

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»



На правах рукописи

РАХИМЯНОВ АНДРЕЙ ХАРИСОВИЧ

ТОНКОСТРУЙНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., профессор
Б.А. Красильников

Новосибирск 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5	
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ		
РЕЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	11	
1.1 Методы создания биметаллических композиций	13	
1.2 Лазерная резка	22	
1.3 Кислородная резка	32	
1.4 Плазменно-дуговая резка	39	
1.5 Выводы	54	
1.6 Цель и задачи исследования	55	
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ		56
2.1 Исходные материалы для получения биметаллических композиций	56	
2.2 Технологическое оборудование для тонкоструйной плазменной резки	62	
2.3 Методы экспериментальных исследований	63	
2.3.1 Химический анализ материалов	63	
2.3.2 Методы структурных исследований	63	
2.3.2.1 Оптическая микроскопия	63	
2.3.2.2 Растровая электронная микроскопия	64	
2.3.2.3 Рентгенофазовый анализ	64	
2.3.3 Методы исследования топографии поверхности реза	64	
2.3.4 Оценка точности реза	65	
2.3.5 Измерение микротвердости поверхностного слоя в зоне реза	66	

ГЛАВА 3 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	67
3.1 Технологические возможности плазменного раскроя модельных материалов	68
3.1.1 Конструкционные углеродистые стали	68
3.1.2 Легированные стали	72
3.1.3 Алюминиевые и медные сплавы	73
3.2 Оптимизация режимов плазменного раскроя модельных материалов	75
3.2.1 Низкоуглеродистая сталь Ст3 и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	75
3.2.2 Алюминий А5М и медь М1	82
3.3 Выводы	91
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ	94
4.1 Низкоуглеродистая сталь Ст3 + нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	94
4.1.1 Обработка на режимах раскроя легированных сталей	97
4.1.2 Обработка на режимах раскроя конструкционных углеродистых сталей	105
4.2 Низкоуглеродистая сталь Ст3 + алюминий А5М	110
4.2.1 Обработка на режимах раскроя конструкционных углеродистых сталей	112
4.2.2 Обработка на режимах раскроя алюминиевых сплавов	117
4.3 Низкоуглеродистая сталь Ст3 + медь М1	119
4.4 Выводы	125

ГЛАВА 5 СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ	128
5.1 Особенности структурного состояния сварного шва биметаллических композиций	128
5.2 Формирование структурного состояния в зоне реза биметаллических композиций	136
5.2.1 Композиция «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»	137
5.2.2 Композиция «сталь Ст3 + алюминий А5М»	145
5.2.3 Композиция «сталь Ст3 + медь М1»	152
5.3 Технологические рекомендации по раскрою биметаллических композиций с использованием тонкоструйной плазменной резки	157
5.4 Выводы.....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	167
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	179

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Технологический процесс изготовления деталей в общем случае предполагает традиционную его структуру: заготовительная операция, комплекс механических операций, включая обдирочные, черновые, чистовые и отделочные этапы обработки, различного рода термические операции (нормализация, отжиг, закалка, отпуск), операции нанесения покрытий, мойка, контроль. Совершенствование технологического процесса изготовления деталей направлено на выбор наиболее приемлемых для конкретных условий производства методов обработки на каждой из отмеченных стадий. Основным критерием выбора служит технологическая себестоимость обработки при условии обеспечения требуемого качества. Технологическая себестоимость, в свою очередь, будет определяться производительностью внедряемых методов, экономичностью расходования разного рода ресурсов (энергетических, материальных и т.д.), уровнем квалификации обслуживающего персонала, степенью автоматизации процессов обработки, ценой технологического оборудования.

Перспективным путем снижения технологической себестоимости изготовления деталей является использование таких методов обработки, которые позволили бы сократить или исключить определенные стадии в технологическом процессе. Так на этапе заготовительного производства применение литых заготовок предполагает последующую механическую обработку по удалению литников и прибылей, для сварных конструкций необходима зачистка швов, газопламенная и плазменная резки, сопровождаемые плохим качеством реза, требуют последующих обдирочных операций по удалению лишнего припуска и т.д.

Развитие современного оборудования, использование систем ЧПУ позволяет в определенной степени решить вопросы повышения точности на за-

готовительных стадиях технологического процесса, в частности, при раскрое листовых материалов. Появление новых технологических процессов, относящихся к методам электрофизикохимической и комбинированной обработки материалов (ЭФХКО) [1], таких как лазерная обработка, тонкоструйная плазменная обработка, струйная гидравлическая обработка, электроэрозионная обработка позволило повысить качество самого реза и его точность, что исключает необходимость создания излишних припусков на механическую обработку.

Для эффективного использования того или иного метода резки на заготовительной стадии процесса изготовления необходимо наличие технологических рекомендаций для обработки того или иного класса металлических материалов.

Кроме этого появление новых классов материалов, таких как аморфные и нанокристаллические сплавы, слоистые композиции разнородных материалов, полученные прокаткой или сваркой взрывом, требует как теоретических, так и экспериментальных исследований, направленных на технологическую отработку для внедрения того или иного метода разделительной резки.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время в заготовительном производстве машиностроительной отрасли в мире, в целом, и в России, в частности, эффективно используется тонкоструйная плазменная резка листовых металлических материалов. Мировые лидеры по производству данного оборудования (фирмы Kjellberg, Германия и Hypertherm, США) предоставляют технологическое обеспечение в виде рекомендаций по выбору технологических схем и назначению режимов для раскроя углеродистых, легированных сталей, алюминиевых сплавов. Существующие научные исследования посвящены оптимизации технологических режимов в рамках определенной технологической схемы при обработке конкретной марки материала. Однако вопрос тонкоструйной плазменной резки биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов, остается нерешенным.

Цель работы

Целью диссертационной работы является расширение технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки в части обработки слоистых биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов.

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

1. Выбор метода получения слоистых материалов и анализ существующих технологий резки.
2. Назначение технологических схем и оптимизация режимных параметров тонкоструйной плазменной резки модельных материалов, составляющих исследуемые биметаллические композиции с оценкой точности и качества реза.
3. Проведение экспериментальных исследований раскроя биметаллических композиций для выбора рациональных технологических схем тонкоструйной плазменной резки с оптимизацией режимных параметров по критериям точности и качества реза.
4. Изучение процессов, протекающих в канале реза для различных схем плазменного раскроя исследуемых сварных биметаллических композиций, на основе структурных исследований.
5. Разработка технологических рекомендаций по выбору технологических схем тонкоструйной плазменной резки и назначению режимных параметров для раскроя биметаллических композиций.

Научная новизна

1. Обоснованы условия осуществления тонкоструйной плазменной резки биметаллических композиций, состоящих из разнородных материалов, в части выбора технологической схемы, назначения режимных параметров и установления лобовой стороны для раскроя.
2. Установлены закономерности формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций, состоящих из разнородных материалов.

Практическая ценность работы

1. Разработаны рекомендации по выбору технологических схем, определены режимные параметры тонкоструйной плазменной резки биметаллических композиций «низкоуглеродистая сталь Ст3 + нержавеющая сталь 12Х18Н10Т», низкоуглеродистая сталь Ст3 + алюминий А5М», «низкоуглеродистая сталь Ст3 + медь М1».

2. Установлена взаимосвязь точности, качества реза и графообразования с режимными параметрами обработки для различных технологических схем плазменного раскроя как модельных материалов, так и их биметаллических композиций.

3. Полученные в работе результаты используются в деятельности учебно-научно-производственной лаборатории «Лазерные и плазменные технологии» в ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по оказанию услуг по раскрою листовых металлических материалов для промышленных предприятий региона.

4. Научные результаты диссертации используются в учебном процессе подготовки магистров по направлению 15.04.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет».

Теоретическая значимость работы

Выявлены особенности формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке биметаллических соединений из разнородных материалов с учетом их теплофизических свойств и выбора лобовой поверхности реза, что позволяет управлять характеристиками точности, качества и производительности обработки.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования проводились на основе положений теорий электрофизических методов обработки, технологии машиностроения, материаловедения.

Экспериментальные результаты получены при использовании соответствующих методов исследования на современном аналитическом оборудовании:

- химический анализ используемых материалов на оптико-эмиссионном спектрометре мод. ARL 3460;
- металлографические исследования на оптическом микроскопе мод. AXIO Observer A1m с регистрирующей камерой AXIOCam MRc5;
- растровая электронная микроскопия на электронном микроскопе EV0 50 XVP;
- рентгенофазовый анализ на дифрактометре ARL X'TRA с использованием медной рентгеновской трубки;
- изучение топографии реза на комплексе ZYGO New View 7300, реализующем современные технологии трехмерной сканирующей интерферометрии.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований по выбору технологических схем и назначению режимных параметров по оценкам точности и качества реза модельных материалов.
2. Результаты экспериментальных исследований по выбору технологических схем и назначению режимных параметров для раскрытия исследуемых биметаллических композиций.
3. Закономерности формирования канала реза при тонкоструйной плазменной резке как модельных материалов, так и биметаллических композиций.
4. Технологические рекомендации по использованию тонкоструйной плазменной резки слоистых композиций, представляющих собой соединение металлов с резко отличающимися теплофизическими свойствами.

Степень достоверности и апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Высокие, критические электро - и нанотехнологии» (г. Тула, 2011 г.), 2^{ой} Международной

научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Кемерово, 2011 г.), 3^{ей} Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Барнаул, 2012 г.), 4^{ой} Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, 2013 г.), 6^{ой} Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении – основа технологического развития России (ТМ – 2014)» (г. Барнаул, 2014 г.).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 работы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, списка литературы из 109 наименований, 2 приложений. Общий объем - 181 страница машинописного текста, включая 98 рисунков, 26 таблиц.

Работа выполнена на кафедре технологии машиностроения в учебно-научно-производственной лаборатории «Лазерные и плазменные технологии» ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет».

Диссертационная работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011)» (Проект АВИЦП 2.1.2/11449), при поддержке гранта НК-440П «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 257.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Современные технологии резки металлических материалов основаны на использовании электрофизических процессов. Возможность концентрации энергии в зоне обработки объясняет достигаемые эффекты в обработке различного класса металлических материалов. Использование электрической энергии или специфических физико-химических процессов объясняет принципиальные отличия данных технологий от традиционных технологических методов обработки материалов, основанных преимущественно на механическом воздействии на обрабатываемые материалы. Главные отличия заключаются в следующем [1]:

1. Электрофизикохимические и комбинированные методы (ЭФХКО) обработки любых материалов независимо от их механических свойств (твердости, вязкости, хрупкости и др.) осуществляется без приложения значительных механических усилий. В большинстве методов обработка производится без механического контакта обрабатывающего инструмента с поверхностью заготовки.

2. При ЭФХКО полностью отсутствует необходимость в применении специальных обрабатывающих инструментов, более твердых и прочных, чем обрабатываемый материал. Соответственно, исключается необходимость передачи значительных механических усилий через систему СПИД, что позволяет упростить кинематику и уменьшить массу оборудования. Во многих случаях обрабатывающий инструмент (в обычном его понимании) вообще отсутствует, а его функции выполняет соответствующим образом сформированный поток электронов, ионов, фотонов и т.д.

3. С помощью ЭФХКО можно выполнить множество технологических операций, не выполняемых методами обработки резанием или давлением.

