

На правах рукописи



Ложкин Василий Сергеевич

**СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ
ТОНКОЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН ИЗ МАРТЕНСИТО-СТАРЕЮЩЕЙ,
ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ АУСТЕНИТНОЙ И НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ
СТАЛЕЙ**

Специальность 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

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: Околович Геннадий Андреевич,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Алтайский
государственный технический университет
им. И. И. Ползунова», профессор кафедры маши-
ностроительных технологий и оборудования

Мельников Александр Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, заведующий
кафедрой материаловедения и технологии
металлов

Ведущая организация: Государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Сибирский
государственный индустриальный университет»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2014 г. в 16³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского государственного технического университета http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov

Автореферат разослан «11» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тюрин Андрей Геннадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Один из наиболее эффективных подходов к решению проблемы повышения комплекса механических свойств металлических материалов конструкционного назначения заключается в формировании в них структуры слоистого типа. Технологическим процессом, позволяющим качественно соединять как однородные, так и разнородные материалы, является сварка взрывом. Результаты исследования материалов, полученных по технологии сварки взрывом, отражены во множестве публикаций. Важный вывод, который может быть сделан при анализе этих работ, заключается в том, что комплекс механических свойств многослойных металлических материалов определяется не только свойствами исходных материалов. Большое влияние на поведение материалов в условиях статического, динамического и усталостного нагружения оказывают границы раздела между слоями. При реализации процессов сварки взрывом роль этого фактора также высока, поскольку границы раздела формируются в условиях интенсивной пластической деформации, сопровождающейся процессами высокоскоростного нагрева и охлаждения материала.

Анализ работ, выполненных ранее, свидетельствует о том, что комплекс механических свойств материалов может быть существенно повышен за счет сочетания в одном пакете заготовок из материалов, характеризующихся различным уровнем показателей прочности и пластичности. Высокопрочные слои, входящие в композит, определяют металлоемкость изделия. Роль слоев, обладающих повышенным уровнем пластичности и вязкости, заключается в формировании энергоемкого механизма разрушения материала и обеспечении высоких показателей надежности. В данной работе в качестве высокопрочной составляющей слоистых композитов предложено использовать заготовки из мартенситно-старящей стали Н18К9М5Т, представляющей уникальный конструкционный материал и нашедшей широкое применение при изготовлении деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения. В качестве второй составляющей используется обычная углеродистая сталь 20 или хромоникелевая аустенитная сталь типа 12Х18Н10Т. Обе стали, широко применяемые в промышленном производстве, обладают высокими показателями пластичности и ударной вязкости.

В технической литературе проблемы создания слоистых металлических материалов по технологии сварки взрывом заготовок из разнородных сталей, особенности влияния последующей термической обработки на их структуру и свойства отражены в недостаточной степени. Практически не изучены многослойные композиты, функцию основного компонента в которых выполняют тонкослойные пластины из мартенситно-старящих сталей. Решению этих актуальных научных проблем, имеющих важное научное и прикладное значение, посвящена представленная диссертационная работа.

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете в соответствии с грантом РФФИ в рамках конкурса инициативных научных проектов, выполняемых молодыми учеными; грантом фонда содействию развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по

программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМ-НИК»); программой стратегического развития Новосибирского государственного технического университета (конкурс проектов среди молодых ученых); государственным заданием № 2014/138 Министерства образования и науки РФ (проект № 257).

Степень разработанности темы исследования

Работы по проблемам сварки взрывом выполняются в ряде стран, в том числе и в нашей стране. В России основоположником исследований, направленных на развитие технологии сварки взрывом являлся академик М. А. Лаврентьев. В последние десятилетия эти исследования развиваются в Институте гидродинамики СО РАН (г. Новосибирск), Волгоградском государственном техническом университете, Институте физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург), ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов» «Прометей» (г. Санкт-Петербург), Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (г. Москва) и ряде других отечественных научных организаций. За более чем 60-летний срок накопилось большое количество информации, отражающей особенности сварки взрывом в применении к различным материалам и технологическим схемам реализации процесса. Наиболее ценная информация, позволяющая обоснованно объяснить комплекс свойств материалов, формируемых при сварке взрывом, может быть получена главным образом с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии. В последние годы эти исследования проводятся в отечественных и зарубежных лабораториях, оснащенных современными аналитическими приборами. Проблемы, связанные с получением и исследованием многослойных материалов, в литературе отражены в меньшей степени. В Новосибирском государственном техническом университете выполнен ряд работ, ориентированных на получение такого рода композиций из сталей различного типа, титана и его сплавов, меди, тантала. В этих работах на глубоком уровне проведен анализ структурных преобразований, происходящих в тонких поверхностных слоях металлических заготовок при их динамическом взаимодействии. Работы, связанные с формированием многослойных разнородных материалов с использованием в качестве одного из компонентов пластин мартенситно-стареющих сталей в литературе не представлены.

Цель диссертационной работы заключается в повышении комплекса механических свойств металлических материалов путем создания сваркой взрывом многослойных пакетов, состоящих из пластин мартенситно-стареющей, хромоникелевой аустенитной и углеродистой сталей.

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

1 Изучение методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии процессов структурных преобразований, происходящих в поверхностных слоях пластин из разнородных сталей при их динамическом взаимодействии. Совместный анализ результатов структурных исследований и моделирования процессов сварки разнородных материалов.

2 Исследование структуры и свойств многослойных материалов типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» после их термической обработки.

3 Исследование особенностей разрушения сваренных взрывом и термически обработанных многослойных материалов в условиях статического, динамического и циклического нагружения.

4 Анализ структурных факторов, определяющих характер усталостного разрушения композитов, полученных методом сварки взрывом тонколистовых стальных заготовок.

Научная новизна

1 Экспериментально установлено, что характер упрочнения хромоникелевой и мартенситно-стареющей сталей в многослойном композите «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» после сварки взрывом и термической обработки резко различается. Результаты измерения микротвердости в центральных зонах пластин свидетельствуют о том, что сталь 12Х18Н10Т существенно упрочняется при сварке взрывом (с 1900 до 4540 МПа), а в процессе последующей выдержки при 490 °С ее микротвердость практически не изменяется. Сталь Н18К9М5Т, наоборот, не склонна к упрочнению при сварке и существенно упрочняется при последующей термической обработке (с 4000 до 7500 МПа).

2 Методами просвечивающей электронной микроскопии выявлены особенности структурных преобразований в зоне интенсивной пластической деформации сталей 20 и Н18К9М5Т шириной 30...60 мкм, в пределах которой структура формируется в условиях развития конкурирующих процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения. Показано, что в стали 20 доминируют эффекты термического разупрочнения, что выражается в развитии процессов полигонизации и рекристаллизации феррита. Мартенситно-стареющая сталь в меньшей степени подвержена влиянию температурных эффектов.

