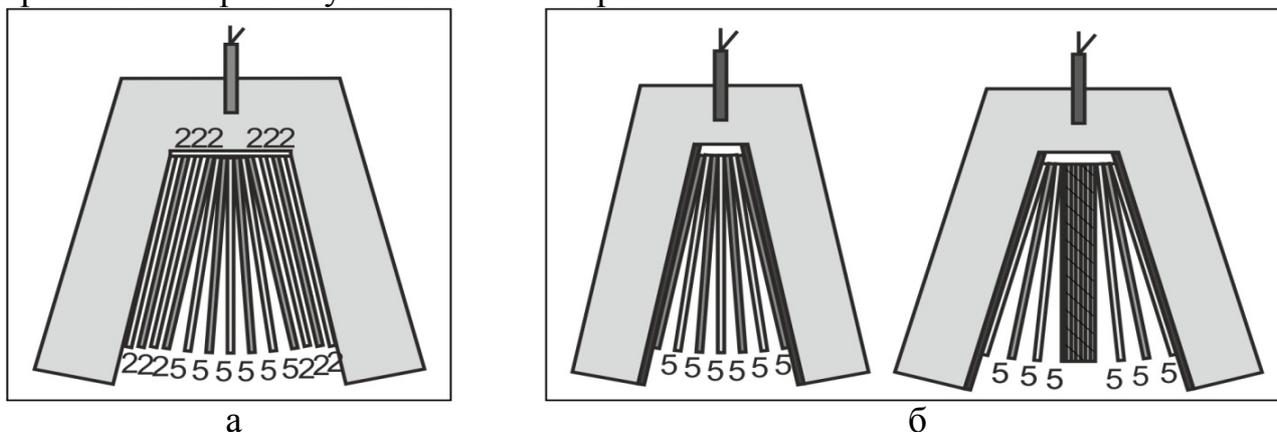


Рис. 1. Схема получения тринадцатислойных композиционных материалов методом сварки взрывом пластин из стали 12X18H10T и стали 20 (а), а также из сталей 12X18H10T и 5XB2C (б). Цифрами показано расстояние между соединяемыми заготовками в мм

Структурные исследования проведены с использованием оптической металлографии (микроскоп *Carl Zeiss AXIO Observer A1*) и растровой электронной микроскопии (микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа). Исследование тонкой структуры выполняли с применением трансмиссионного электронного микроскопа *Tecnai G2 20 TWIN*.

Прочностные свойства материалов определяли на установке *Instron 3369* в соответствии с ГОСТ 1497-84. Испытания на ударную вязкость выполняли по ГОСТ 9454-78 на образцах типа Шарпи. Трещиностойкость исследуемых в работе композитов оценивали по методике, основанной на построении кинетических диаграмм усталостного разрушения плоских образцов.

В **третьем разделе** диссертационной работы «Моделирование процессов сварки взрывом разнородных листовых сталей в системе *AUTODYN 11.0*» представлены результаты математического моделирования. Соединение при сварке взрывом образуется в течение короткого промежутка времени. В связи с этим точные физические измерения температуры, степени и скорости пластической деформации затруднены. С целью детального анализа процессов, происходящих в поверхностных слоях динамически взаимодействующих стальных заготовок, в диссертационной работе было проведено математическое моделирование в системе *AUTODYN 11.0*.

Согласно данным численного моделирования, выполненного по методу конечных элементов с пространственным разрешением 75 ячеек на мм, глубина слоя, подвергнутого температурному и деформационному воздействию, в неподвижных пластинах из углеродистой и инструментальной сталей значительно выше, чем в метаемой пластине из хромоникелевой стали. Максимальная температура, достигаемая в метаемых пластинах из хромоникелевой стали достигает 2600 К. Скорость деформации достигает максимального значения на поверхности соединяемых пластин и составляет  $115 \text{ мкс}^{-1}$ . Ширина области, в которой возможны рекристаллизационные процессы в углеродистой стали не превышает 30 мкм.

**Четвертый раздел** диссертационной работы «Структурные исследования многослойных материалов, сформированных сваркой взрывом пластин из разнородных сталей» посвящен анализу структурных преобразований, происходящих при динамическом взаимодействии стальных заготовок, а также после термической обработки готовых композитов.

Режимы сварки, использованные в работе, обеспечили формирование сварных швов преимущественно волнистой формы (рис. 2). При реализации процесса динамического взаимодействия разнородных сталей обнаружен не описанный ранее эффект деления волнами большой амплитуды внутренних пластин многослойного пакета на отдельные, не связанные друг с другом фрагменты (рис. 2, а). Показано, что в процессе многослойной сварки взрывом сталей 5XB2C и 12X18H10T в хромоникелевой стали реализуется механизм локализации пластической деформации, результатом которого является сдвиг вершин гребней инструментальной стали вдоль вектора скорости точки контакта соединяемых пластин (рис. 3). Величина сдвига достигает периода волны

сварного шва. Установлено, что участками инициирования полос локализованной пластической деформации являются вихревые зоны, материал которых находился в расплавленном состоянии.

Показано, что изменяя технологические режимы сварки взрывом и механические свойства исходных стальных заготовок, возможно влиять на параметры волн сварных швов многослойных композиционных материалов. Высокая пластичность аустенитных сталей в сочетании с особой склонностью их к наклепу обусловили интенсивное деформационное упрочнение слоев из стали 12X18H10T в процессе сварки взрывом (рис. 4). Микротвердость возросла с 2070 МПа до 4850 МПа. Углеродистая и инструментальная сталь упрочняются в меньшей степени (сталь 20 с 1100 МПа до 2120 МПа, сталь 5ХВ2С с 2200 МПа до 2900 МПа).

При сварке взрывом сталей 20 и 12X18H10T на безвихревых участках волнообразных границ по разные стороны от поверхности соединения заготовок формируется структура различного типа.