4. При ЭФХКО сокращается расход инструментальных и абразивных материалов, а в силу возможности концентрации энергии в зоне реза и потери обрабатываемого материала.

5. Возможность механизации и автоматизации рассматриваемых методов создает хорошие предпосылки для программного управления процессом и переход на многостаночное обслуживание при невысокой квалификации оператора, обслуживающего оборудование.

Наряду с комплексом существенных положительных технических, технологических и экономических показателей каждому методу ЭФХКО присущи недостатки и ограничения, обусловленные их природой:

1. Повышенная энергоемкость по сравнению с обработкой резанием деталей простых форм из обычных конструкционных материалов при сопоставимых показателях производительности и качества поверхности.

2. Отставание массового выпуска дешевого универсального оборудования от процессов совершенствования самой технологии.

Общим положением, которое можно отнести к рассматриваемым методам ЭФХКО, является то, что по сравнению с обработкой резанием эти методы тем перспективнее, чем сложнее форма обрабатываемого изделия и труднее поддается обработке резанием материал детали. Этим положением и определяется общая принципиальная направленность методов ЭФХКО как новых, прогрессивных технологических методов, преимущественно используемых при создании объектов новой техники с использованием новейших материалов, при переходе к новым формам организации производства.

Для достижения поставленной цели необходимо провести сравнительный технико-экономический анализ наиболее перспективных методов резки, применяемых в современном производстве.

Известно, что электрофизикохимические методы ориентированы преимущественно на использование в технологических процессах получения деталей из так называемых труднообрабатываемых механическим резанием материалов. К ним следует отнести нетрадиционные конструкционные мате-

риалы – различного рода слоистые металлические композиции, материалы с покрытиями, аморфные и наноструктурированные металлы и сплавы. В связи с этим принятию решения о назначении той или иной технологии для обработки подобного класса материалов должно предшествовать изучение как методов их получения, так и специфики физико–механического и структурного состояния. Это необходимо для понимания процессов, происходящих при обработке в рамках определенного электрофизического метода.

Данная работа посвящена поиску эффективных технологий резки биметаллических композиций, основанных на термических методах обработки, с позиций точности, качества обработки и производительности процесса.

1.1 Методы создания биметаллических композиций

Из существующего многообразия технологических методов соединения разнородных материалов, в том числе и листовых металлических композиций, можно выделить технологии, основанные на сварке разнородных металлов при прокатке [2] и метании пластин при помощи взрыва [3-20].

Технология прокатки слоистых композиций заключается в многопрокатном пластическом деформировании предварительного собранного пакета из листовых материалов. Согласно [2] прочное соединение материалов обеспечивается за счет реализации в различной степени рекристаллизационного, пленочного и диффузионного механизмов, возникающих при развитии значительных пластических деформаций в зоне стыка. При рекристаллизационном механизме сварка листовых материалов осуществляется за счет рекристаллизации зерен на границе стыка вследствие локального повышения температуры при деформировании. Возникновение значительных температур на границе стыка также способствует развитию диффузионных процессов, обеспечивающих формирование прочной сварной зоны. Развитие пленочного соединения возможно при наличии относительно хрупких оксидных пленок на поверхности соединяемых металлов. При значительных давлениях, возни-

кающих при прокатке, пленки разрушаются, обеспечивая надежное соединение ювенильных, очищенных от окисных пленок, поверхностей металлов [16].

Если метод прокатки для обеспечения достаточной прочности соединения требует реализации многократного цикла, приводящего в итоге к 5-7 кратному утонению исходного пакета, в то время как соединение листовых материалов при помощи сварки взрывом осуществляется за один технологический цикл. Как и любой технологический метод, сварка взрывом имеет определенную область для реализации и обладает конкретными ограничениями, связанными со спецификой самого процесса. Специфика сварки взрывом, позволяющая рассматривать ее как технологический метод получения слоистых композиций, заключается в следующем [4]:

1. Возможность высокопрочного соединения разнородных металлов, диффузионная сварка которых и сварка плавлением не возможны.
2. Сварка взрывом позволяет получать композиции соединений из металлов с резко различающимися температурами плавления. Например, соединения алюминия с $T_{пл} = 660^{\circ}\text{C}$ и тантала с $T_{пл} = 2996^{\circ}\text{C}$.
3. Особенности процессов, имеющих место при сварке взрывом, позволяют соединять металлы с прочными поверхностными пленками, разрушить которые для создания контакта металлов по ювенильным поверхностям не представляется возможным при использовании метода прокатки.
4. Соединение пар металлов, таких как сталь – титан, сталь – алюминий, медь – титан, медь – алюминий, образующих интерметаллидные прослойки, возможно лишь при развитии высоких температур в зоне стыка в узком временном диапазоне, что реализуется при сварке взрывом.
5. Технологический диапазон толщин плакирующего металла при сварке взрывом составляет от 0,03 до 30 мм, что является весьма привлекательным фактором с целью получения слоистых композиций, предназначенных для использования в различных отраслях промышленного производства. Как отмечает автор [4] нижняя граница толщины плакирующего материала

связана с техническими сложностями установки тонкой фольги на требуемом зазоре, а также с проблемами точного расчета слоя взрывчатого вещества для обеспечения заданной скорости детонации. В тоже время максимальные значения толщин плакирующего металла ограничены физическими процессами сварки взрывом. Так, время существования сжимающих напряжений на границе раздела соединяемых материалов растет пропорционально увеличению толщины свариваемых пластин, а время застывания жидкой фазы в сварном шве пропорционально квадрату толщины. Все это приводит к уменьшению размера зоны сварки при увеличении толщин свариваемых металлов. Данное обстоятельство является особенно критичным для металлов с низкой теплопроводностью и температурой плавления.

6. Высокая скорость развития процессов на границе стыка соединяемых металлов при сварке взрывом накладывает ограничения на развитие диффузионных процессов, что обеспечивает максимальное сохранение химического состава металлов вблизи зоны сварного шва.

Техническое ограничение сварки взрывом как технологического метода связано со следующими обстоятельствами:

1. Значительные пространственные деформации изделия после сварки взрывом, особенно характерные при сопоставимых толщинах плакируемого и плакирующего листов, требуют использования в технологии специальных опор под плакируемый лист [17], либо введение правки изделия после сварки взрывом.

2. Имеют место ограничения в сварке взрывом материалов, склонных к хрупкому разрушению. Автор [4] отмечает, что для данной технологии пригодны материалы с удлинением не менее 5% и ударной вязкостью не менее 13,6 Дж. Для расширения технологических возможностей рассматриваемого метода повышение пластичности свариваемых материалов достигается проведением процесса при повышенных температурах. Однако данное решение приводит к его усложнению и удорожанию.

3. Невозможность локального плакирования на определенной части изделия.

4. Обеспечение стабильности результатов сварки требует тщательного контроля состава, влажности, плотности и других параметров смесевых взрывчатых веществ, что также создает определенные технические и организационные трудности.

5. Внедрение технологии сварки взрывом в производство требует решения ряда организационных задач, связанных с хранением, перевозкой взрывчатых веществ, а также подготовкой персонала для проведения взрывных работ.

6. Обеспечение эффективности любого технологического процесса связано с повышением уровня его механизации и автоматизации. Рассматриваемая технология сварки имеет низкий уровень отмеченных показателей.

Анализ вышеперечисленных особенностей сварки взрывом как технологического метода показывает, что наибольшую эффективность следует ожидать в мелкосерийном производстве для создания композиций из металлических материалов, которые невозможно получить другими методами, таких как сталь + алюминий, сталь + титан, сталь + цирконий. Эффективно использование сварки взрывом вместо технологии наплавки меди и латуни на сталь для создания материала для подшипников скольжения.

Использование композиционных соединений, полученных сваркой взрывом, как специфических конструкционных материалов, требует поиска технологических методов их обработки, в том числе и раскроя на этапе заготовительного производства. Для успешного решения данной задачи необходимо выявить особенности формирования структур в околошовной зоне при сварке взрывом.

Исследования различных схем создания взрывных нагрузок, подробно описанных А.А. Дерibasом [3] и И.Д. Захаренко [4], показали на перспективность с точки зрения практических приложений нагрузки скользящей детонационной волной, реализуемой при косых соударениях металлических по-

верхностей. В общем виде схема сварки взрывом представлена на рисунке 1.1. Для обеспечения надежного сварного соединения между плакируемым и плакирующим материалами необходимо назначение режимов соударения, которые определяются начальными параметрами, отображенными на схеме (рисунок 1.1). К начальным параметрам сварного процесса автор относит: исходный зазор (h) между пластинами, начальный угол (α_0) наклона метаемой пластины по отношению к плакируемой, высоту ($\delta_{\text{ВВ}}$) заряда, его плотность ($\rho_{\text{ВВ}}$), скорость детонации (D) и показатель политропы (K) продуктов детонации.

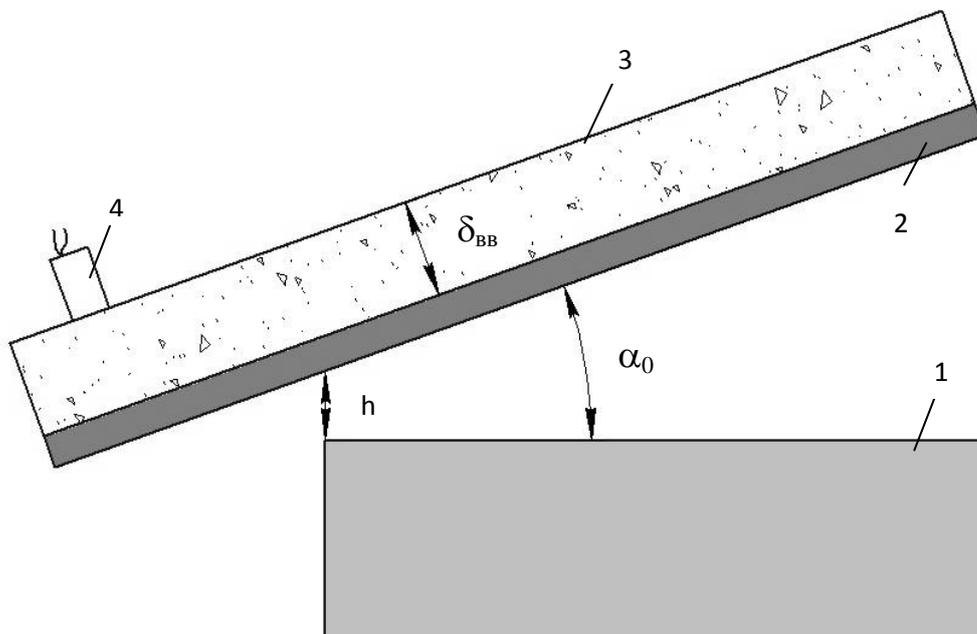


Рисунок 1.1 – Схема сварки взрывом: 1 - плакируемая пластина; 2 - метаемая (плакирующая) пластина; 3 – заряд взрывчатого вещества; 4 – детонатор [4]

Схема соударения пластин в процессе сварки взрывом, представленная на рисунке 1.2, отражает кинематические параметры процесса. Из схемы следует, что кинематика процесса характеризуется двумя параметрами – углом соударения (γ) и скоростью точки контакта (V_k). Связь кинематических параметров с начальными параметрами имеет вид:

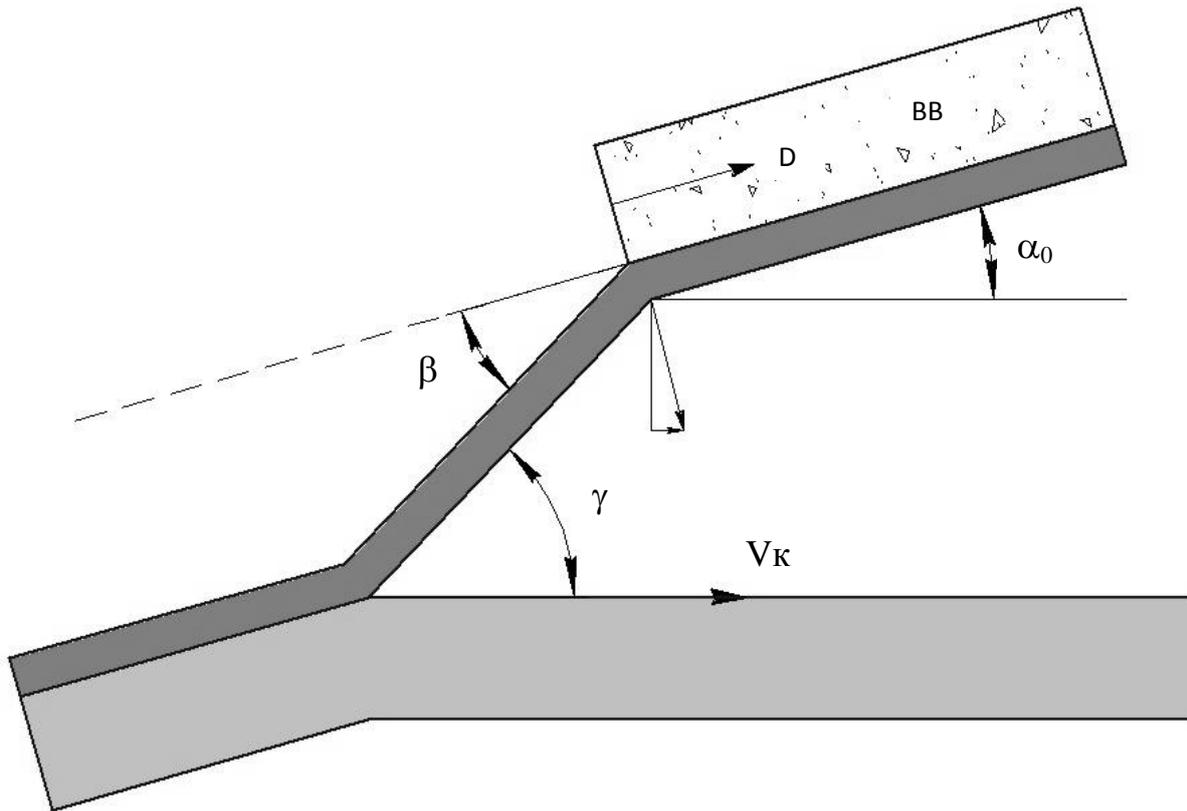


Рисунок 1.2 – Схема соударения пластин при сварке взрывом [4]

$$\gamma = \alpha_0 + \beta, \quad V_K = D \frac{\sin \beta}{\sin \gamma},$$

где: β - угол поворота метаемой пластины, который связан с кинематическими параметрами процесса: $\beta = \beta(r, k, y)$;

r – величина, которую автор [4] определяет как коэффициент нагрузки:

$$r = \frac{\delta_{ВВ} \rho_{ВВ}}{\delta_{П} \rho_{П}};$$

$\rho_{ВВ}$, $\delta_{ВВ}$, $\rho_{П}$, $\delta_{П}$ – плотность и толщина взрывчатого вещества и метаемой пластины, соответственно.

Следует отметить, что при использовании взрывчатого вещества для метания пластин установленные выше параметры их соударения могут варьироваться в широких диапазонах, часть которых не всегда обеспечивает прочное соединение материалов. Впервые в работе Уитмана [18] были определены границы реализации процесса сварки взрывом в координатах кинема-

тических параметров соударения пластин (рисунок 1.3). Если положение левой границы (1) определяется значением критической скорости, соответствующей переходу к волновому течению металлов на границе стыка и зависящей от твердости и плотности свариваемых материалов, то существование правой границы (2) подтверждает тот факт, что при сверхзвуковых скоростях соударения струеобразование невозможно, а следовательно, сварки металлов не происходит. В тоже время, в диапазоне дозвуковых скоростей соударения струеобразование имеет место при любых углах соударения (γ).

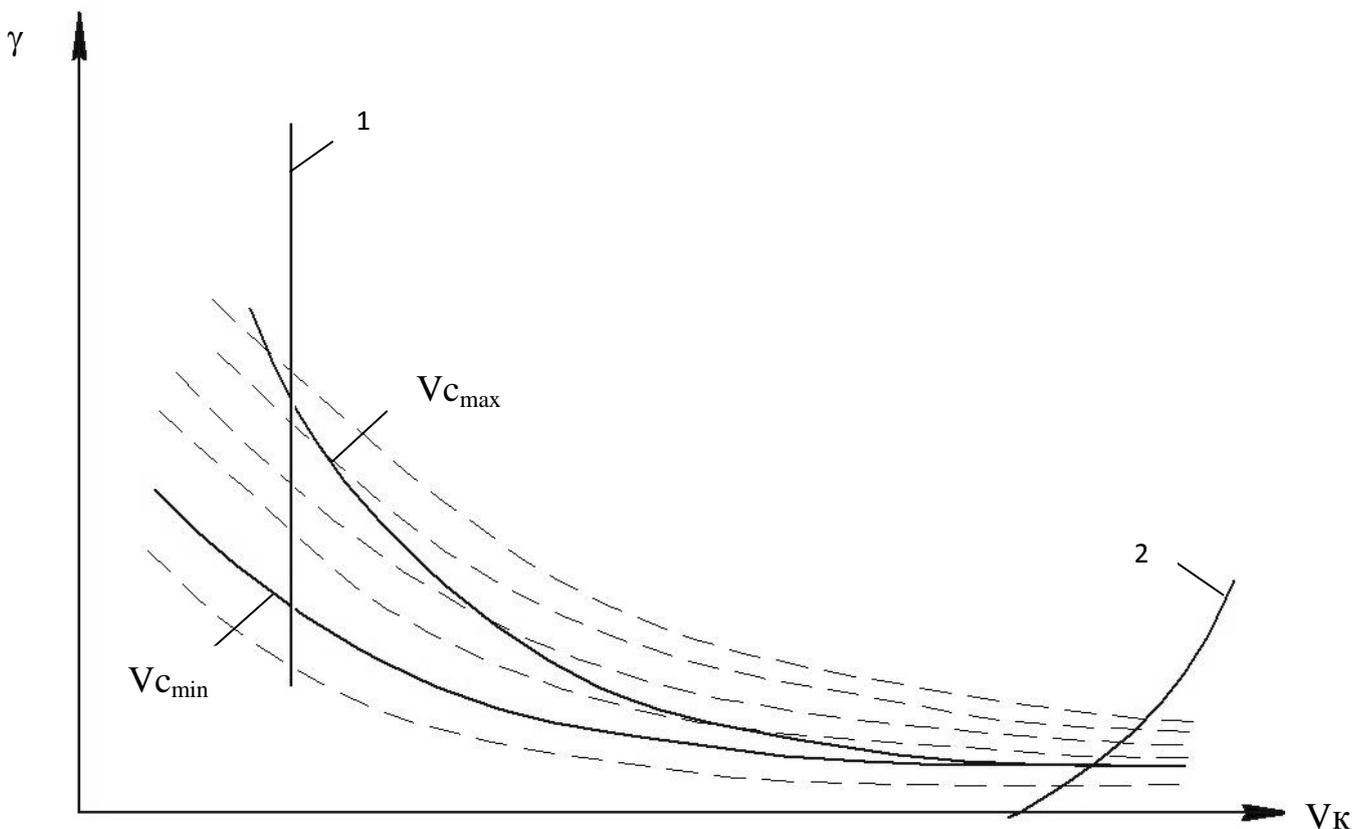


Рисунок 1.3 – Область сварки [18] в координатах кинематических параметров процесса: 1 – граница, определяемая скоростью ($V_k = V_{кр}$) перехода от безволнового характера течения материала к волновому; 2 – граница, рассчитываемая из критических условий струеобразования; $V_{c_{max}}$ – граница, рассчитываемая из условий застывания расплава к моменту снятия напряжения на границе раздела пластин; $V_{c_{min}}$ – граница, определяемая критическими давлениями, обеспечивающими развитие процессов течения и струеобразования на границе металлов

Анализ механизма формирования соединения при сварке взрывом свидетельствует о том, что верхняя граница в основном определяется теплофизическими свойствами метаемой пластины (температура плавления, теплоемкость, теплопроводность), ее толщиной, а также объемной скоростью звука [18].

Наличие нижней границы области сварки взрывом объясняется тем, что существуют критические значения углов соударения $\gamma = \gamma_{\text{крит}}$ и скоростей точки контакта $V = V_{\text{крит}}$, которые определяют формирование кумулятивной струи, а, следовательно, и создание потока частиц метаемой пластины впереди точки контакта.

Таким образом, формирование кумулятивной струи обеспечивает самоочистку поверхности метаемой пластины от различного рода окислов и загрязнений. Очистка же плакируемой пластины осуществляется за счет процессов трения при движении по ней частиц кумулятивной струи. Экспериментальное подтверждение данного механизма самоочистки свариваемых поверхностей было получено в работе [19] И.Д. Захаренко, когда свариваемые поверхности образцов предварительно подвергали тщательной зачистке шлифовальными шкурками вплоть до полной их полировки. После проведения ряда специальных процедур, исключающих возможность окисления свариваемых поверхностей, производилась оценка значения минимального угла соударения, обеспечивающего формирование сварного шва. Таким образом было установлено, что надежное соединение предварительно очищенных поверхностей достигалось на углах соударения $\gamma = 3^\circ$, тогда как минимальный угол в условиях самоочистки за счет кумулятивной струи составлял $5^\circ 20'$. Экспериментальные исследования сварных соединений [3, 4, 7, 8] показали, что характер течения материала на границе раздела может быть ламинарным, вихревым и турбулентным, что выражается в волнообразовании в зоне соединения.

Впервые попытка теоретического объяснения природы волнообразования была предпринята Абрахамсоном в 1961 г. [20]. В дальнейшем его мо-

дель получила развитие в работе Бахрани, Блэка, Кроссланда [9, 11]. Абрахамсон предположил, что при падении струи на поверхность в окрестности точки торможения возникает высокое давление, приводящее к деформации поверхности по обе стороны от точки торможения и как результат возникновения и рост бугра деформации впереди точки контакта. Авторы [11], принимая как факт образование бугра деформации в модели Абрахамсона, полагали, что в процессе своего роста бугор достигает поверхности падающей струи и захлопывает часть обратной (кумулятивной) струи, формируя «вихревой мешок». При этом точка торможения скачком «перепрыгивает» на вершину бугра, а далее процесс волнообразования продолжается.