3 Сварка взрывом многослойных пакетов по угловой схеме расположения стальных заготовок сопровождается проявлением эффекта локализации пластического течения в центральных слоях, испытывающих одновременное воздействие двух движущихся навстречу друг другу комплектов предварительно соединенных пластин. При сварке взрывом тринадцатислойных композитов типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» в качестве центральных слоев целесообразно использовать пластины из мартенситно-стареющей стали. Несмотря на формирование в центральных пластинах сварных пакетов полос сдвига, образования микро- и макротрещин в них не зафиксировано, что обусловлено высоким ресурсом пластичности стали Н18К9М5Т, находящейся в предварительно закаленном состоянии.

4 Установлено, что сочетание в слоистых композитах «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» разнородных сталей, обладающих различным уровнем прочностных свойств и пластичности, способствует формированию развитых рельефов изломов при динамическом и усталостном разрушении.

Теоретическая и практическая значимость работы

1 Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при обосновании и разработке новых решений проблемы повышения конструктивной прочности металлических материалов, в том числе с использованием мартенситно-старееющих сталей других типов.

2 Предложена технология получения многослойных композитов с высоким комплексом прочностных свойств и трещиностойкости, сочетающая сварку взрывом пластин из предварительно закаленной мартенситно-старееющей стали Н18К9М5 и хромоникелевой аустенитной стали 12Х18Н10Т с последующей термической обработкой многослойных пакетов при 490 °С.

3 Многослойные композиционные материалы, полученные методом сварки взрывом чередующихся пластин из высокопрочной и пластичных сталей обладают повышенным комплексом механических свойств и могут быть рекомендованы для изготовления деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения. Значения предела прочности тринадцатислойных композиций «сталь Н18К9М5Т - сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т - сталь 12Х18Н10Т» на 28 % и 21 % выше расчетных значений. При этом уровень ударной вязкости слоистых материалов соответствует ударной вязкости пластичных составляющих (сталей 20 и 12Х18Н10Т), входящих в композиты. Присутствие в композитах множества сварных швов является фактором, способствующим росту трещиностойкости материалов.

4 Новизна полученных результатов диссертационной работы, подтверждена патентом *RU 2470755C2* «Способ получения сварного соединения разнородных металлических материалов».

5 Результаты диссертационной работы приняты к использованию в ООО «КЭПС». Слоистые листовые композиты типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» предполагается использовать в качестве материалов для производства защитных корпусов электронных устройств.

6 Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на механико-технологическом факультете Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» (в лекционных курсах, а так же при выполнении лабораторных работ).

Личный вклад автора заключается постановке задач исследования, в выполнении практических испытаний, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту.

Методология и методы исследования

Исследования композитов, сформированных по технологии сварки взрывом, осуществлялись поэтапно, согласно поставленным задачам. Из мартенситно-старееющей, хромоникелевой аустенитной и конструкционной сталей были подготовлены пластины размером 110 x 60 x 1 мм. Предварительная термическая обработка позволила сформировать однородную равновесную структуру и повысить пластичность исходных материалов. В качестве метода соединения

заготовок была выбрана сварка взрывом по угловой схеме. Процесс сварки осуществляли во взрывной камере в Институте гидродинамики имени Лаврентьева СО РАН.

Сваренные взрывом тринадцатид- и двухслойные композиты типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» изучались методами оптической микроскопии (микроскопы *Carl Zeiss AXIO Observer A1* и *Carl Zeiss AXIO Observer Z1m*), растровой электронной (микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа) и просвечивающей электронной микроскопии (*Tecnai G2 20 TWIN*). Образцами для проведения исследований являлись изломы, шлифы, фольги, подготовленные с использованием прессы *Buehler Simpli Met 1000*, шлифовально-полировальной установки *Buehler Auto Met 300* и другого оборудования, позволяющего сохранить структуру анализируемых материалов. Операция резки образцов из сваренных взрывом многослойных пакетов выполнялась на проволочно-вырезном электроэрозионном станке *Sodic AG 400L*.

Прочностные свойства многослойных материалов в условиях одноосного растяжения определяли на установке *Instron 3369*, усталостную трещиностойкость на универсальной сервогидравлической системе *Instron 8801*, работу разрушения на маятниковом копре *Metrocom*. Для измерения микротвердости использовали прибор *Wolpert Group 402 MVD*.

Положения, выносимые на защиту

1 Результаты структурных исследований особенностей строения многослойных материалов, полученных по технологии сварки взрывом мартенситно-старееющей, хромоникелевой аустенитной и низкоуглеродистой стали.

2 Результаты изучения особенностей изменения структуры и свойств композитов «сталь 20 - сталь Н18К9М5Т» и «сталь 12Х18Н10Т - сталь Н18К9М5Т» в процессе их термической обработки.

3 Результаты анализа процессов разрушения многослойных материалов при реализации различных схем нагружения. Результаты исследования процессов локализации пластического течения в разнородных сталях, проявляющихся в процессе сварки взрывом.

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

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается сочетанием математического моделирования процессов, развивающихся при сварке взрывом, с 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.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2011 - 2013); на Всероссийской научно-технической конфе-

ренции «Наука. Промышленность. Оборона» (г. Новосибирск, 2012, 2013); на 9-й, 10-й и 11-й всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (г. Новосибирск, 2011 - 2013), «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2014); на восьмом международном форуме по стратегическим технологиям (*IFOST*) (Монголия, г. Улан-Батор, 2013); на XI международной конференции «Забабахинские научные чтения» (г. Снежинск, 2012).

По результатам исследований опубликовано 18 работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ, 1 статья в зарубежном издании, 13 - в сборниках научных трудов и трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, основных результатов, заключения, приложения. Работа изложена на 194 страницах основного текста, включая 82 рисунка, 13 таблиц, библиографический список из 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, научная и практическая значимость диссертационной работы, а так же описаны основные направления проведенных исследований.

В первом разделе «Многослойные материалы. Методы получения, особенности строения и механические свойства» представлен обзор отечественных и зарубежных исследований по проблеме получения слоистых материалов, в том числе с использованием заготовок из мартенситно-старееющих сталей. Рассмотрены различные технологии производства металлических композиционных материалов, проанализированы их достоинства и недостатки. Особое внимание уделено вопросам создания слоистых металлических композитов методом сварки взрывом. На основании анализа материала, изложенного в литературном обзоре, сформулированы выводы, послужившие основой для постановки задач диссертационной работы.