Структура аустенитной нержавеющей стали однородна на большом расстоянии от поверхности контакта и представляет собой зёрно-субзеренные построения со средним размером отдельных элементов  $\sim 300$  нм (рис. 5, а). Структура такого типа наблюдается в околошовной зоне глубиной  $\sim 50\text{...}70$  мкм. Лишь на расстоянии более 70 мкм в структуре нержавеющей стали зафиксированы крупные слабдеформированные фрагменты, в которых наблюдаются двойники деформации (рис. 5, б). Ширина этой зоны составляет  $\sim 25\text{...}30$  мкм.

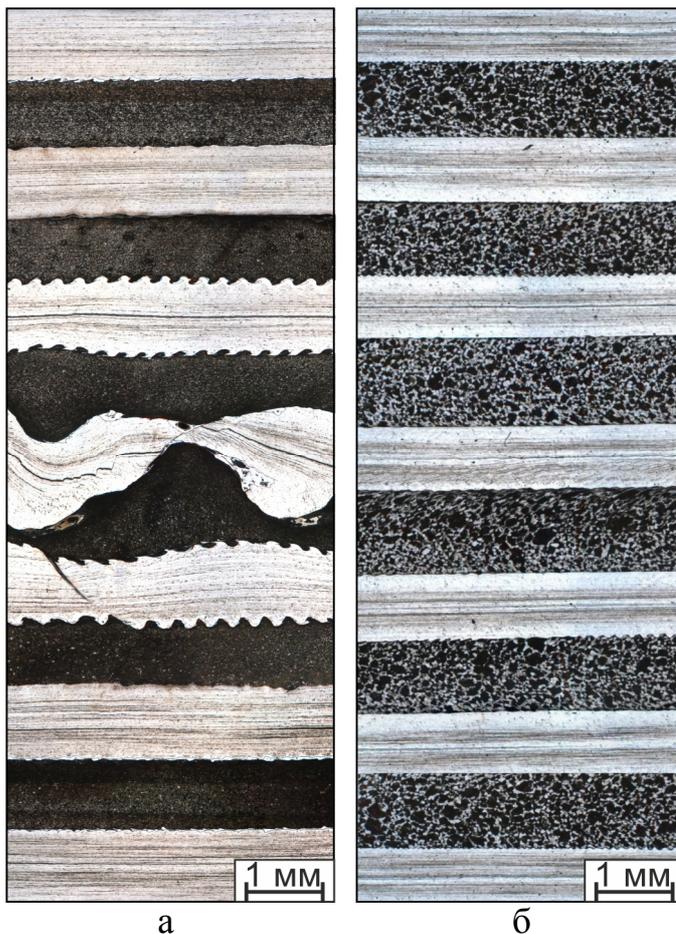


Рис. 2. Строение композита, состоящего из чередующихся слоев: а - стали 12X18H10T и стали 20; б – стали 12X18H10T и стали 5ХВ2С



Рис. 3. Продольное смещение бугров деформации при сварке взрывом сталей 5ХВ2С и 12X18H10T. Стрелкой показана полоса локализованной пластической деформации в хромоникелевой стали

Структура углеродистой стали по мере удаления от границы сварного шва быстро изменяется. Зона, располагающаяся наиболее близко к сварному шву, преимущественно состоит из субзерен размером  $\sim 1...5$  мкм (рис. 5, в).

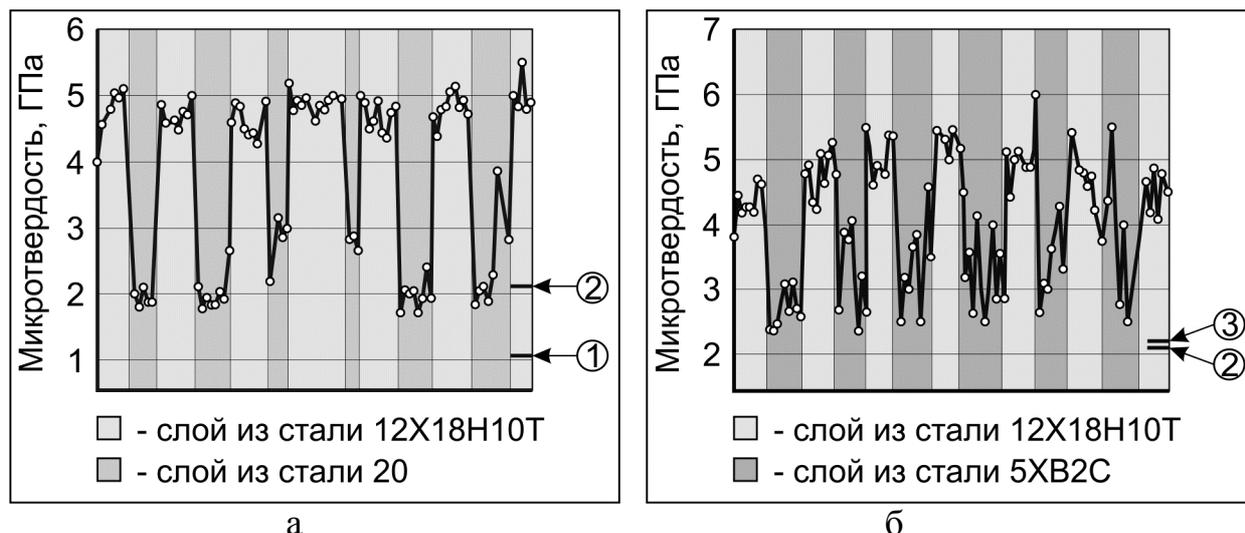


Рис. 4. Микротвердость 13-слойных композиционных материалов, полученных сваркой взрывом чередующихся пластин из сталей 20 и 12X18H10T (а), а также сталей 12X18H10T и 5XB2C (б): 1 - микротвердость стали 20 в отожженном состоянии; 2 - микротвердость стали 12X18H10T в отожженном состоянии; 3 - микротвердость стали 5XB2C в исходном состоянии

Вторая зона, шириной  $\sim 15$  мкм, представляет собой слой более мелких зёрен и субзерен (рис. 5, г). На картинах микродифракции наблюдается множество отдельных рефлексов, образующих окружности, но признаков значительного текстурирования материала также нет. Природа формирования первой и второй зон одинакова и заключается в полигонизации и частичной рекристаллизации сильнодеформированного материала. Разница в размерах отдельных элементов структуры обусловлена различием степени деформации и температуры с изменением расстояния от поверхности контакта стальных пластин.