Данное представление о механизме волнообразования получило название модели Бахрани-Кроссланда, схематичное отображение которой представлено на рисунке 1.4.

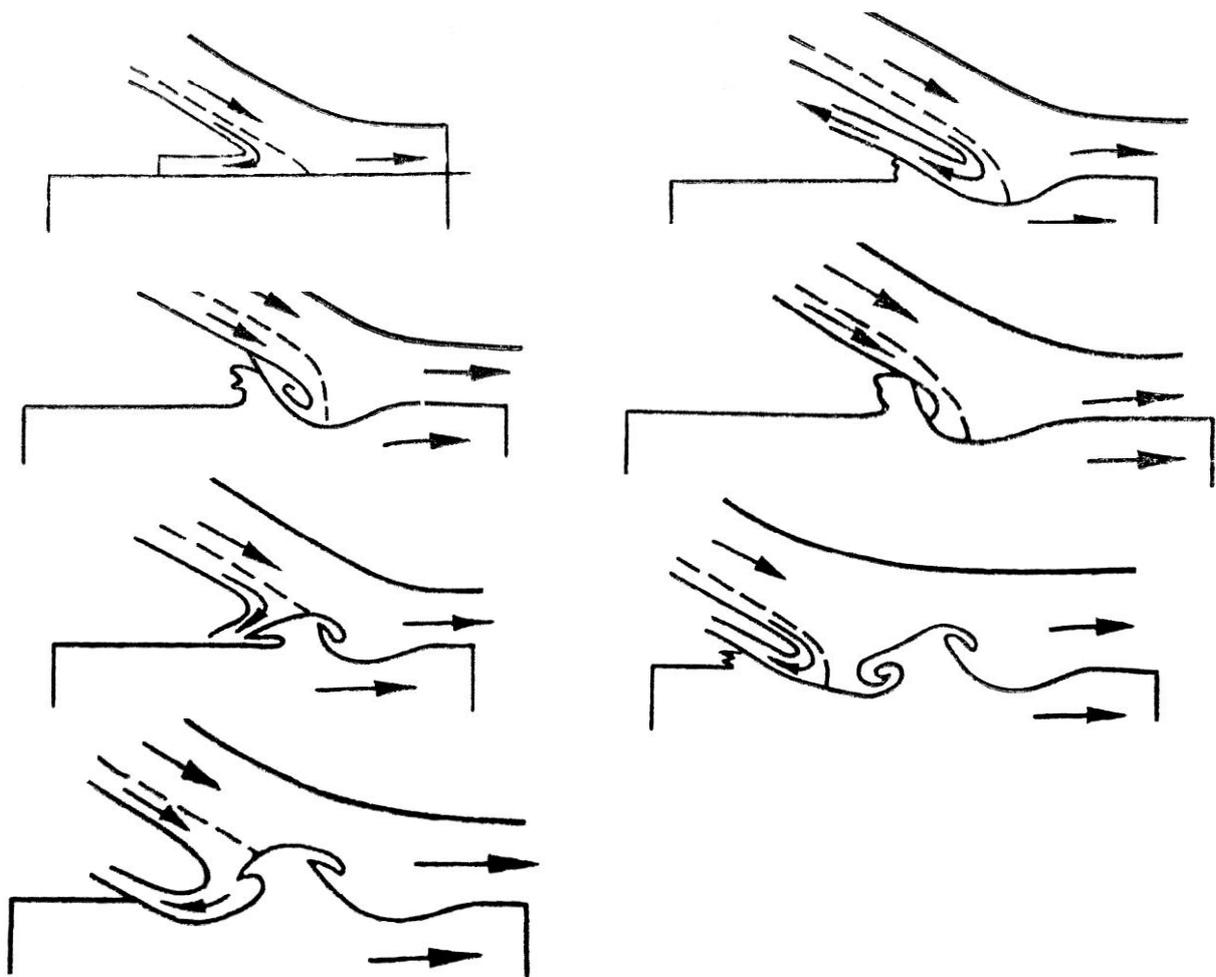


Рисунок 1.4 – Модель Бахрани – Кроссланда [3]

Таким образом, композиционные соединения разнородных металлов и сплавов, полученные сваркой взрывом, могут рассматриваться как конструкционные материалы для создания различного рода изделий, что требует поиска эффективных методов их резки.

1.2 Лазерная обработка

Возможности создания высокой концентрации энергии в локальном объеме пространства и оперативного управления изменением энергии во времени и ее перемещения в пространстве, присущие высококонцентрированным источникам энергии, таким как лазерные и электроннолучевые, открывают широкий спектр перспектив в области обработки материалов с новыми технологическими возможностями и высоким уровнем технико-экономических показателей.

Высокие технико-экономические показатели применения лазерной обработки в различных технологических процессах для разного рода материалов объясняется не только достоинствами высокой концентрации энергии как технологического инструмента, но и универсальностью и гибкостью лазерного луча.

Важным показателем для оценки уровня современного научно-технического прогресса в области металлообработки является доля лазерной техники в парке технологического оборудования в промышленной индустрии и темпы практического освоения лазерных технологий. Последнее наглядно иллюстрируется цифрами ежегодных продаж лазерного оборудования на мировом рынке. Так, за период с 1994 г. по 2000 г. объем продаж увеличился с 2,1 до 8,8 млрд. долларов [21].

Привлекательность технологических свойств лазерного луча, таких как гибкость, универсальность, безизносность, быстроедействие наряду с уникальностью свойств лазерного излучения – высокой монохроматичностью и когерентностью, малой расходимостью и высоким уровнем энергетических

показателей позволили создать перспективный вид технологического инструмента для ряда технологических операций: термообработки, сварки, резки, пайки, наплавки, модифицирования, легирования, маркирования, гравировки, прошивки, химико-термической, лазерно-плазменной, лазерно-электрохимической обработки и т.д.

Лазерное излучение относится к высококонцентрированным источникам энергии и характеризуется одним из самых высоких коэффициентов сосредоточенности источника [22], что обеспечивает наибольшее значение плотности мощности по сравнению с другими источниками тепловой энергии – газопламенным, дуговым, плазменным. В таблице 1.1 приведены значения коэффициента сосредоточенности и радиуса пучка для различных источников энергии.

Таблица 1.1 – Значения коэффициента сосредоточенности и радиуса пучка для различных источников [22]

№ п/п	Вид источника энергии	Коэффициент сосредоточенности, $K, 1/\text{см}^2$	Радиус пучка, $\Gamma_0, \text{см}$
1	Газовое пламя	$\sim 0,2 \cdot 10^0$	$\sim 2,0 \cdot 10^0$
2	Дуга неплавящегося электрода (вольфрам)	$\sim 1,0 \cdot 10^1$	$\sim 3,0 \cdot 10^{-1}$
3	Светолучевой	$\sim 1,0 \cdot 10^2$	$\sim 1,0 \cdot 10^{-1}$
4	Плазменная струя	$\sim 4,0 \cdot 10^4$	$\sim 5,0 \cdot 10^{-3}$
5	Электронный луч	$\sim 2,0 \cdot 10^6$	$\sim 8,0 \cdot 10^{-4}$
6	Лазерный луч (непрерывный)	$\sim 3,0 \cdot 10^6$	$\sim 6,0 \cdot 10^{-4}$

Высокое значение коэффициента сосредоточенности лазерного источника позволяет сконцентрировать в зоне обработки плотности мощности $>10^5$ Вт/см². Такой уровень энергии имеет принципиальное значение, обеспечивая развитие событий в зоне обработки по иному механизму формирования и кристаллизации жидкой фазы для таких операций, как термообработка, сварка, резка и т.д.

Достижение плотности мощности в зоне обработки $>10^5 - 10^6$ Вт/см² приводит к существенному изменению закономерностей взаимодействия потоков энергии с обрабатываемым веществом благодаря синергетическому характеру его нагрева [23, 24].

Высокие значения плотности мощности лазерного излучения позволяют перевести нагрев из режима теплопроводности в режим глубокого (кинжального) проплавления [25].

Механизм поглощения энергии лазерного излучения металлическими материалами хорошо описывается моделью свободных электронов (электронами проводимости), которые в основном и поглощают кванты света. Процесс поглощения скоротечен и занимает промежуток времени $10^{-11} - 10^{-10}$ с и развивается в тонком поверхностном слое толщиной 0,1-1 мкм, от которого распространение энергии передается в остальные объемы материала посредством следующих механизмов теплопроводности – электронной, фотонной, лучистой. Первый механизм теплопроводности является доминирующим в технологии лазерной обработки с нагревом в диапазоне температур от сотен до нескольких тысяч градусов [26].

Основными параметрами лазерного излучения, определяющими результат его взаимодействия с обрабатываемым материалом, являются плотность мощности, длительность воздействия, длина волны. Кроме этого важным моментом являются физические свойства обрабатываемого материала и микрогеометрическое состояние поверхности.

В зависимости от уровня плотности мощности (W_p) лазерного излучения различают следующие формы его взаимодействия с веществом [26]:

- при $W_p \approx 10^3 \div 10^4$ Вт/см² происходит нагрев материала без фазового перехода;
- при $W_p \approx 10^4$ Вт/см² происходит нагрев материала с фазовым переходом;
- при $W_p \approx 10^4 \div 10^5$ Вт/см² происходит плавление металла в режиме теплопроводности;
- при $W_p \approx 10^5 \div 10^6$ Вт/см² происходит плавление металла в режиме кинжального проплавления и интенсивное парообразование;
- при $W_p \approx 10^6 \div 5 \cdot 10^6$ Вт/см² происходит оптический пробой паров металла в электрическом поле мощного лазерного излучения с образованием низкотемпературной неравновесной плотной плазмы с температурой $T < 50 \cdot 10^3$ К;
- при $W_p \approx 5 \cdot 10^6 \div 10^8$ Вт/см² происходит лазерная эрозия, т.е. процесс интенсивного удаления металла из зоны лазерного воздействия в виде расплава и паровой фазы металла;
- $W_p \approx 10^9 \div 10^{12}$ Вт/см² формируются условия у поверхности металла, при которых происходит сублимация, т.е. испарение твердого вещества без образования жидкой фазы.

На рисунке 1.5 приведена диаграмма состояния обрабатываемой зоны металла в зависимости от плотности мощности и времени воздействия лазерного излучения [27].

Авторы [27] справедливо отмечают, что данная диаграмма отражает лишь оценочное значение параметров W_p и τ , так как процесс лазерной обработки во многом зависит и от других факторов – теплофизических свойств металла, шероховатости обрабатываемой поверхности, вида используемых технологических газов и других параметров обработки.

Из всего многообразия лазерных технологий, обусловленных спецификой лазерного излучения и универсальностью лазерного луча как инструмента, наибольшее применение в различных отраслях машиностроения получила

газолазерная резка металлических и неметаллических материалов. Наиболее эффективным оказалось ее использование в заготовительном производстве при обработке листовых заготовок на предприятиях единичного, мелко- и среднесерийного производства [28].