Во втором разделе «Материалы и методы исследования» описаны исходные материалы, а также методы их предварительной подготовки к сварке взрывом. В качестве исходных материалов для получения многослойных композитов были выбраны высокопрочная мартенситно-старееющая сталь Н18К9М5Т, хромоникелевая сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т и конструкционная низкоуглеродистая сталь 20.

Технологические эксперименты были проведены по режимам, разработанным ведущим научным сотрудником Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН к.ф.-м.н. В.И. Мали. Исходные заготовки из отмеченных выше сталей представляли собой термически обработанные шлифованные пластины размерами 110 x 60 x 1 мм. Для снятия внутренних напряжений и создания в материалах однородной структуры проводили термическую обработку заготовок. Сталь Н18К9М5Т подвергали нагреву до 820 °С с последующим охлаждением на воздухе. Термическая обработка хромоникелевой стали 12Х18Н10Т заключалась в нагреве заготовок до 1050 °С, выдержке при этой

температуре в течение 20 минут и охлаждении в воде. Заготовки из стали 20 отжигали при 920 °С. Взрывчатым веществом, использованным для сварки стальных пластин, являлся аммонит марки 6ЖВ.

Многослойные материалы получали по технологии сварки взрывом. Максимальное количество чередующихся свариваемых взрывом стальных заготовок составляло 13. Сварка стальных пакетов осуществлялась за один этап по симметричной угловой схеме (рисунок 1 а, б). Двухслойные материалы сваривали с использованием несимметричной угловой схемы (рисунок 1 в). Полученные композиты, состоящие из двух и тринадцати слоев, подвергали термической обработке, заключающейся в выдержке при 490 °С в течение трех часов. Такой режим обеспечивал реализацию процессов старения пластин из мартенситно-старяющей стали.

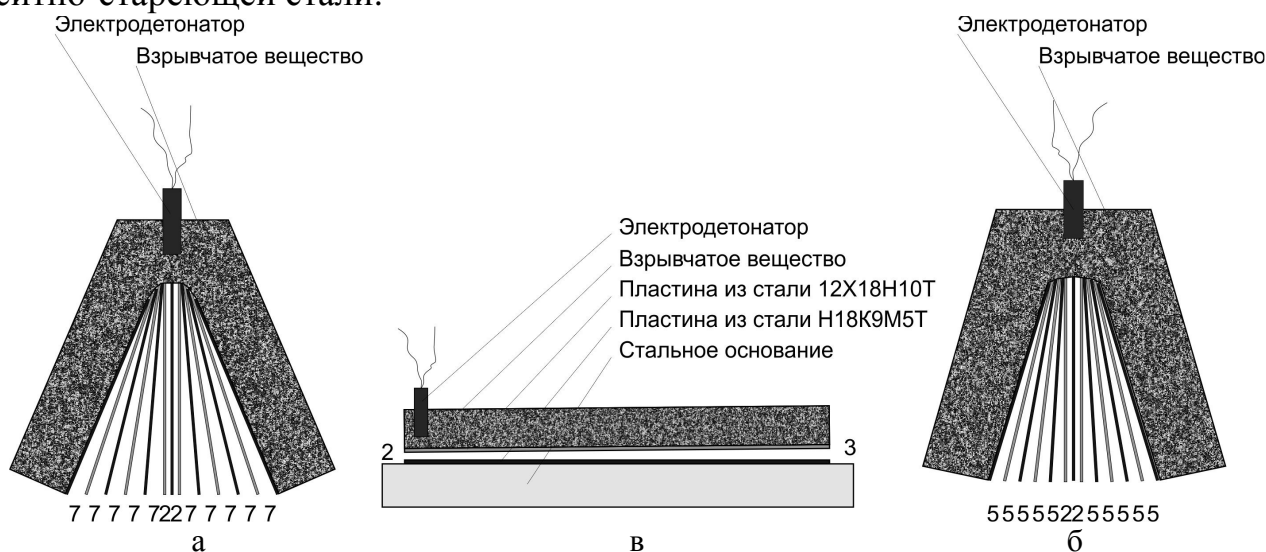


Рисунок 1 - Схемы получения тринадцатислойных композиционных материалов методом сварки взрывом пластин из сталей 20 и H18K9M5T0 (а), сталей H18K9M5T и 12X18H10T (б), и двухслойного материала из сталей H18K9M5T и 12X18H10T (в). Цифрами обозначено расстояние между соединяемыми заготовками в мм

Для проведения структурных исследований использовали методы оптической металлографии (микроскопы *Carl Zeiss AXIO Observer A1* и *Carl Zeiss AXIO Observer Z1m*), растровой электронной микроскопии (микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа) и трансмиссионной электронной микроскопии (микроскоп *Tecnaï G2 20 TWIN*).

Прочностные свойства исследуемых материалов оценивали с использованием установки *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 многослойных материалов оценивали по методике, основанной на построении кинетических диаграмм усталостного разрушения плоских образцов.

В третьем разделе диссертационной работы «Моделирование процессов, происходящих при динамическом взаимодействии стальных пластин» представлен анализ результатов математического моделирования сварки взрывом пластин из стали H18K9M5T и стали 12X18H10T. Для анализируемого процесса

сварки металлических материалов характерно развитие быстропротекающих процессов, локализованных в микрообъемах деформируемых заготовок.

В связи с этим ряд важных технологических особенностей, таких как изменение температуры по глубине деформированного слоя, а также изменение степени пластической деформации в объеме заготовки, методами инструментальных измерений зафиксировать практически невозможно. В то же время эти данные необходимы для объяснения структурных преобразований, происходящих в процессе сварки. Для решения этой задачи в работе было проведено моделирование быстро протекающих процессов с использованием программного продукта *Ansys Autodyn 12.0*.

Численным моделированием с применением программного комплекса *ANSYS AUTODYN 12.0* исследованы тепловые и деформационные процессы, протекающие в наиболее нагруженной зоне сварки заготовок из сталей 12X18H10T и H18K9M5T. Показано, что при соударении стальных пластин температура материала достигает 2080 K. Полученные данные, свидетельствуют об интенсивной пластической деформации поверхностных слоев стальных заготовок. Максимальное давление при сварке взрывом составляет ~ 43 ГПа, скорость пластической деформации ~ 42 мкс⁻¹, величина эффективной пластической деформации в зоне контакта динамически взаимодействующих пластин - не менее 7. Расчетные данные свидетельствуют о возможности развития процессов полигонизации, рекристаллизации и формирования в зоне соединения локальных зон расплава глубиной ~ 30 мкм. Результаты математического моделирования подтверждены структурными исследованиями композитов, проведенными на различных масштабных уровнях.