Третья зона принципиально отличается по структуре от первых двух (рис. 5, д, е). Она характеризуется наличием слаборазориентированных фрагментов, вытянутых параллельно границе сопряжения пластин. Толщина фрагментов составляет  $200...500$  нм, а их длина достигает 5 мкм. Семейства вытянутых субзерен образуют слои шириной  $2...5$  мкм и длиной в несколько десятков микрометров. Промежутки между такими слоями заполнены субзёрнами, ориентированными произвольно. Для четвёртой зоны характерным является наличие как полосовой структуры, так и крупных субзерен с размерами до 5 мкм, отличающихся повышенной плотностью дислокаций.

Как и в ферритной матрице преобразования в структуре перлита зависят от степени деформации стали и температурного воздействия, которое, в значительной степени, определяется расстоянием от границы сопряжения пластин. На достаточно большом расстоянии ( $\sim 120$  мкм) от сварного шва отдельные пластины цементита четко различимы (рис. 6, а). Несмотря на интенсивную и быстропротекающую деформацию, температура в этой зоне была недостаточной для начала диффузионного распада колонии. По мере приближения к границе сварного шва значения температуры и степени деформации материала

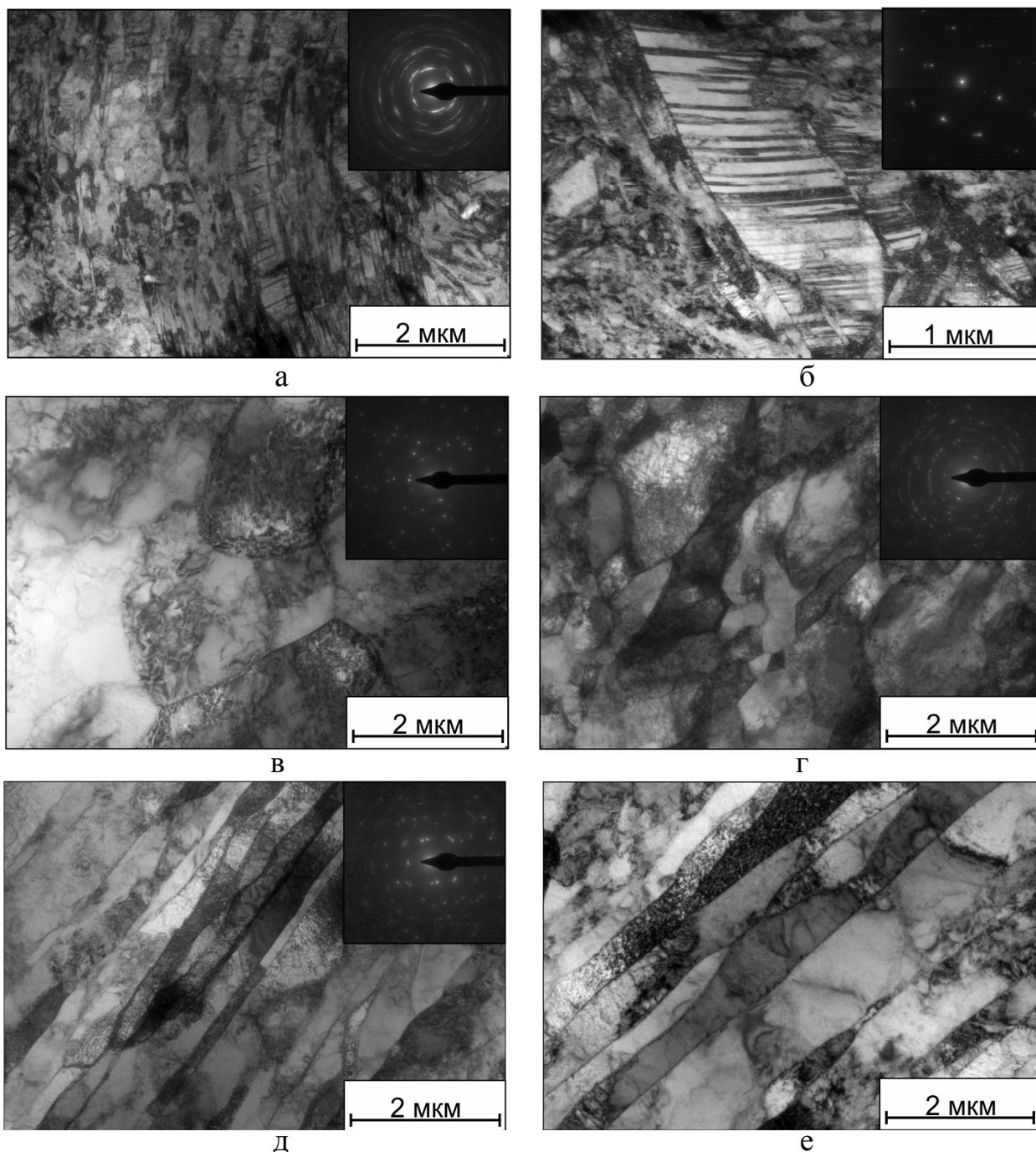


Рис. 5. Структура аустенитной стали: а - на расстоянии более 70 мкм; б - менее 70 мкм от сварного шва. Структура углеродистой стали: в - на расстоянии 15 мкм; г - 40 мкм; д, е - 60 мкм от сварного шва