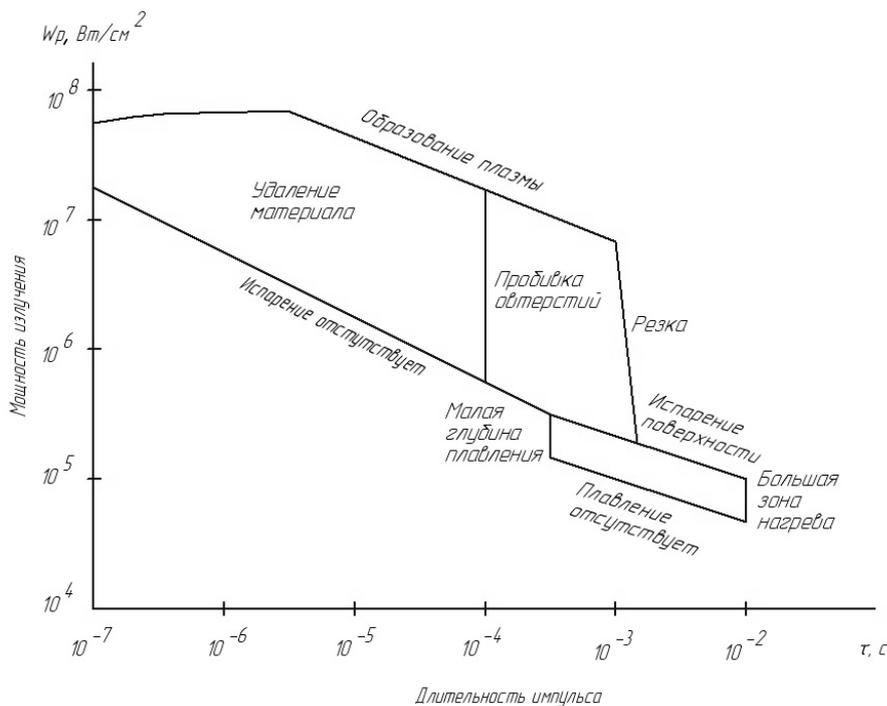


Рисунок 1.5 – Диаграмма состояния зоны обработки металлических материалов в зависимости от плотности мощности и времени воздействия лазерного излучения

Основными преимуществами лазерной резки являются [26]:

- повышение качества обработки за счет минимальных зон термического влияния, снижения тепловых деформаций, отсутствия силового воздействия инструмента на деталь;
- повышение скорости обработки в сравнении с традиционными методами механообработки в несколько раз;
- снижение в несколько раз времени на подготовку производства при освоении выпуска новой продукции;
- повышение коэффициента использования материала за счет внедрения автоматизированных систем оптимизации раскроя;

- качество реза конструкционных сталей позволяет во многих случаях производить сварку встык без предварительной механической обработки;
- отсутствие смещения кромок реза.

В целом внедрение технологии лазерного раскроя позволяет снизить затраты на подготовку производства, обеспечивая гибкость заготовительного производства. Точность обработки сложноконтурных деталей – от 100 до десятка микрометров.

Использование роботов со световолоконными лазерными системами позволяет производить обработку объемных деталей, например, элементов кузовов автомобилей без проектирования и изготовления специальной технологической оснастки.

Главными достоинствами лазерной резки металлических листов являются высокие показатели качества реза и хорошая производительность обработки. В свою очередь, скорость резки, как и толщина разрезаемого материала, зависят от мощности и качества лазерного пучка. В последнее время наблюдается создание лазерных комплексов для раскроя листовых материалов мощностью 5-6 кВт и более. В то же время известно, что требование одновременного повышения мощности и достижение высокого качества пучка находятся в противоречии [29], поскольку при увеличении мощности в резонаторе возбуждаются моды высших порядков, что неизбежно сказывается на качестве лазерного пучка. Если при мощности проточных CO₂-лазеров 3÷4 кВт коэффициент качества луча $K=0,6\div0,9$, то увеличение мощности до 5 кВт сопровождается снижением коэффициента K до 0,55, и далее при мощности 8÷12 кВт, коэффициент K уменьшается до 0,26 [26].

При уменьшении же коэффициента K возрастает диаметр сфокусированного пучка на поверхности обрабатываемого материала, что не позволяет эффективно использовать мощность лазерного излучения, и сопровождается увеличением ширины реза и снижением скорости резки.

Коэффициент K определяется отношением расходимости идеального пучка с гауссовским распределением энергии к реальной расходимости пуч-

ка. Для одномодового лазерного излучения с гауссовским распределением энергии по сечению при кривой поляризации пучок считается идеальным и $K=1$ [30].

Для оценки влияния отдельных параметров лазерного излучения на процесс резки следует воспользоваться известным выражением плотности мощности в зоне обработки [26]:

$$Wp = \frac{\pi P K^2}{4\lambda^2 (F/d)^2}, \quad (1.1)$$

где P – мощность лазерного излучения, Вт;

K – коэффициент качества лазерного пучка;

λ – длина волны лазерного излучения, мкм;

F – фокусное расстояние линзы, мм;

d – диаметр луча лазерного излучения, мм.

Анализ выражения (1.1) показывает, что чем выше качество пучка, тем при меньшем угле фокусировки может быть достигнута требуемая плотность мощности в фокальном пятне при одном и том же значении мощности излучения. А меньшим углам фокусировки соответствует большая длина фокальной области. С технологических позиций это позволяет формировать узкие каналы реза с параллельными стенками при лазерной резке даже толстолистовых материалов. Для качественной резки толстых листов использование малых углов фокусировки является единственным технологическим решением при лазерной резке в струе инертного газа. Это объясняется тем, что в зоне обработки единственным источником энергии является энергия лазерного излучения и для обеспечения необходимого уровня мощности в нижней части разрезаемого материала фокус луча заглубляется в материал. Заглубление фокуса может составлять половину толщины, а иногда и большую ее часть. В данных условиях малый угол фокусировки обеспечивает меньший диаметр на поверхности, и соответственно и меньшую ширину реза и лучшую геометрию канала. В таблице 1.2 приведены геометрические параметры реза и шероховатость поверхности углеродистой стали разной толщины [31].

Из результатов таблицы 1.2 следует, что ширина реза в самой узкой части канала (близкой к нижней кромке) близка к диаметру лазерного луча в перетяжке. Разброс ширины реза по длине канала тем больше, чем больше толщина листа.

Назначение основных параметров технологических режимов, таких как мощность излучения и скорость резания, определяется, с одной стороны достижением максимальной производительности, а с другой – обеспечением требуемой точности и качества реза.

Таблица 1.2 – Параметры резки углеродистой стали

Толщина, мм	Мощность, Вт	Скорость резки, м/мин	Ширина реза, мм			Шероховатость Rz, мкм	
			На верхней кромке	На половине толщины	На нижней кромке	На верхней кромке	На нижней кромке
10	4500	1,3	0,43	0,31	0,29	-	-
16	4500	0,32	0,61	0,45	0,33	31...42	37...42
20	4500	0,25	1,0	0,46	0,49	-	-

Важным параметром на операциях резки материалов является ширина реза, которая определяет не только точность размера вырезаемой детали, но и количество материала, уходящего в отход. Результаты экспериментальных исследований [27, 32] свидетельствуют об уменьшении ширины реза, как при увеличении скорости резания, так и при повышении мощности лазерного излучения.

Помимо геометрии реза, регламентируемым параметром операции резки является его микрогеометрия. Анализ фрактографического состояния поверхности после лазерной резки показывает, что микрогеометрия обработанной поверхности представляет собой совокупность своеобразных штрихов, не присущих традиционным методам механообработки, и связана с физическим механизмом взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемым материалом.

Авторами [33, 34] установлены зависимости шага штриха от скорости реза и выявлено наличие критического ее значения, вызывающее скачкообразное изменение шага штриха. Показан характер зависимости критической скорости от параметров резки, свидетельствующий о роли окислительных процессов в формировании штрихов. Авторами сформулирована гипотеза, согласно которой образование характерных для лазерной резки штрихов связано с распределением волны окисления железа. Наблюдаемый же скачок шага в зоне критических скоростей резания можно объяснить равенством скоростей движения луча и волны окисления. Глубина штриха, определяющая в итоге величину шероховатости, составляет не более $1/3$ от шага штриха [32].

Исследованию топографии поверхности реза посвящены работы [35, 36], в которых показано формирование шероховатости реза, которая представляет собой совокупность регулярно расположенных и определенным образом пространственно ориентированных неровностей (в данной работе именуемых бороздками) для различных групп металлических материалов: низкоуглеродистые, среднеуглеродистые и низколегированные стали; высокоуглеродистые, высоколегированные (в том числе и нержавеющие) стали; титан и его сплавы; цветные металлы (алюминий, медь). В работе для оценки эффективности и качества процесса предложено использовать комплексный параметр, представляющий собой отношение мощности излучения к скорости резки (P/V_p), либо отношение мощности излучения к глубине прорезания металла (P/h).

Помимо точности, геометрии реза и его качества важной характеристикой газолазерной резки является формирование зоны термического влияния (ЗТВ), в которой происходят изменения фазового и химического состава металла [37]. В таблице 1.3 [38] представлены режимы и результаты резки различных металлических материалов излучением непрерывного CO₂ – лазера с диаметром фокусировки 0,2 мм. Для уменьшения размеров ЗТВ на кромках реза и предотвращения чрезмерного перегрева материала детали, приводящего к термическим деформациям, а также к воспламенению металла, лазерную резку следует осуществлять с охлаждением зоны резания кольцевой струей воды [35].

Таблица 1.3 – Режимы и результаты резки различных металлических материалов излучением непрерывного CO₂ – лазера [38]

Материал	Толщина листа, мм	Мощность, Вт	Скорость резки, м/мин	Давление газа, МПа	Параметры резов		
					Ширина, мм	Глубина ЗТВ, мм	Шероховатость Rz, мкм
Углеродистая сталь	1,0	1000	6,0	0,15	0,41	0,08	-
	1,0	1000	8,0*	0,15	0,37	0,06	-
	3,3	1000	2,0	0,15	0,51	0,26	-
	5,2	1000	1,0	0,15	0,51	0,26	-
	5,2	1000	2,5	0,15	0,46	0,17	-
	10,0	1000	0,4	0,15	0,82	0,40	80,0
Нержавеющая сталь	2,0	1000	3,5	0,25	0,39	0,10	-
	2,0	1000	3,0	0,15	0,40	0,09	-
	5,0	1000	0,9	0,15	0,64	0,27	-

Титан	2,0	1000	2,2	0,15	0,34	-	-
	1,0	1000	2,3	0,15	0,34	0,24	16,4
	10,0	900	1,8	0,60	-	-	0,8
Алюминий	2,0	1000	0,2	0,15	0,38	-	-
	2,0	1000	0,5	0,15	0,34	-	-
	8,0	3000	0,6	-	0,5	-	-

1.3 Кислородная резка

Кислородная резка является одним из наиболее распространенных способов термической резки, основанных на удалении незначительных объемов металла в зоне обработки посредством химического и электрофизического воздействий. Кислородная резка предназначена для получения заготовок для последующего изготовления различного вида сварных конструкций из листовых материалов, проката, труб и других изделий [39 - 47].