Четвертый раздел диссертационной работы «Анализ структуры многослойных материалов «сталь H18K9M5T - сталь 20» и «сталь H18K9M5T - сталь 12X18H10T», полученных сваркой взрывом» посвящен исследованию структурных преобразований, протекающих при высокоскоростном косом соударении стальных заготовок, а также при термической обработке готовых сварных пакетов.



Рисунок 2 - Строение композита, состоящего из чередующихся слоев сталей 20 и H18K9M5T (а), также сталей H18K9M5T и 12X18H10T (б)

В процессе сварки взрывом стальных пластин по выбранным в работе режимам в слоистых пакетах были сформированы швы различной конфигурации. Строение композитов из тринадцати чередующихся слоев, полученных за один этап сварки, представлено на рисунке 2. В композитах «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» наблюдаются межслойные границы как с волновым, так и с прямолинейным профилем. Отношение «амплитуда – длина волны» в сварных швах находилось в диапазоне значений 0,14...0,3.

В центральных пластинах композитов «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т», наблюдаются полосы локализованной пластической деформации, являющиеся результатом адиабатического сдвига материала (рисунок 2). Полосы сдвига располагаются примерно под углом 45° к плоскостям соединяемых пластин. В соответствии со своей природой полосы локализованной пластической деформации могут служить очагами зарождения трещин. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что образования дефектов такого типа в пластичной стали Н18К9М5Т, находящейся в закаленном состоянии при формировании многослойных композитов не происходит.

При проведении структурных исследований особое внимание уделяли анализу зон сопряжения разнородных пластин. Вблизи вершин и гребней волн, зафиксированных в сварных соединениях, наблюдаются локальные микрообъемы, в пределах которых имело место механическое перемешивание материалов. Химическая травимость этих микрообъемов выражена в меньшей степени по сравнению с основным металлом. Их происхождение обусловлено не только перемешиванием, но и переплавом разнородных материалов в процессе сварки взрывом (рисунок 3). Результаты математического моделирования свидетельствуют о возможности образования структуры подобного рода.

Оценка химического состава локальных зон в композите «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» была проведена с использованием метода энергодисперсионного анализа. На рисунке 4 выделены зоны, соответствующие деформированной мартенситно-старяющей стали Н18К9М5Т (1), переплавленному слабо травящемуся материалу (2), деформированной хромоникелевой стали (3). Элементный состав отмеченных зон представлен в таблице 1.

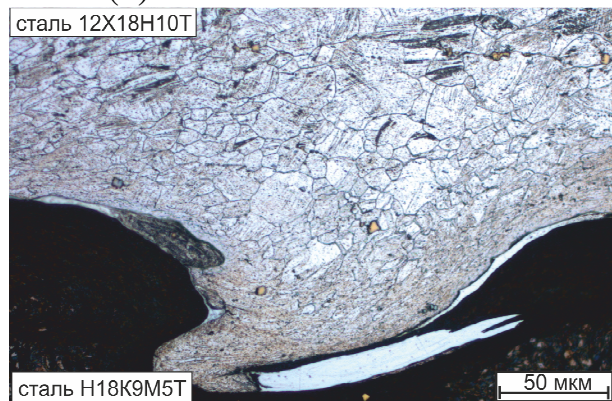


Рисунок 3 - Сварной шов между пластинами из сталей 12Х18Н10Т и Н18К9М5Т

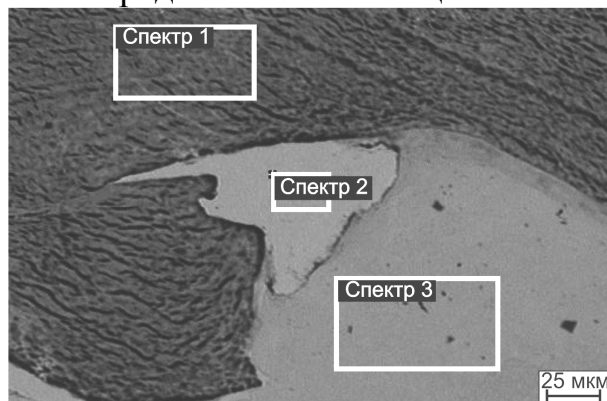


Рисунок 4 - Участки съемки спектров на поверхности микрошлифа двухслойного композита «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т»

Таблица 1 - Результаты микрорентгеноспектрального анализа околошов-
ной области двухслойного материала «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т»

Анализируемый участок	Ni, вес. %	Co, вес. %	Mo, вес. %	Cr, вес. %	Ti, вес. %	Si, вес. %	Fe, вес. %
Спектр 1	25,57	5,97	20,95	-	2,58	-	44,93
Спектр 2	15,34	6,12	4,15	5,83	0,76	-	67,81
Спектр 3	8,91	-	-	18,81	0,62	0,54	71,12

Анализ полученных результатов свидетельствует о формировании вдоль границ сопряжения разнородных стальных пластин множества островков перемешанных материалов.

В процессе высокоскоростного соударения стальных пластин структура материала в зонах сварных швов претерпевает кардинальные преобразования, обусловленные интенсивной пластической деформацией с высокими степенями обжатия. Один из надежных способов, характеризующих степень деформационного упрочнения материалов, основан на измерении микротвёрдости (рисунок 5).

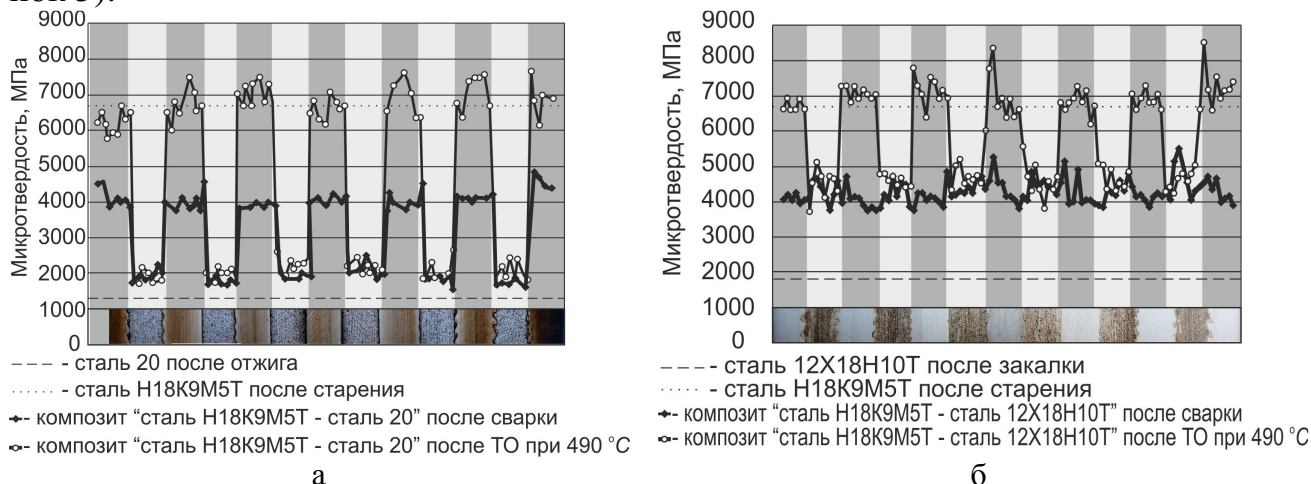


Рисунок 5 – Распределение микротвердости в 13-слойных композиционных материалах, полученных сваркой взрывом чередующихся пластин из сталей 20 и Н18К9М5Т (а), а также сталей Н18К9М5Т и 12Х18Н10Т (б)