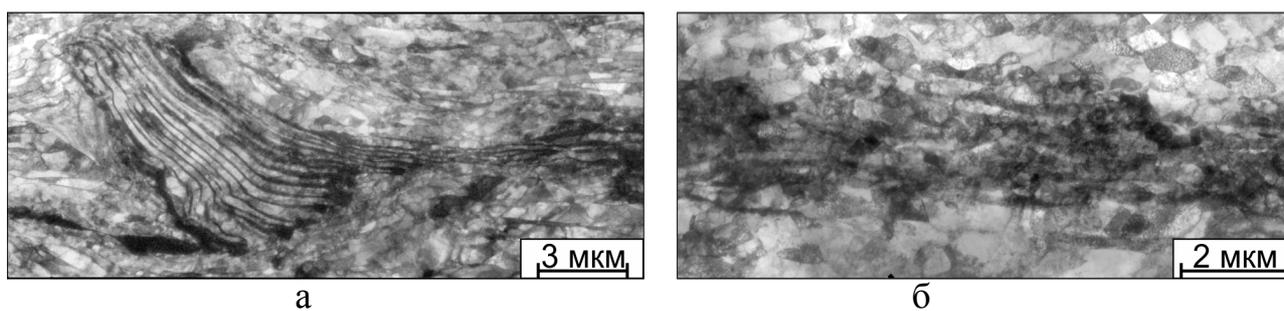


Рис. 6. Строение перлитных колоний на расстоянии 120 (а) и 70 мкм (б) от сварного шва

возрастают. При этом границы отдельных цементитных пластин теряют очертания, что свидетельствует о диффузионном распаде карбидов (рис. 6, б).

Проведенные с целью повышения прочностных свойств закалка и отпуск композита, состоящего из 13 чередующихся пластин сталей 12Х18Н10Т и 5ХВ2С, привели к формированию в структуре композита шести зон с различными свойствами (рис. 7). На первом этапе происходит диффузия атомов углерода из поверхностных слоев инструментальной стали. В приконтактной зоне формируется слой феррита, толщиной от 40 мкм (на гребнях волн) до 100 мкм (во впадинах волн). Твердость обедненного углеродом слоя, зафиксированная методом наноиндентирования, является наименьшей в исследуемом композите и составляет 2 ГПа (рис. 8). Углерод, диффундирующий из инструментальной стали насыщает околошовные зоны слоев из хромоникелевой стали, взаимодействует с хромом и образует карбиды типа  $M_{23}C_6$ , что повышает твердость данной области до ~ 3 ГПа. Максимальная глубина упрочненного карбидами слоя достигает ~ 200 мкм, минимальная составляет ~ 55 мкм.

Вследствие диффузии хрома и никеля из стали 12Х18Н10Т в сталь 5ХВ2С концентрация легирующих элементов в тонком поверхностном слое последней повышается, что приводит к смещению точек начала и конца мартенситного превращения в область более низких температур. По этой причине на границе раздела пластин из разнородных сталей формируется тонкий (~ 3...5 мкм) слой, состоящий из аустенита и хаотично расположенных в нем пакетов мартенсита (рис. 7, 8). Присутствие в анализируемой области повышенного количества остаточного аустенита объясняется незавершенностью мартенситного превращения.

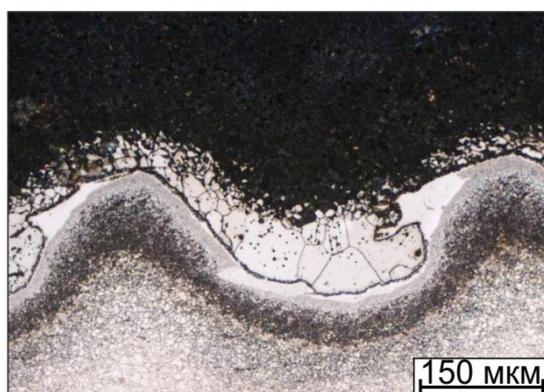


Рис. 7. Структура слоистого композиционного материала «сталь 12Х18Н10Т - сталь 5ХВ2С» после закалки и отпуска

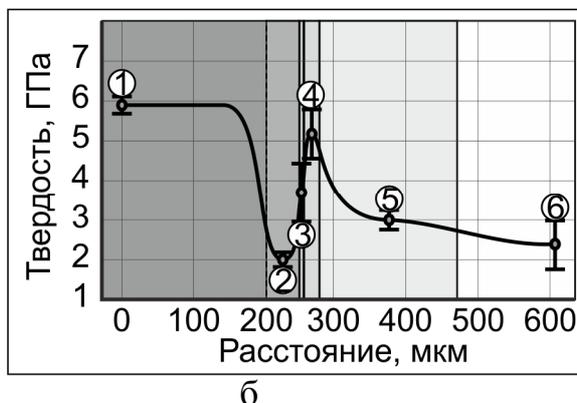
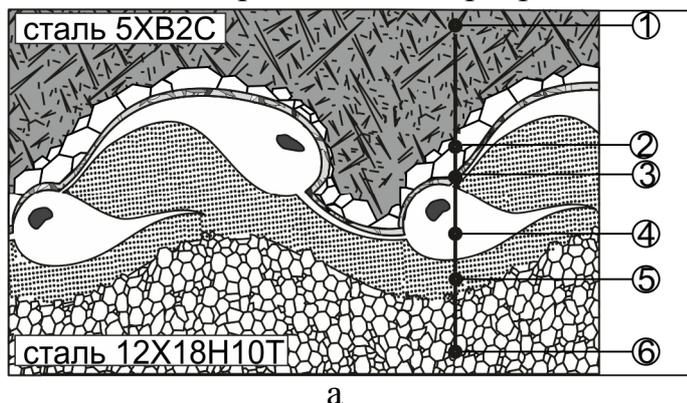


Рис. 8. Схема строения зон, образовавшихся в результате закалки 13-слойных пакетов «сталь 12Х18Н10Т - сталь 5ХВ2С» (а); твердость различных зон закаленных композитов, зафиксированная методом наноиндентирования (б)

**В пятом разделе** «Механические свойства многослойных материалов со структурой, сформированной в процессе сварки взрывом» приведены результа-

ты прочностных испытаний материалов, испытаний на ударную вязкость и усталостную трещиностойкость. Сочетание сталей с различными свойствами позволяет получить материал, обладающий уникальными, отличными от исходных компонентов, свойствами. В результате пластической деформации, развивающейся при высокоскоростном динамическом взаимодействии свариваемых заготовок, происходит увеличение прочностных свойств материалов. В случае соединения сваркой взрывом пластин из стали 20 и стали 12X18H10T предел прочности композита составил 760 МПа, что в 2,4 раза выше по сравнению с исходной сталью 20 и в 1,5 раза выше по сравнению с исходной сталью 12X18H10T (рис. 9). Предел текучести при этом увеличился в 2,1 и 1,1 раза соответственно (рис. 9). При получении сварного соединения «сталь 5ХВ2С - сталь 12X18H10T» предел прочности многослойного материала увеличился в 1,7 раза по сравнению со сталью 5ХВ2С и в 2,3 раза по сравнению со сталью 12X18H10T, предел текучести возрос соответственно в 2,6 и 5,1 раз (рис. 10).