Сущность физико-химических процессов при кислородной резке заключается в интенсивном окислении металла в зоне резки с последующим удалением жидкого оксида струей кислорода. Процесс разогрева металла подогревающим пламенем начинается с верхней кромки реза до температуры воспламенения металла в кислороде, которая составляет $T_{всп} = 1323-1473$ °К в зависимости от химического состава. В последующий момент времени в зону резки режущим соплом подается струя кислорода и происходит возгорание металла с образованием оксидов, что в свою очередь, приводит к выделению значительного количества теплоты в зоне реза, обеспечивающего нагрев металла до температуры плавления. В результате этого на верхней кромке образуется смесь расплава оксидов и расплава железа, которая под действием струи кислорода перемещается по боковой стенке реза и осуществляет нагрев нижележащих слоев металла с последующим их окислением, далее расплавлением металла до тех пор, пока рез не будет сформирован по всей толщине металла. Одновременно с этим начинается перемещение резака

в направлении реза с определенной скоростью. Резка выходит на квазистационарный режим, когда на лобовой поверхности реза по всей его толщине формируется непрерывно горящий слой металла.

Схематично процесс кислородной резки представлен на рисунке 1.6 [39].

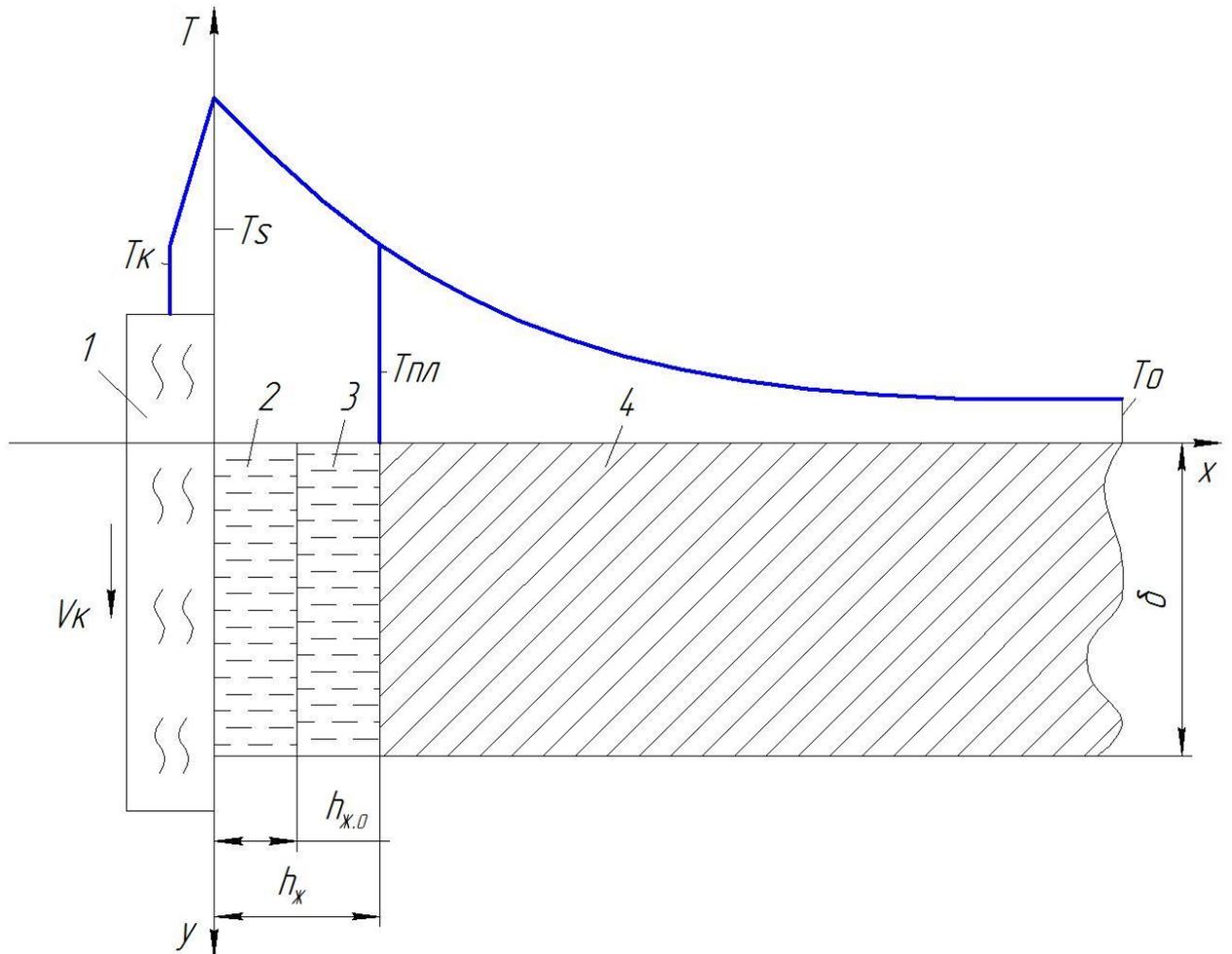


Рисунок 1.6 – Схема процесса кислородной резки: 1 - струя кислорода; 2 - жидкий оксид; 3 - расплавленный металл; 4 - твердый металл; T_k – температура струи кислорода; T_s – температура на поверхности оксидного слоя; $T_{пл}$ - температура плавления металла; T_0 – температура металла в исходном состоянии; b – толщина реза (листа); $h_{ж.о}$ – толщина слоя жидкого оксида; $h_{ж}$ - толщина жидкого слоя на лобовой поверхности реза; V_k – скорость струи кислорода

Таким образом, для стабильного развития и протекания процесса кислородной резки необходимо, чтобы:

- подогрев основного металла до температуры воспламенения;
- выделение продуктами горения необходимого количества теплоты для образования на поверхности реза слоя жидкого металла;
- достаточная вязкость жидкого расплава для его перемещения струей кислорода;
- осуществлялся непрерывный контакт струи кислорода и жидкого металла.

Отмеченные физические условия для процесса кислородной резки накладывают определенные требования к разрезаемому металлу. В первую очередь, для обеспечения начала кислородной резки необходимо, что температура воспламенения металла должна быть ниже температуры его плавления.

В противном случае, обрабатываемый металл начнет плавиться и выдуваться струей кислорода, что и определяет условие развития процесса резки по плавильному механизму, а это требует значительных энергетических затрат. Так, температура плавления железа составляет 1808°K , температура воспламенения 1323°K .

Далее, необходимо соблюдение условия соотношения температур плавления оксидов и самого обрабатываемого металла. Температура плавления оксидов должна быть ниже, в противном случае струя кислорода не сможет окислить расплавленный металл. Так, температура плавления оксида FeO составляет 1643°K против температуры плавления железа - 1808°K .

Следующее требование по тепловыделению в зоне обработки при образовании оксидов связано с тем, что малое количество теплоты не обеспечит прогрев лобовой поверхности реза до температуры плавления, что вызовет прерывание процесса резки. Аналогичный эффект будет наблюдаться при обработке металлов с высокой теплопроводностью. Примером может служить лучшая обрабатываемость титана по сравнению со сплавами железа,

вследствие значительного тепловыделения (до 906 МДж/моль) при горении титана и более низкой его теплопроводностью.

Существенное влияние на развитие процессов при кислородной резке оказывают различного рода легирующие элементы в составе железоуглеродистых сплавов, такие как, Mn, Ni, Ti, Al, Cr и др. Наличие примесей приводит к образованию в жидком расплаве тугоплавких окислов, уменьшающих его жидкотекучесть и препятствующих интенсивному теплообмену между расплавом и кислородом режущей струи.

Главным отличием между различными марками железоуглеродистых сплавов является процентное содержание углерода. Так, увеличение содержания углерода приводит к повышению температуры воспламенения металла и к снижению температуры его плавления. Несмотря на это, стали с содержанием углерода до 1% (а это практически весь диапазон низко, средне и высокоуглеродистых сталей) хорошо обрабатываются кислородной резкой. Дальнейшее повышение содержания углерода приводит к существенному ограничению в обработке, так, например, обычная кислородная резка чугунов невозможна. Кроме этого, повышение содержания углерода снижает вязкость жидкой фазы, что является благоприятным фактором для резки высокоуглеродистых сталей.

Следует иметь в виду, что содержание в составе той или иной комбинации различных примесей приводит при кислородной резке к образованию шлаков сложного химического состава, существенно влияющих на протекание процесса обработки.

Помимо рассмотренных факторов существенное влияние на процесс кислородной резки оказывают технологические факторы, связанные со струей режущего кислорода (параметры струи – давление, скорость истечения из сопла, расход газа, а также, степень чистоты самого кислорода). Так, повышение степени чистоты с 98,0 до 98,8% позволяет увеличить скорость резки до 35% [39, 48].

Принимая во внимание термический характер рассматриваемого процесса резки и высокий градиент температурного поля в зоне резки, следует ожидать образования закалочных структур на поверхности реза даже при обработке низкоуглеродистых сталей. Размер зоны термического влияния достигает значительных величин (до 55мм) при толщине разрезаемого материала 1000 мм.

Эффективность любой механической обработки, равно как термической резки, во многом определяется достигаемой точностью размеров и качеством поверхности, которые регламентируются ГОСТом 14792-80 [49], в соответствие с которым точность определяется значением размерного допуска, а качество – отклонением от перпендикулярности реза к поверхности листа и шероховатостью поверхности самого реза. Шероховатость в данном случае определяется как наибольшая высота неровностей на поверхности реза.

В зависимости от технологического назначения деталей после термической резки, стандартом установлены три класса точности:

- класс 1 – высшие требования к качеству реза;
- класс 2 – требования к качеству реза достигаются на обычных серийных машинах в производственных условиях;
- класс 3 – требования к качеству, достигаемые при максимальных показателях экономичности процесса резки.

Допустимые отклонения размеров от номинальных значений для различных классов представлены в таблице 1.4, а предельные отклонения поверхности реза от перпендикулярности и допустимые значения шероховатости – в таблице 1.5.

В таблице 1.6 приведены скорости фигурной машинной кислородной резки конструкционных сталей различных толщин для достижения 1 класса качества поверхности реза при чистоте режущего кислорода 99,5% [48].

Таблица 1.4 – Допустимые отклонения (мм) размеров от номинальных значений для различных классов точности по ГОСТ 14792-80

Класс точности	Толщина разрезаемого металла, мм	Номинальные размеры деталей, мм			
		менее 500	500...1500	1500...2500	2500...5000
1	5-30	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
	31-60	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
2	5-30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
	31-60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
3	5-30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
	31-60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0

Таблица 1.5 – Предельные отклонения поверхности от перпендикулярности и допустимые значения шероховатости при кислородной резке стали согласно ГОСТ 14792-80

Показатель качества	Толщина разрезаемого металла, мм	Класс точности		
		1	2	3
Отклонение от перпендикулярности, мм	5-12	0,2	0,5	1,0
	13-30	0,3	0,7	1,5
	31-60	0,4	1,0	2,0
Шероховатость, мм	5-12	0,05	0,08	0,16
	13-30	0,06	0,16	0,25
	31-60	0,07	0,25	0,50

Таблица 1.6 – Зависимость скорости резки от толщины разрезаемой стали

	Толщина разрезаемой стали, мм								
	3,0	5,0	8,0	10,0	15,0	20,0	30,0	40,0	50,0
Скорость резки, м/мин	0,55	0,50	0,45	0,40	0,38	0,35	0,32	0,30	0,25

Для определения значения скорости резки при необходимости достижения класса качества реза, отличного от первого, и при использовании режущего кислорода другой чистоты, в работе [48] предлагаются поправочные коэффициенты:

$$V_p = V_1 \cdot K_k \cdot K_{ч},$$

где:

V_p – рассчитываемая скорость резки, м/мин;

V_1 – скорость резки, соответствующая 1 классу качества и при использовании кислорода чистотой 99,5%;

K_k – коэффициент, определяемый классом качества;

$K_{ч}$ – коэффициент, определяемый чистотой кислорода.