При исследовании композита «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т», экспериментально установлено, что влияние процессов деформации и термической обработки на характер поведения хромоникелевой аустенитной и мартенситно-старяющей сталей существенно различается. Микротвердость стали 12Х18Н10Т резко возрастает при сварке взрывом (с 1900 до 4540 МПа). Последующая выдержка композита в печи при 490 °С влияния на микротвердость этой стали практически не оказывает. Сталь Н18К9М5Т, наоборот, не склонна к упрочнению при сварке взрывом и существенно упрочняется на стадии старения за счет выделения интерметаллидных частиц. Выдержка при 490 °С сопровождается ростом микротвердости мартенситно-старяющей стали от 4000 до 7500 МПа.

Нагрев и трехчасовая выдержка композита при 490 °С сопровождается существенным ростом микротвердости мартенситно-старяющей стали. Отмеченный температурно-временной режим термической обработки сварного

пакета приводит к старению стали Н18К9М5Т. Наблюдаемый рост микротвердости от 4000 МПа до 7500 МПа обусловлен выделением в процессе старения мелкодисперсных интерметаллидных фаз Ni_3Ti . Следует подчеркнуть, что микротвердость мартенситно-старяющейся стали в термически обработанном многослойном композите превышает значения, зафиксированные при анализе пластин Н18К9М5Т, подвергнутых аналогичной термической обработке (закалке на воздухе и последующему старению) (рисунок 5 б).

С целью изучения тонких структурных изменений, происходящих в материалах при сварке взрывом, были проведены трансмиссионные электронно-микроскопические исследования. Полученные композиты изучали в режимах светлого и темного поля, а также микродифракции. Анализ сварных соединений «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» свидетельствует о наличии четких границ сопряжения пластин из стали 20, находящейся в феррито-перлитном состоянии, и стали Н18К9М5Т (рисунок 6 в). Строение реечного мартенсита в динамически деформированной мартенситно-старяющейся стали, зафиксированное вблизи границы сопряжения пластин, отражено на рисунке 6 а.

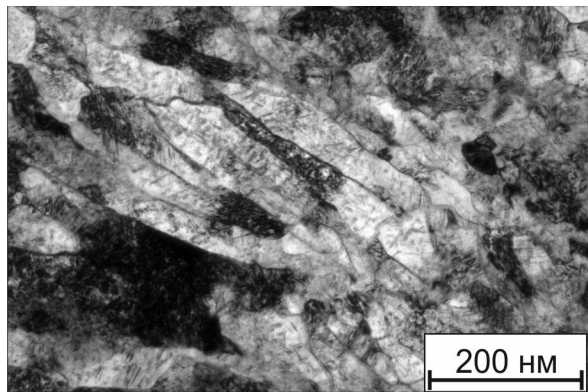
Электроннограмма в виде плотных колец свидетельствует о высокой степени разориентировки кристаллов мартенсита (рисунок 6 б). Для стали Н18К9М5Т, находящейся в состаренном состоянии, характерно выделение интерметаллидов типа Ni_3Ti и Fe_2Mo (рисунок 6 г). Присутствие этих наноразмерных частиц является основным фактором, объясняющим резкое возрастание твердости и прочностных свойств на этапе старения мартенситно-старяющейся стали. Результатом рекристаллизации феррита в поверхностном слое стали 20 является образование равноосных зерен размером 1...2 мкм с малым количеством дислокаций (рисунок 6 д).

В пятом разделе «Механические свойства сварных пакетов из разнородных материалов, полученных сваркой взрывом» приведены результаты механических испытаний по определению свойств, характеризующих показатели прочности, надежности и долговечности многослойных композиций.

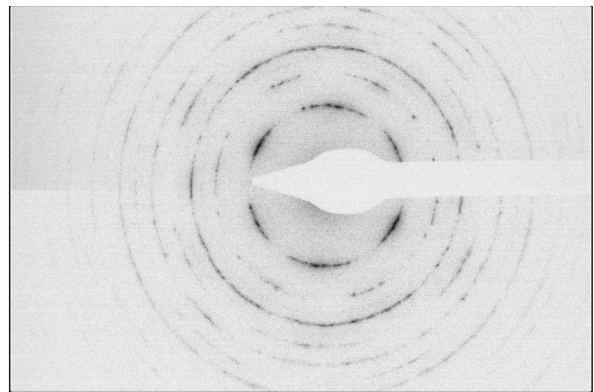
Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что сваренные взрывом слоистые материалы обладают высоким комплексом механических свойств. Значения предела прочности и предела текучести тринадцатислойного композита «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» после трехчасовой выдержки при 490 °С составляют 1510 МПа и 1460 МПа соответственно. Величина относительного удлинения образцов достигает 10 %. Замена в сварных пакетах стали 20 на сталь 12Х18Н10Т приводит к некоторому повышению комплекса свойств тринадцатислойного композита. После термической обработки предел прочности материала возрастает до 1570 МПа. При этом относительное удлинение образцов составляет 15 %. При испытании двухслойного композита зафиксированы близкие показатели прочности и пластичности: $\sigma_B = 1610$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1320$ МПа, $\delta = 14$ %.

Результатом сварки взрывом пластин из стали Н18К9М5Т и стали 20 является рост ударной вязкости композита на 53 % по сравнению со сталью 20 (до 120 Дж/см²). Вывод о повышении свойств может быть сделан также по результатам испытаний композита «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т». Его

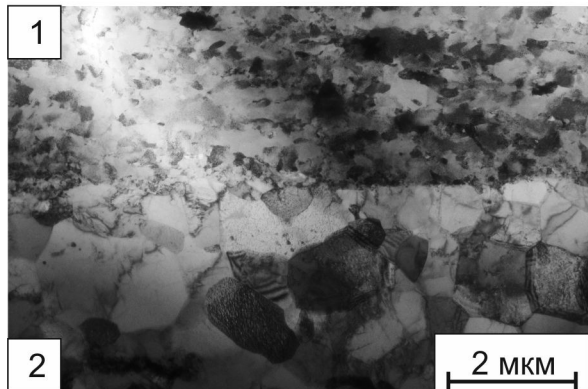
ударная вязкость (200 Дж/см^2) всего лишь на 5 % ниже по сравнению с пластичной сталью 12X18H10T (210 Дж/см^2). В то же время объемная доля хромоникелевой стали в композите составляет 46 %. То есть более половины объема занято мартенситно-стареющей сталью, находящейся в высокопрочном состоянии. Её ударная вязкость в пять раз меньше по сравнению с аустенитной сталью 12X18H10T.