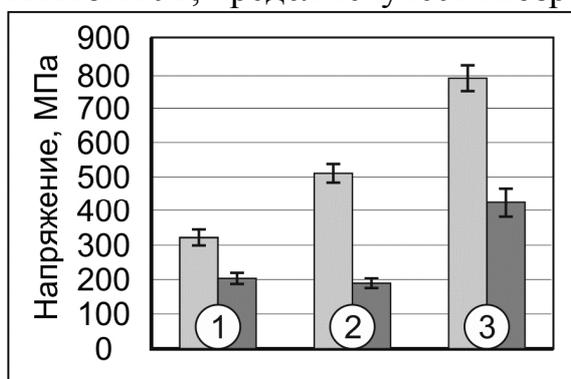


Рис. 9. Прочностные свойства материалов при испытаниях на растяжение: 1 - сталь 20; 2 - сталь 12X18H10T; 3 - композит «сталь 20 - сталь 12X18H10T».

□ - предел прочности;  
■ - условный предел текучести

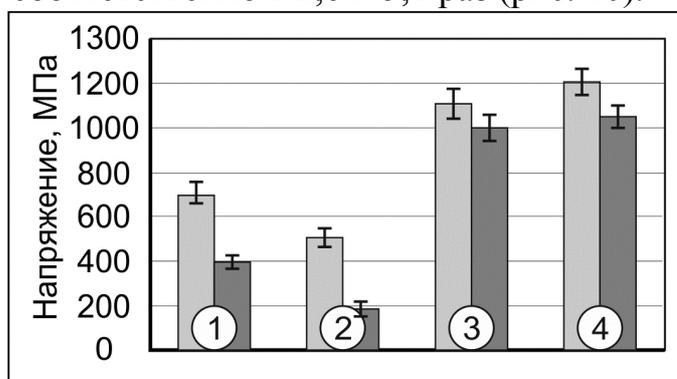


Рис. 10. Прочностные свойства материалов при испытаниях на растяжение: 1 - сталь 5ХВ2С; 2 - сталь 12X18H10T; 3 - композит «сталь 5ХВ2С - сталь 12X18H10T» после сварки; композит «сталь 5ХВ2С - сталь 12X18H10T» после закалки и низкого отпуска.

□ - предел прочности;  
■ - условный предел текучести

Проведенная на заключительном этапе закалка с низким отпуском композита «сталь 5ХВ2С - сталь 12X18H10T» привела к увеличению предела прочности на 4 % по сравнению с незакаленными композиционными образцами. При этом предел текучести возрос на 6 % (рис. 10). Во всех рассматриваемых случаях при использовании технологии сварки взрывом происходило существенное снижение относительного удлинения образцов.

Исследуемые в работе композиционные материалы отличаются повышенным сопротивлением усталостному разрушению. Благодаря наличию в композите сформированных сваркой взрывом границ, обладающих свойствами, отличающимися от свойств основного металла, развивающаяся в нем трещина резко меняет свое направление и начинает ветвиться. Границы раздела сложной формы, возникающие при сварке взрывом тонколистовых заготовок, благоприятно отражаются на уровне усталостной трещиностойкости и ударной вязкости многослойных материалов из разнородных сталей. Пересечение трещиной границ сварных швов сопровождается снижением скорости их развития, что

отражается на кинетических диаграммах усталостного разрушения в виде характерных провалов (рис. 11, 12). Кроме границ раздела положительное влияние на усталостную трещиностойкость оказывают участки рекристаллизованной структуры и образующиеся в процессе термической обработки ферритные участки. Результатом деформационного упрочнения хромоникелевой аустенитной стали является существенное снижение ее пластичности.