Так, для 2 класса значения $K_k = 1,2$; для 3 класса $K_k = 1,4$.

Зависимость относительной скорости резки от чистоты режущего кислорода представлена в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Зависимость коэффициента скорости резки от чистоты кислорода

	Чистота кислорода, %					
	99,8	99,5	99,2	99,0	98,5	98,0
Коэффициент скорости резки, $K_{ч}$	1,19	1,00	0,92	0,90	0,84	0,74

1.4 Плазменно-дуговая резка

В последние десятилетия плазменно-дуговая резка получила широкое распространение и находится в одном ряду с кислородной резкой [50 - 56]. Оба способа являются разновидностями термической резки, но отличаются сущностью процессов, заложенных в основу обработок.

Низкотемпературная плазма представляет собой нагретый до температуры $5 \cdot 10^4$ ° К электропроводящий газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц – ионов [57]. Низкотемпературную плазму, как особое состояние вещества получают в столбе электрической дуги, которая создается в специальных устройствах – плазмотронах.

Существуют две основные схемы плазменно-дугового разряда – плазменно-дуговая струя и плазменная дуга. В первом случае независимая плазменная дуга возбуждается между независимыми электродами, а обрабатываемое изделие является электрически нейтральным. Во втором – имеет место дуга прямого действия, когда обрабатываемое изделие является одним из электродов.

Принимая во внимание факт, что дуговой разряд развивается в узких каналах источника (плазмотрона), становится очевидным, что при относительно небольших расходах плазмообразующих газов удастся получить значительные скорости потоков плазмы.

В отличие от кислородной резки, физическая сущность плазменно-дуговой резки заключается в расплавлении обрабатываемого материала потоком низкотемпературной плазмы в узком канале реза и последующем выдувании расплава потоком.

Основными технологическими параметрами рассматриваемой обработки является мощность дуги (и в первую очередь – напряжение), определяющая предельные возможности по толщине реза. Сила тока назначается из условий, обеспечивающих требуемый уровень мощности дуги, при которой интенсивность расплавления металла в канале реза соответствовала бы задан-

ной скорости реза. Реализуемая плотность мощности в пятне нагрева плазменной дугой составляет 10^8-10^9 Вт/см², что на порядок превышает мощность плазменной струи. При этом тепловой КПД в первом случае достигает 70-80 %, при 50-60 % - во втором.

Для понимания физики процесса плазменно-дуговой резки целесообразно рассмотреть схематичное изображение взаимодействия плазменно-дугового разряда с обрабатываемым материалом (рисунок 1.7) [39]. Из схемы, видно, что формирование реза в обрабатываемом металле осуществляется тремя различными участками плазменной дуги: столбом (I_1), анодным пятном (I_2) и факелом (I_3). Эффективность нагрева на отмеченных участках различна, что и определяет форму фронта продвижения реза при обработке.

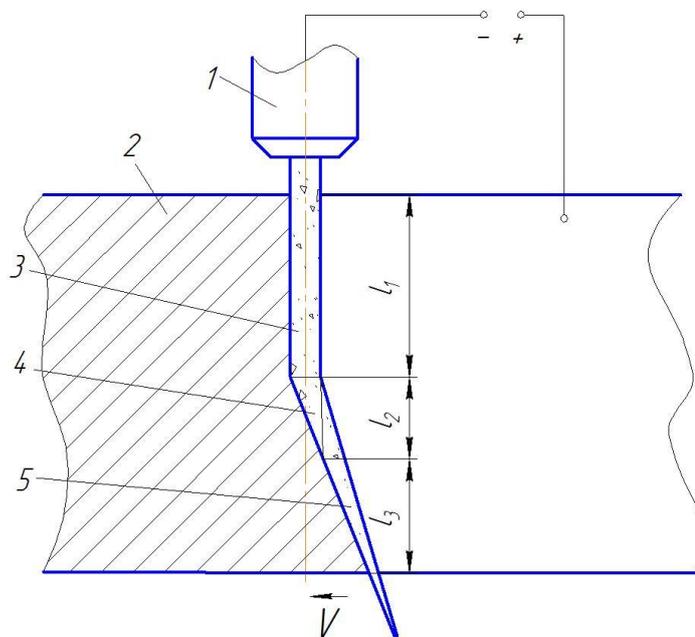


Рисунок 1.7 – Схема плазменно-дуговой резки: 1 – плазмотрон; 2 - обрабатываемый металл; 3 – столб дугового разряда; 4 – анодное пятно; 5 – факел дуги; l_1 – протяженность столба дуги; l_2 – протяженность анодного пятна; l_3 – протяженность факела; V – направление резки

Ширина и форма реза определяются как режимами процесса, так и параметрами элементов плазмотрона, формирующих геометрию столба дуги. Если управление режимами осуществляется напряжением, током, скоростью резки, составом и параметрами плазмообразующих газов, то геометрия стол-

ба в значительной мере зависит от размеров и геометрии режущего сопла. При оптимальных режимах резки и относительно небольшой толщине металла рез формируется с относительно параллельными кромками.

Однако, физика процесса, характеризуемая наличием трех участков теплового источника с разной эффективной мощностью, обуславливает формирование при плазменно-дуговой резке большей конусности по сравнению с кислородной резкой.

Главным технологическим параметром плазменно-дуговой резки является скорость, связанная с энергетическими параметрами плазменной дуги, выбор которых, в свою очередь, определяется как теплофизическими свойствами разрезаемого материала, так и его толщиной. Зависимость скорости резки от отмеченных характеристик определяется выражением [39]:

$$V = \frac{0,24IU\eta - q}{\rho t b \Delta s}, \quad (1.2)$$

где:

V – скорость плазменно-дуговой резки, м/час;

I – сила тока дуги, А;

U – напряжение на дуге, В;

η – эффективный КПД дуги;

q – интенсивность теплоотдачи в металл, Вт;

ρ – плотность металла, кг/м³;

t – ширина реза, мм;

b – толщина разрезаемого металла, мм;

Δs – приращение удельной энтальпии металла, Дж/кг.

Анализ зависимости (1.2) показал, что при прочих равных условиях скорость реза определяется мощностью дуги за счет изменения как напряжения, так и тока. При этом следует учитывать, что напряжение дуги определяет глубину ее проникновения в металл, из чего следует, что при увеличении толщины разрезаемого металла, следует повышать напряжение дуги. Рост тока дуги при постоянном напряжении ведет к увеличению ширины реза.

Влияние теплофизических свойств материала сказывается на скорости реза следующим образом. Более легкие металлы с меньшими значениями теплоемкости и теплопроводности допускают применение больших скоростей обработки.

В тоже время, необходимым условием по уравнению (1.2) для осуществления процесса резки как таковой является соблюдение неравенства, определяющего превышение мощности режущей дуги над количеством теплоты, необходимым для плавления, передаваемого в металл, в следующем виде:

$$0,24IU\eta > q \quad (1.3).$$

Данное соотношение является необходимым условием для полного прорезания металла заданной толщины. При этом, кроме энергетических явлений при плазменно-дуговой резке необходимо учитывать и правильное развитие гидродинамических процессов в зоне резки, определяющих условие удаления расплавленного металла и в значительной мере влияющих на качество реза.

Практика плазменно-дуговой резки показывает, что характерным условием правильного назначения скорости является направление потока шлака, так называемого «хвоста», вытекающего из реза. При оптимальной, с точки зрения качества реза, скорости, направление потока отличается от нормального по отношению к поверхности листа и направлено под небольшим углом (5-10°) в сторону, обратную направлению резки. Уменьшение скорости от оптимальной, приводит к расширению реза и повышенному скоплению легко удаляемого шлака на нижней кромке реза. Повышение же скорости от оптимальной приводит к появлению сначала на нижней кромке трудно отделяемых капель расплавленного металла, а затем к образованию непрореза с формированием перемычек в нижней части металла с выбросом расплавленного металла вверх.

Как и для всех методов термической резки, качество плазменно-дуговой в соответствии с ГОСТ 14792-80, регламентируется следующими показателями: размерным допуском, неперпендикулярностью поверхности

реза, ее шероховатостью и глубиной зоны термического влияния. Допустимые отклонения размеров деталей от номинальных значений для различных классов точности были представлены в таблице 1.4, а предельные нормативные отклонения поверхности реза от перпендикулярности и допустимые значения шероховатости и глубины зоны термического влияния для различных классов качества приведены в таблицах 1.8, 1.9.

Таблица 1.8 – Допустимые нормативные отклонения (мм) поверхности реза от перпендикулярности по ГОСТ 14792 -80

Класс качества	Толщина металла, мм		
	5-12	13-30	31-60
1	0,4	0,5	0,7
2	1,0	1,2	1,6
3	2,3	3,0	4,0

Таблица 1.9 – Допустимые значения шероховатости поверхности реза и глубины зоны термического влияния по ГОСТ 14792-80

Класс качества	Нормы шероховатости, мм, при толщине металла, мм			Нормы глубины ЗТВ, мм, при толщине металла, мм		
	5-12	13-30	31-60	5-12	13-30	31-60
1	0,05	0,06	0,07	0,1	0,2	0,4
2	0,1	0,2	0,32	0,4	0,8	1,6
3	0,2	0,32	0,63	0,8	1,6	3,2

Сравнение достижимых показателей по точности и качеству кислородной и плазменно-дуговой резки показывает на их идентичность, за исключе-

нием показателя перпендикулярности поверхности реза. По этому показателю плазменно-дуговая резка (таблица 1.8) уступает кислородной резке (таблица 1.5), что объясняется разной физикой процесса формирования реза в обоих случаях.

Важным для плазменно-дугового способа резки является плазмообразующая среда, в качестве которой используются технические газы, которые по своему воздействию на катод подразделяются на неактивные (азот, аргон, водород) и активные (воздух и кислород). К плазмообразующим газам предъявляются следующие требования:

- обеспечение стабильного горения дуги;
- эффективное преобразование электрической энергии в тепловую;
- равномерная передача энергии по толщине реза;
- отсутствие негативного воздействия, как на электрод, так и на обрабатываемый материал.

Использование инертных газов в качестве плазмообразующих обеспечивает хорошую ионизацию в столбе дугового разряда, хорошо защищает вольфрамовый электрод плазмотрона, не оказывает неблагоприятного воздействия на поверхность реза. Однако высокая стоимость инертных газов и невозможность их деионизации в столбе дугового разряда сдерживает их широкое применение в данной технологии. Поэтому для повышения производительности плазменно-дуговой резки и увеличения диапазона обрабатываемых материалов по толщине в качестве добавок к аргону используют двух-трех атомные газы, являющиеся активными теплоносителями. Аргонородные смеси широко используют при резке таких металлов как магниевые и алюминиевые сплавы.