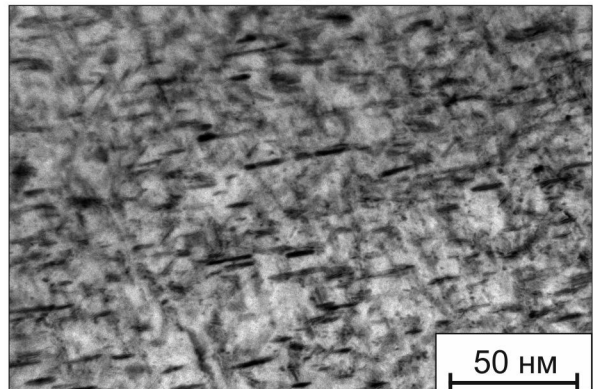
а



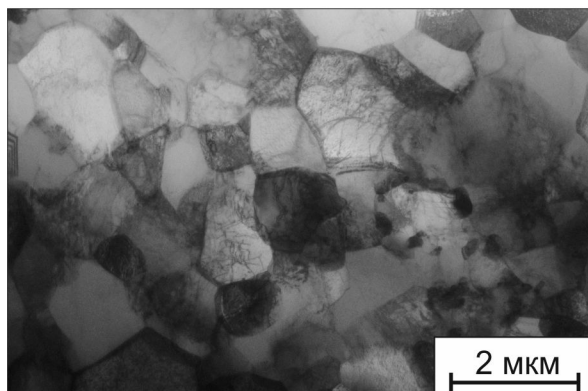
б



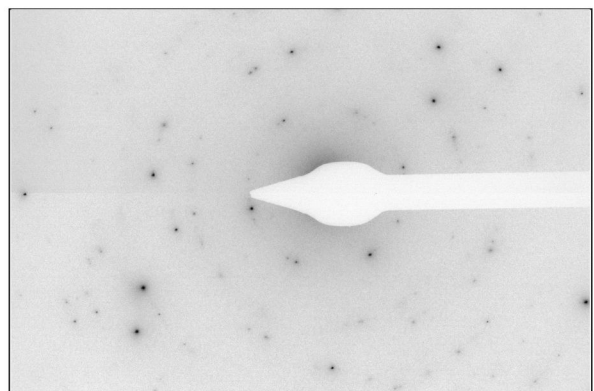
в



г



д



е

Рисунок 6 - Особенности тонкого строения сварного шва и околошовной зоны в композите “сталь N18K9M5T - сталь 20”: а, б - реечный мартенсит в стали N18K9M5T; в - граница между сваренными пластинами стали N18K9M5T (1) и стали 20 (2); г - интерметаллидные включения Ni_3Ti в стали N18K9M5T; д, е - феррит стали 20 в зоне сварного шва

Положительный эффект, зафиксированный при динамических испытаниях тринадцатислойных пакетов, объясняется благоприятным влиянием границ раздела, выражающимся в росте затрат энергии на распространение разрушающей трещины.

Для оценки способности полученных материалов эксплуатироваться при воздействии циклических нагрузок используют методы, основанные на испытании образцов с предварительно созданными трещинами. В диссертационной работе трещиностойкость композиционных материалов определяли, анализируя кинетические диаграммы усталостного разрушения. Изучали поведение образцов, изготовленных из тринадцатислойных пакетов типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т». Все образцы после сварки были выдержаны в течение 3 часов при 490 °С.

Сравнительный анализ кинетических диаграмм усталостного разрушения показал, что образцы, изготовленные из сварного пакета, содержащего в своем составе пластины из хромоникелевой стали, обладают более высокой трещиностойкостью, по сравнению с образцами из композита «сталь Н18К9М5Т - сталь 20» (рисунок 7). При величине размаха коэффициента интенсивности напряжений 20 МПа *√м скорость распространения усталостной трещины в композите типа «сталь Н18К9М5Т - сталь 20» в 2 раза выше по сравнению с композитом «сталь Н18К9М5Т - сталь 12Х18Н10Т» (20×10^{-8} м/цикл и 40×10^{-8} м/цикл соответственно).

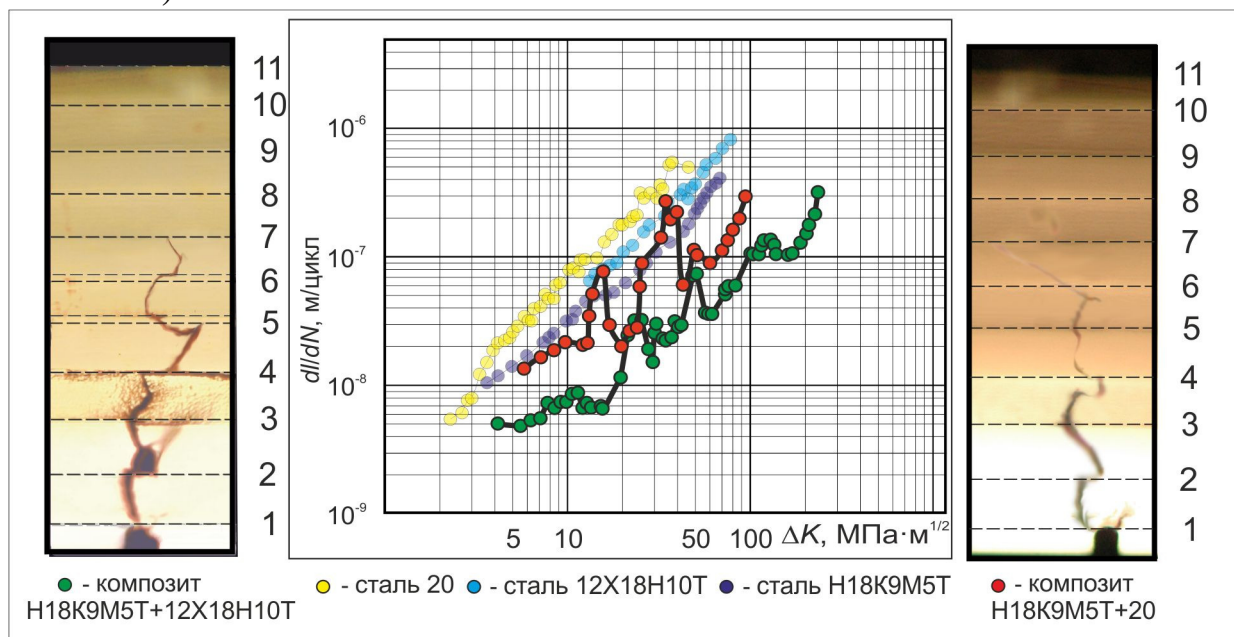


Рисунок 7 - Кинетические диаграммы усталостного разрушения композитов «сталь Н18К9М5Т - сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т - сталь 12Х18Н10Т»