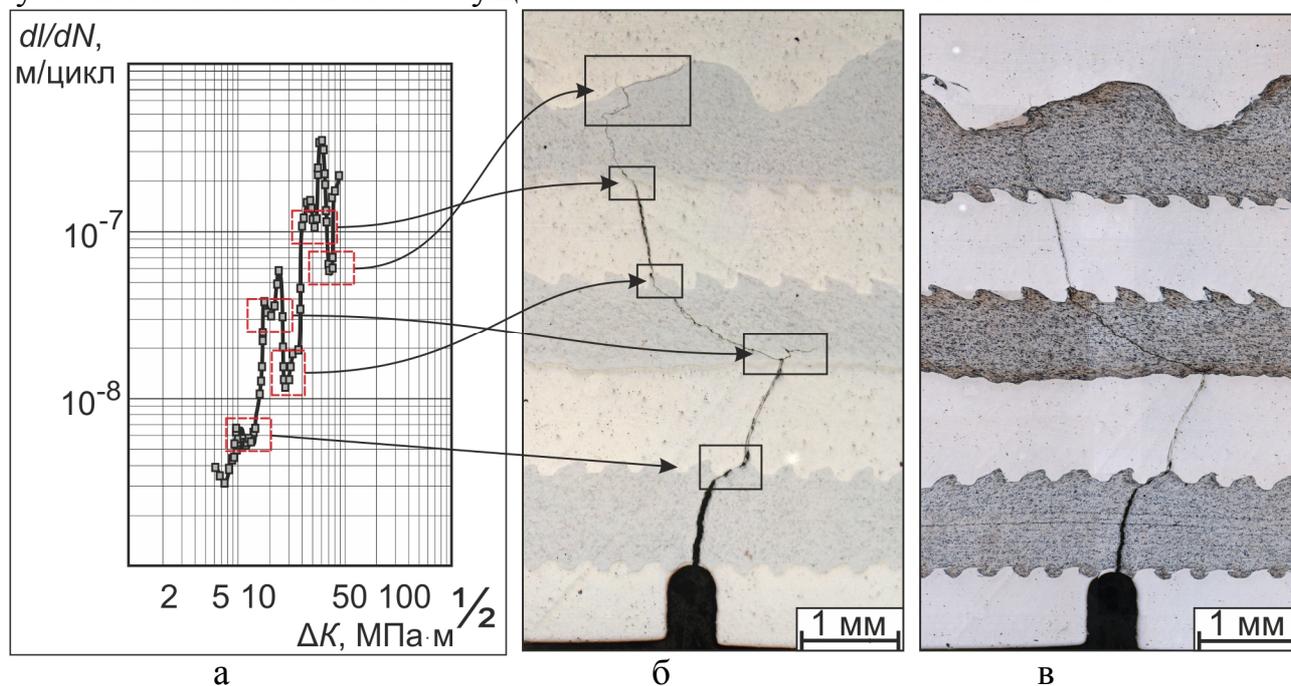


Рис. 11. Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость слоистого композиционного материала, состоящего из тринадцати чередующихся слоев сталей 12X18H10T и 20: а - кинетическая диаграмма усталостного разрушения; б - траектория распространения трещины (нетравленный образец); в - траектория распространения трещины (травленный образец)

Вязкая в исходном состоянии сталь 12X18H10T при усталостных испытаниях разрушается с выкрашиванием микрообъемов вдоль границ распространяющейся трещины. Проявления эффекта торможения усталостной трещины слоями из стали 12X18H10T не зафиксировано.

Количественно оценить изменение уровня трещиностойкости позволяет показатель  $K^*$ , описывающий характер КДУР на ее прямолинейном участке. Для материала, состоящего из чередующихся слоев сталей 20 и 12X18H10T он составляет  $65 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , что в 1,3 раза больше, чем у стали 20 и в 2,2 раза выше, чем у стали 12X18H10T. Значение  $K^*$  для закаленного и низкоотпущенного материала, состоящего из чередующихся слоев сталей 5ХВ2С и 12X18H10T составляет  $67 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , что в 1,5 и в 2,3 раза выше, чем для стали 5ХВ2С и 12X18H10T соответственно.

В шестом разделе «Апробация результатов экспериментальных исследований» на основании полученного опыта сделаны рекомендации по практической реализации сварки взрывом многослойных композиций из разнородных сталей. Выбор схемы сварки следует осуществлять исходя из свойств свариваемых материалов. Наиболее рациональными являются схемы с одним и двумя симметрично расположенными зарядами взрывчатых веществ. Даже при

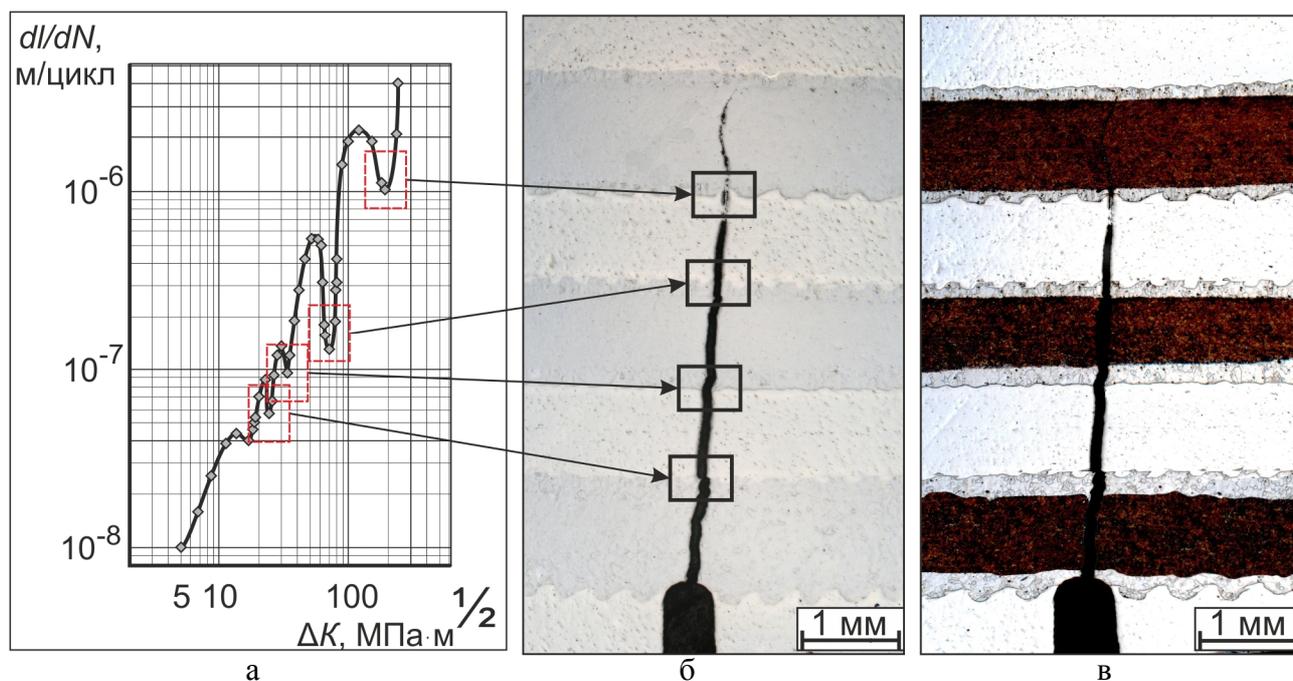


Рис. 12. Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость закаленного слоистого композиционного материала, состоящего из тринадцати чередующихся слоев сталей 12X18H10T и 5XB2C: а - кинетическая диаграмма усталостного разрушения; б - траектория распространения трещины (нетравленный образец); в - траектория распространения трещины (травленный образец)

выборе благоприятных режимов сварки существует вероятность образования полос локализованной пластической деформации, пересекающих слои композиционного материала. Такие полосы приводят к разрушению композиции при ее нагружении в процессе эксплуатации или даже в процессе создания. Для предотвращения образования подобного рода дефектов в металле рекомендуется проводить промежуточные отжиги при температуре, достаточной для снятия внутренних напряжений, но недостаточной для активации диффузионных процессов в слоях композита в случае соединения разнородных металлов. Соединение сваркой взрывом сталей с различными свойствами дает дополнительные преимущества. Например, соединение прочной стали с пластичной позволяет создать слоистый композит, обладающий высокой твердостью и прочностью и одновременно запасом надежности.

Слоистые материалы такого типа могут применяться для изготовления деталей для большегрузного транспорта, деталей горных машин, деталей для нефтеперерабатывающей промышленности, пластин футеровки ударноотражательных дробилок.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, используются в курсах «Материаловедение» и «Порошковая металлургия и композиционные материалы» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» и инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении» в Новосибирском государственном техническом университете.

Результаты работы отмечены большой медалью на выставке «Исследования, инновации и технологии», Касабланка (Марокко) и малой золотой меда-

лю в составе экспозиции Новосибирского государственного технического университета на специализированной промышленной выставке «Металлы Сибири: Metallургия. Машиностроение. Metalлообработка. Сварка - 2011».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Комбинирование различных по химическому составу и механическим свойствам сталей является рациональным подходом к проблеме разработки новых многослойных материалов. Соединяя методом сварки взрывом стали различного типа, можно эффективно управлять показателями прочности, надежности и долговечности металлических материалов и формировать композиции, предназначенные для эксплуатации в различных условиях внешнего нагружения.

2. Процессы, протекающие в зоне, прилегающей к точке соударения двух соединяемых взрывом стальных пластин, были численно исследованы при помощи программного комплекса *ANSYS AUTODYN 11.0*. Глубина слоя, подвергнутого температурному и деформационному воздействию, в неподвижных пластинах из низкоуглеродистой и инструментальной сталей значительно выше, чем в метаемой пластине из аустенитной хромоникелевой стали. Максимальная температура достигает  $2600\text{ K}$ , скорость деформации достигает максимального значения на поверхности соединяемых пластин и достигает  $115\text{ мкс}^{-1}$ . Ширина области, в которой возможны рекристаллизационные процессы в углеродистой стали не превышает  $30\text{ мкм}$ .

3. Высокий исходный уровень пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости стали не гарантирует проявление этих качеств в сваренных взрывом многослойных композициях. В результате динамического взаимодействия пластин из сталей 20 и 12X18H10T микротвердость углеродистой стали возрастает на 93 % (с 1100 МПа до 2120 МПа), а хромоникелевой стали на 135 % (с 2120 до 5000 МПа). При формировании композиции «сталь 5XB2C – сталь 12X18H10T» микротвердость инструментальной стали возрастает на 32 % (с 2200 МПа до 2900 МПа). Интенсивность упрочнения хромоникелевой стали в обоих случаях одинакова. Результатом деформационного упрочнения хромоникелевой аустенитной стали является существенное снижение ею релаксационных свойств. Вязкая в исходном состоянии сталь 12X18H10T, находясь в сварных многослойных пакетах, при усталостных испытаниях разрушается с выкрашиванием микрообъемов вдоль берегов распространяющейся трещины. Проявления эффекта торможения усталостной трещины слоями из стали 12X18H10T не зафиксировано.

4. При соединении сваркой взрывом пластин из сталей 20 и 12X18H10T предел прочности композиции достигает 760 МПа, что в 2,4 раза выше по сравнению с исходной сталью 20 и в 1,5 раза выше по сравнению со сталью 12X18H10T. Предел текучести при этом увеличился в 2,1 и 1,1 раза соответственно. Предел прочности многослойной композиции «сталь 12X18H10T – сталь 5XB2C» возрос в 1,7 раза по сравнению с отожженной сталью 5XB2C и в 2,3 раза по сравнению с исходной сталью 12X18H10T. Предел текучести

композита возрос в 2,6 раза по сравнению со сталью 5ХВ2С и в 5,1 раза по сравнению со сталью 12Х18Н10Т. Увеличение прочностных свойств сталей в многослойных композициях обусловлено процессами деформационного упрочнения, измельчением зеренных и субзеренных построений в зонах сварных швов, возрастанием плотности дислокаций, образованием двойников деформационного происхождения, формированием локальных зон с закаленной структурой.

5. Границы раздела сложной формы, возникающие при сварке взрывом тонколистовых заготовок, благоприятно отражаются на уровне усталостной трещиностойкости и ударной вязкости многослойных материалов из разнородных сталей. Пересечение трещиной границ сварных швов сопровождается снижением скорости их развития, что отражается на кинетических диаграммах усталостного разрушения в виде характерных провалов. Кроме границ раздела положительное влияние на усталостную трещиностойкость оказывают участки рекристаллизованной структуры и образующиеся в процессе термической обработки ферритные участки.

6. При сварке взрывом сталей 20 и 12Х18Н10Т по разные стороны от поверхности соединения заготовок формируется структура различного типа. Переходная граница между материалами проявляется в пределах одного-двух слоев зерен и субзерен. Строение околошовных зон в этих сталях соответствует разным стадиям развития деформационного упрочнения и термического разупрочнения. Для хромоникелевой аустенитной стали характерно образование слоя сильнодеформированных, не претерпевших рекристаллизации зерен. Температурно-временные условия процесса деформации обеспечивают сохранение в этих зернах повышенной плотности дислокаций, формирование границ ячеистого и субзеренного типа. Несмотря на кратковременность теплового воздействия в поверхностном слое стали 20 развиваются рекристаллизационные процессы. Наибольший размер рекристаллизованных ферритных зерен (3 мкм) наблюдается вблизи вихревых построений, что обусловлено максимальной температурой нагрева материала. Зерна минимального размера (менее 0,5 мкм) располагаются на безвихревых участках сварных швов в слое шириной ~ 10...15 мкм вдоль поверхности сопряжения заготовок.