Рост трещин в композиционных материалах происходит с переменной скоростью. При прохождении межслойных границ трещина, отклоняясь от прямолинейного развития, замедляет скорость распространения. На диаграммах разрушения это выражается в формировании характерных провалов. Благоприятное влияние оказывают также эффекты затупления и ветвления трещин. Таким образом разрушение многослойных пакетов сопровождается более высокими затратами энергии, чем образцов из исходных материалов, составляющих композиты.

Анализ полученных данных позволяет сделать два предложения по созданию композиционных материалов, половина слоев в которых представляют собой пластины из мартенситно-старееющей стали. Во-первых, экономическая

эффективность композиций «сталь Н18К9М5Т - сталь 12Х18Н10Т» и «сталь Н18К9М5Т - сталь 20» может быть повышена путем уменьшения толщины слоев мартенситно-старееющей стали и соответствующего увеличения толщины пластин углеродистой или хромоникелевой стали. В этом случае трещиностойкость материала будет обеспечиваться множеством межслойных границ, которые, как уже отмечалось, оказывают тормозящее действие на продвигающиеся трещины. Такое решение позволяет снизить объемную долю, а соответственно и расход, дорогостоящей мартенситно-старееющей стали. Второе предложение связано с увеличением количества границ раздела между разнородными сталями. Это означает необходимость снижения толщины стальных заготовок, что, в свою очередь, выражается в увеличении количества сварных швов, представляющих эффективные барьеры на пути распространяющихся трещин.

В шестом разделе «Апробация результатов экспериментальных исследований» сформулированы рекомендации по практической реализации технологии сварки взрывом многослойных композиций, содержащих слои из мартенситно-старееющей стали.

Разработанные слоистые материалы обладают высоким комплексом прочностных свойств и превосходят мартенситно-старееющую сталь и многие композиционные материалы по показателям ударной вязкости и трещиностойкости. Это позволяет использовать многослойные материалы из разнородных сталей при производстве изделий ответственного назначения.

Результаты исследований легли в основу патента *RU 2470755C2* «Способ получения сварного соединения разнородных металлических материалов», обеспечивающего возможность существенного повышения прочности соединения заготовок из разнородных материалов.

Результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе на механико-технологическом факультете Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» (в лекционных курсах «Общее материаловедение и технологии материалов» и «Технология конструкционных материалов», а так же при выполнении лабораторных работ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Формирование многослойных пакетов методом сварки взрывом пластин из мартенситно-старееющих сталей с пластинами из углеродистых и легированных аустенитных сталей является эффективным способом достижения высоких показателей конструктивной прочности металлических материалов. На примере многослойных композиций «сталь Н18К9М5Т - сталь 20» и «сталь Н18К9М5Т - сталь 12Х18Н10Т» экспериментально было показано различие предела прочности на 28 % и 21 %, соответственно, по сравнению с расчетными значениями, полученными при использовании правила смесей. Прирост прочности обусловлен деформационным упрочнением, происходящим при динамическом взаимодействии стальных заготовок. Для сваренного взрывом композита «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» предел прочности составил 960 МПа. Терми-

ческая обработка, проводимая по режиму, соответствующему старению мартенситно-старееющей стали, позволяет дополнительно повысить предел прочности материала до 1570 МПа.

2 Численным моделированием с применением программного комплекса *ANSYS AUTODYN 12.0* исследованы тепловые процессы и процессы деформации, протекающие в наиболее нагруженной зоне сварки заготовок из сталей 12X18H10T и H18K9M5T. Показано, что при соударении стальных пластин температура достигает 2080 К. Полученные данные, свидетельствуют об интенсивной пластической деформации поверхностных слоев стальных заготовок. Максимальное давление при сварке взрывом составляет ~ 43 ГПа, скорость пластической деформации ~ 42 мкс⁻¹, величина эффективной пластической деформации в зоне контакта динамически взаимодействующих пластин - не менее 7. Расчетные данные свидетельствуют о возможности развития процессов полигонизации, рекристаллизации и формирования в зоне соединения локальных зон расплава. Малая ширина зоны кардинальных структурных преобразований, согласно расчетам не превышающая 30 мкм, обусловлена кратковременностью процессов нагрева и последующего охлаждения сварных швов. Результаты математического моделирования процессов подтверждены структурными исследованиями композитов, проведенными на различных масштабных уровнях.

3 Структура композитов в зоне соединения пластин формируется в условиях развития конкурирующих процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения. В стали 20 доминируют эффекты термического разупрочнения, что выражается в развитии процессов полигонизации и рекристаллизации феррита. Мартенситно-старееющая сталь в меньшей степени подвержена влиянию температурных эффектов, о чём свидетельствует текстура, зафиксированная методом просвечивающей электронной микроскопии.

4 Экспериментально установлено, что влияние процессов деформации и термической обработки на характер поведения хромоникелевой аустенитной и мартенситно-старееющей сталей существенно различается. Микротвердость стали 12X18H10T резко возрастает при сварке взрывом (с 1900 до 4540 МПа). Последующая выдержка композита в печи при 490 °С влияния на микротвердость этой стали практически не оказывает. Сталь H18K9M5T, наоборот, не склонна к упрочнению при сварке взрывом и существенно упрочняется на стадии старения за счет выделения наноразмерных интерметаллидных частиц. Выдержка при 490 °С сопровождается ростом микротвердости мартенситно-старееющей стали от 4000 до 7500 МПа.

5 При сварке взрывом тринадцатислойных композитов типа «сталь H18K9M5T – сталь 20» и «сталь H18K9M5T – сталь 12X18H10T» в центральных слоях из мартенситно-старееющей стали проявляется эффект локализации пластической деформации. Основная причина локализации связана с одновременным силовым воздействием на центральную пластину двух соседних слоистых пакетов, масса которых равна сумме масс предварительно соединенных пластин. Несмотря на формирование в центральной пластине полос локализованного пластического течения, образования микро- и макротрещин в ней

не зафиксировано, что обусловлено высоким ресурсом пластичности стали Н18К9М5Т, находившейся в предварительно закаленном состоянии. Показано, что при формировании волновых швов в анализируемых многослойных композиционных материалах возможно проявление особого вида локализации пластической деформации - смещения гребней сварных швов в продольном направлении соединяемых заготовок.

6 Результаты исследований, полученных при выполнении диссертационной работы, положены в основу патента RU2470755C2 на формирование сварных соединений с повышенным уровнем прочности из разнородных материалов.

7 Результаты исследований, представленных в диссертационной работе, приняты к использованию обществом с ограниченной ответственностью «КЭПС» для изготовления защитных корпусов электронных устройств.

8 Результаты исследований, полученных в диссертационной работе, используются на механико-технологическом факультете НГТУ при подготовке студентов бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» (в лекционных курсах «Общее материаловедение и технологии материалов» и «Технология конструкционных материалов», а так же при выполнении лабораторных работ).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1 Структура и усталостная трещиностойкость многослойного композита «сталь 20 — сталь 12Х18Н10Т», полученного сваркой взрывом [Текст] / Е. А. Приходько, А. А. Никулина, И. А. Батаев, А. И. Попелух, А. А. Батаев, В. С. Ложкин // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – №3. – С. 28–34.

2 Ложкин, В. С. Структура и свойства многослойного композита, сформированного сваркой взрывом тонколистовых пластин из сталей 20 и Н18К9М5Т / В.С. Ложкин // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2013. – № 3. – С. 110–114.

3 Ложкин, В. С. Структура и механические свойства многослойного композита, сформированного сваркой взрывом тонколистовых сталей 12Х18Н10Т и Н18К9М5Т [Текст] / В. С. Ложкин, Е. А. Ложкина, В. И. Мали, М. А. Есиков // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2014. – № 3. – С. 28–36.

В прочих изданиях

4 *The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multilayered composites welded by explosion [Text] / E. A. Prikhodko, I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. S. Lozhkin, M. A. Esikov, V. I. Mali // Advanced Materials Research.–Vol. 535-537 (2012). –pp 231-234.*

5 *The increase of structural strenght of multilayered materials produced by explosive welding of dissimilar steels thin plates [Text] / E. A. Prikhodko, V. S. Lozhkin, V. I. Mali, M. A. Esikov // The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013) : proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June –1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol.1. – P.37 – 40.*

6 *Microstructure and mechanical properties of copper-tantalum joints produced by explosive welding [Text] / V. I. Mali, A. A. Bataev, I. A. Bataev, Y. N. Malyutina, M. A. Esikov, V. S. Lozhkin // The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013) : proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 1. – P. 9-12.*

7 Пат. 2470755 Российская Федерация, МПК В 23К 020/08, В 23 К 103/18. Способ получения сварного соединения разнородных металлических материалов [Текст] / И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. И. Мали, В. А. Батаев, В. Г. Буров, Е. А. Приходько, Д. В. Павлюкова, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, В. С. Ложкин, Е. Д. Головин, А. А. Дробяз, А. С. Гонтаренко, А. И. Попелюх; патентообладатель Новосибирский государственный технический университет. - № 2011109489/02; заявл. 14.03.2011; опубл. 27.12.2012.

8 Ложкин, В. С. Структура и свойства слоистого композиционного материала на основе мартенситно-старееющей стали и стали 20 [Текст] / В. С. Ложкин // Студент и научно-технический прогресс. Новые материалы и технологии : материалы 51 междунар. науч. студ. конф., Новосибирск, 12–18 апр. 2013 г. – Новосибирск : Изд – во НГУ, – 2013. – С. 43.

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

10 Ложкин, В. С. Структура и свойства слоистых композиционных материалов полученных сваркой взрывом высокопрочных и пластичных стальных пластин [Текст] / В. С. Ложкин, М. С. Маковкина, Е. А. Приходько // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции (Новосибирск, 28 марта 2012 г.). Новосибирск, – 2012. – С.187–190.

11 Приходько, Е. А. Особенности поведения хромоникелевой стали 12Х18Н10Т при формировании слоистых композиций сваркой взрывом [Текст] / Е. А. Приходько, В. С. Ложкин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 11 Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 27 марта 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, – 2013. – С. 310–312.

12 Ложкин, В. С. Структурные преобразования в слоистом композите системы «Сталь 12Х18Н10Т - Сталь 20», полученном по технологии сварки взрывом [Текст] / В. С. Ложкин, Е. А. Приходько // Наука. Технологии. Инновации // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-и частях, Новосибирск, – 2012. Часть 4. – С. 221–223.

13 Структурные преобразования в поверхностных слоях динамически взаимодействующих металлических пластин [Текст] / И. А. Батаев, А. А. Батаев, М. А. Есиков, В. И. Мали, В. С. Ложкин // Забабахинские научные чтения : сборник материалов XI Международной конференции 16-20 апреля 2012. – Снежинск : Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, –2012. – С. 213-214

14 Двойникование в пластинчатом перлите при высокоскоростной деформации стали [Текст] / И. А. Батаев, А. А. Батаев, Н. А. Морева, В. С. Ложкин, А. Ю. Чумаченко, Е. А. Приходько // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, Томск, 5–9 сент. 2011 г. – Томск : [ИФПМ СО РАН], – 2011. – С. 148–149.

15 Ложкин, В. С. Особенности локализации пластического течения при сварке взрывом пластин из титановых сплавов [Текст] / Д. В. Павлюкова, В. С. Ложкин, П. С. Ярцев // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 50-летию полета Ю. А. Гагарина в космос (Новосибирск, 20–22 апр. 2011 г.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, –2011. – С. 486-490.

16 Ложкин, В. С. Свойства слоистых материалов с композиционной структурой, полученных сваркой взрывом высокопрочных и пластичных стальных пластин [Текст] / В. С. Ложкин, Е. А. Приходько, А. А. Руктуев // Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», 18-20 апреля 2012, – С. 387-391.

17 Структура и механические свойства сварных швов, сформированных в процессе сварки взрывом углеродистых сталей [Текст] / И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. И. Мали, В. А. Батаев, В. Г. Буров, В. С. Ложкин // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, Томск, 5–9 сентября 2011 г. – Томск : [ИФПМ СО РАН], 2011. – С. 146–148.

18 Механические свойства слоистых композиционных материалов, полученных сваркой взрывом пластин из мартенситно-стареющей стали [Текст] / М. А. Есиков, Е. В. Кривонос, В. С. Ложкин // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 2–4 декабря 2011 г. : в 6 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, – 2011. – Ч. 3. – С. 86–87.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, 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 № 1194 подписано в печать 17.10.2014 г.