7. В процессе термической обработки многослойных материалов, полученных по технологии сварки взрывом заготовок из разнородных сталей, формируется явно выраженная градиентная структура, характеризующаяся наличием нескольких прослоек с различным строением. Ускоренному их формированию способствует неравновесное строение околошовных зон шириной ~ 100 мкм, обусловленное интенсивной пластической деформацией динамически взаимодействующих заготовок. Ширина формируемых в результате диффузии прослоек различна вдоль профиля волны сварного шва, что обусловлено различной степенью пластической деформации. Фактором, характерным для процесса сварки взрывом и способствующим интенсификации диффузии в пределах пластически деформированной околошовной зоны, является увеличение поверхности сопряжения пластин за счет формирования швов волнообразной формы. Повышение амплитуды волн сварных швов представляет собой

один из путей ускорения диффузионных процессов при дополнительном нагреве слоистых композитов из разнородных материалов.

8. Амплитуда волн сварных швов, сформированных по технологии сварки взрывом, оказывает неоднозначное влияние на характер разрушения многослойных материалов. С одной стороны рост амплитуды благоприятно отражается на изменении траектории продвижения трещины, что приводит к росту энергоемкости процесса разрушения. С другой стороны, увеличение амплитуды волн сопровождается уменьшением минимального поперечного сечения пластины вплоть до ее полного разрушения. При реализации процесса динамического взаимодействия разнородных сталей обнаружен не описанный ранее эффект деления волнами большой амплитуды внутренних пластин многослойного пакета на отдельные, не связанные друг с другом фрагменты.

9. В процессе многослойной сварки взрывом сталей 5ХВ2С и 12Х18Н10Т в аустенитной стали проявляется механизм локализации пластической деформации, результатом которого является сдвиг вершин гребней инструментальной стали вдоль вектора скорости точки контакта соединяемых пластин. Величина сдвига достигает периода волны сварного шва. Участками инициирования полос локализованной пластической деформации являются вихревые зоны, материал которых находился в расплавленном состоянии.

10. Результаты проведенных исследований используются в курсах «Материаловедение» и «Порошковая металлургия и композиционные материалы» при реализации учебного процесса по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» в Новосибирском государственном техническом университете. Материалы, полученные при выполнении диссертационной работы, отмечены серебряной медалью специализированной международной промышленной выставки «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия - 2011» (ITE Сибирская ярмарка, 2011 г.) и большой золотой медалью выставки «Исследования, инновации и технологии», г. Касабланка (Марокко, 2011 г.).

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

1. Локализация пластического течения в низкоуглеродистой стали, деформированной взрывом / И. А. Батаев, А. А. Батаев, И. А. Балаганский, В. Г. Буров, Е. А. Приходько, Н. А. Морева, А. А. Руктуев // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 1. С. 93–99.

2. Геометрические преобразования тонколистовых заготовок в процессе сварки взрывом многослойных пакетов / В. И. Мали, И. А. Батаев, А. А. Батаев, Д. В. Павлюкова, Е. А. Приходько, М.А. Есиков // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 6. С. 117–124.

3. Особенности образования и строения вихревых зон, формируемых при сварке взрывом углеродистых сталей / И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. И. Мали, В. Г. Буров, Е. А. Приходько // Физика металлов и металловедение. 2012. Т. 113. № 3. С. 1–8.

4. Приходько Е. А., Алхимов А. П. Влияние закалки и отпуска на структуру и механические свойства слоистого композита «сталь 12Х18Н10Т – сталь

5XB2C», полученного методом сварки взрывом // Обработка металлов. 2012. № 1 (54). С. 96-99.

5. *Structure and fatigue crack resistance of multilayer materials produced by explosive welding* / I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. I. Mali, V. Burov, E. Golovin, A. Smirnov, E. A. Prikhodko // *Advanced Materials Research*. 2011. Vols. 287–290. P. 108–111 [Структура и усталостная трещиностойкость многослойных материалов, полученных сваркой взрывом].

6. *Formation and structure of vortex zones in explosive welding of carbon steel* [*Electronic resource*] / I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. I. Mali, E. A. Prikhodko, M. A. Esikov // *6 International forum on strategic technology (IFOST 2011), China, Harbin, 22–24 Aug. 2011 : [proceedings]*. [S. 1.], 2011. Vol.1. P. 1–5. Mode of access: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=6020951&abstractAccess=no&userType=inst.Title from screen](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6020951&abstractAccess=no&userType=inst.Title%20from%20screen) [Формирование и структура вихревых зон при сварке взрывом углеродистой стали].

7. Изменение дислокационной структуры под поверхностью трещины при циклическом нагружении технического железа / Т. А. Петренко, А. А. Пименов, Е. А. Приходько, А. И. Смирнов, Н. В. Шелудько // Проблемы эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 8 всерос. науч.-практической конференции, Новосибирск, 24 марта 2010 г. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. С. 191–193.

8. Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок / А. А. Батаев, И. А. Батаев, В. И. Мали, А. Б. Карпов, М. А. Есиков, Н. А. Морева, Е. А. Приходько // XIII Харитоновские тематические научные чтения., 19–23 апреля 2011 г. : доклад. Саров : РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011. С. 320–323.

9. Ударная вязкость стальных слоистых композиционных материалов, полученных методом сварки взрывом / И. А. Батаев, А. С. Гонтаренко, В. С. Ложкин, В. И. Мали, Е. А. Приходько // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 9 всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 16 марта 2011 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – С. 183–185.

10. Ложкин В. С., Маковкина М. С., Приходько Е. А. Структура и свойства слоистых композиционных материалов, полученных сваркой взрывом высокопрочных и пластичных стальных пластин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10-й всерос. науч.-практической конференции, Новосибирск, 28 марта 2012 г. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. С. 187-190.

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 № XXX подписано в печать 26.04.2012 г.