Плазменно-дуговая резка с применением сжатого воздуха как плазмообразующего газа рекомендуется для конструкционных и высоколегированных сталей. Для повышения производительности в данном случае рекомендуется использовать сжатый воздух с повышенным содержанием кислорода,

либо чистый кислород. Однако при этом необходимо обеспечить защиту электрода инертным газом.

Алюминиевые сплавы также рекомендуют резать с использованием азото-водородных смесей. При пониженных требованиях к качеству реза алюминиевые сплавы толщиной 5...20 мм допускается резать в среде воздуха или азота. Особо точные и качественные резы получаются на аргоно-водородных смесях. Рекомендуемые технологические режимы плазменно-дуговой резки алюминиевых сплавов представлены в таблице 1.10 [39].

Таблица 1.10 – Технологические режимы плазменно-дуговой резки алюминиевых сплавов

Толщина разрезае- мого ме- талла, мм	Диа- метр сопла, мм	Рабо- чий ток, А	Напряже- ние на ду- ге, В	Расход плазмообразую- щего газа, м ³ /ч				Ско- рость резки, м/мин
				ар- гон	азо т	водо- род	воз- дух	
10	5	450	85	-	5,0	-	-	6,0
30	5	450	90	-	1,5	1,0	-	1,0
80	5	450	110	-	1,5	1,0	-	0,5
200	7	700	165	0,4	-	4,0	1,0	0,18

Для резки конструкционных сталей в качестве плазмообразующих газов используется воздух или смеси с повышенным содержанием кислорода (до 50%). Режимы воздушно-плазменной резки конструкционных сталей представлены в таблице 1.11 [39].

Для резки высоколегированных сталей применяются те же технологические режимы, как и для низкоуглеродистых сталей, а в качестве плазмообразующих газов помимо воздуха используют смеси азота и кислорода.

Технологический режим по скорости реза для медных сплавов занижен по сравнению со сталями, что связано с более высокими значениями тепло-

емкости и теплопроводности. В качестве плазмообразующих газов в этом случае используется азот либо его смеси с водородом.

Таблица 1.11 – Режимы воздушно-плазменной резки низкоуглеродистых сталей

Толщина разрезаемого металла, мм	Рабочий ток, А	Диаметр сопла, мм	Расход воздуха, м ³ /ч	Скорость резки, м/мин
10	200	3,0	6,0	2,0
10	300	3,0	6,0	3,2
20	200	3,0	6,0	0,83
20	300	3,0	6,0	1,57
30	300	3,0	6,0	0,90
30	400	3,0	6,0	1,50
50	400	4,0	8,0	0,48
70	400	4,0	8,0	0,24
100	400	4,0	8,0	0,08
130	450	4,0	8,0	0,03

Анализ технических характеристик и технологических возможностей плазменно-дуговой резки показал, что данный способ предназначен в основном для резки листовых материалов от 10 мм и выше (таблицы 1.10, 1.11). Нецелесообразность использования данной технологии для малых толщин металлов (до 10 мм) объясняется техническими особенностями процесса. Так, диаметр сопла, определяющий ширину реза, сопоставим и даже превосходит толщину разрезаемого материала, что при используемых значениях тока (200-700 А) не обеспечивает достаточной концентрации энергии в зоне реза и не позволяет получить высокое качество и точность реза при значительной зоне термического влияния. Таким образом, плазменно-дуговая резка в рассмотренном выше исполнении может рассматриваться как предваритель-

ная резка листовых материалов, требующая дополнительной механической обработки.

Совершенствование технологии плазменно-дуговой резки, направленное на повышение эффективности процесса как с позиций обеспечения высоких показателей точности и качества обработки, так и достижения максимальной производительности при резке широкой номенклатуры металлов и сплавов, позволило разработать эффективную технологию и оборудование тонкоструйной плазменной резки [58 - 68]. Достижение повышенных показателей точности и качества реза в сочетании с высокой производительностью процесса позволяет рассматривать тонкоструйную плазменную резку как инновационную технологию в заготовительном производстве [61, 63].

В работах [58 – 60, 67, 68] представлены результаты по изучению тонкоструйной плазменной резки с позиций оценки точности и качества реза конструкционных сталей. Анализу причин погрешностей формообразования и поиску путей их устранения посвящены исследования авторов [62 - 65].

Моделирование процессов формообразования при обработке криволинейных контуров с использованием данной технологии позволило расширить ее технологические возможности [64, 66].

Возможность получения узкого реза с высокой точностью при использовании данной технологии раскроя, с одной стороны, определяется тонкоструйным характером истечения потока плазмы с высокой концентрацией энергии, а с другой, в значительной мере зависит от состояния расходных элементов плазмотрона и, в первую очередь, катода и сопла. В работах [69 - 71] представлены результаты по влиянию износа расходных элементов на точность и качество реза и предложены пути по увеличению срока их службы.

Отличительной особенностью данной технологии является сочетание высокой производительности процесса резки, присущей плазменно-дуговому способу, с достижением показателей точности и качества реза, характерных лазерной обработке. Данный факт позволяет рассматривать тонкоструйную

плазменную резку как альтернативу лазерной обработке для резки листовых металлических материалов толщиной до 10 мм [72].

Эффективность использования тонкоструйной плазменной резки становится тем выше, чем ближе находится толщина реза к верхней границе. Это связано с тем, что КПД лазерной обработки существенно ниже, чем у плазменных технологий. Высокий КПД (70-80%) тонкоструйной плазмы объясняется степенью концентрации энергии в плазменной дуге, температура которой достигает значений от 5000 до 30000 °С [57, 73]. Для понимания физических основ тонкоструйной плазменной резки необходимо изучение, как самого процесса формирования плазменной дуги, так и ее взаимодействия с обрабатываемым материалом. Конструктивная схема элементов плазмоторона для тонкоструйной плазменной резки представлена на рисунке 1.8.

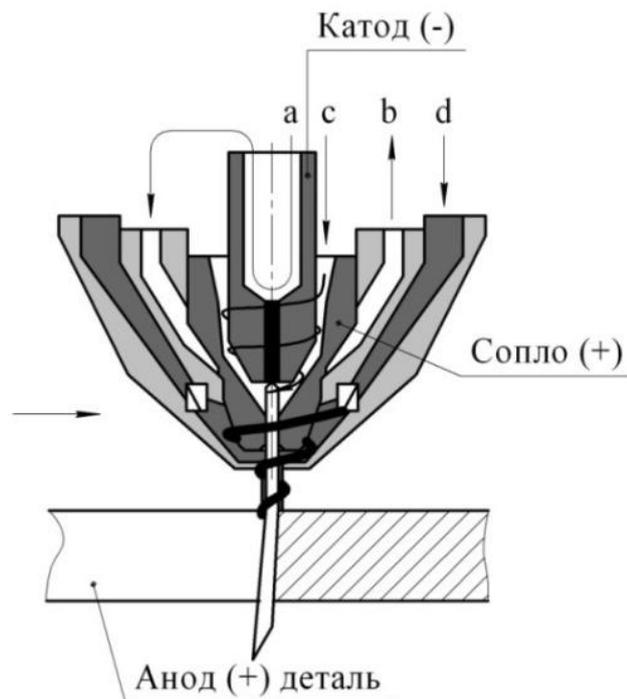


Рисунок 1.8 – Конструктивная схема формирования тонкоструйной плазмы:
 а, b – каналы охлаждения катода и сопла; с – канал плазмообразующего газа;
 d – канал завихряющего газа

Для создания режущей дуги между катодом плазмоторона и деталью (анодом) предварительно зажигается пилотная дуга между катодом и соплом,

которая и приводит к частичной ионизации плазмообразующего газа, подаваемого в канал 3 плазмотрона. Ионизированный газ, будучи электропроводным, на выходе из сопла плазмотрона замыкает электрическую цепь «катод – деталь», зажигая режущую дугу, которая и является источником тепловой энергии для разделения материала детали. В то же время не вся дуга на своем протяжении участвует в процессе обработки.

Авторы работы [74] выделяют характерные участки в столбе плазменной дуги (рисунок 1.9).

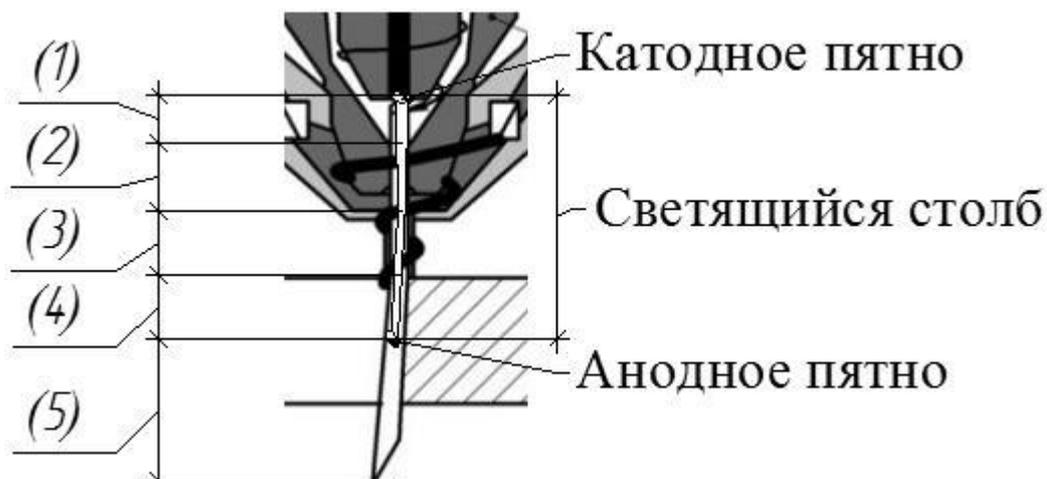


Рисунок 1.9 – Характерные участки столба плазменной дуги

Так, участок (1), имеющий название «закрытый столб», находится между катодным пятном и верхним срезом канала сопла. Данному участку характерно относительно спокойное течение плазмообразующего газа. Следующий участок (2) столба дуги подвержен сжатию охлаждаемыми стенками сопла. Далее от нижнего среза сопла вплоть до поверхности обрабатываемой детали расположен участок (3), который в отличие от предыдущего находится в открытом пространстве. При этом его стабилизация и направление обеспечивается соосным потоком плазмы и оболочкой холодного неионизированного плазмообразующего газа, а также потоком завихряющего газа. Дополнительное воздействие на дугу завихряющего газа обеспечивает дополнительное ее сжатие и стабилизацию. Сжатие дуги, уменьшая поперечное сечение столба, обеспечивает повышение плотности мощности. С технологиче-

ских позиций стабилизация дуги улучшает качество реза, уменьшает граतोобразование на нижней кромке реза, повышает точность формы реза за счет уменьшения оплавления на верхних кромках. Введение сжатия и стабилизации дуги завихряющим газом и является отличительным моментом в технологии тонкоструйной плазменной резки. Так, при использовании традиционных технологий плазменно-дуговой резки ширина реза достигает 5 мм при толщине реза 10 мм [74], а при использовании тонкоструйной плазменной резки – 1,8 мм [75].

Следующий участок (4) в столбе плазменной дуги, расположенный от поверхности реза вплоть до анодного пятна, непосредственно участвует в разделении обрабатываемого материала, продукты которого в расплавленном состоянии выносятся из зоны реза плазменной струей (участок 5).

Если элементы 1,2,3 столба плазменной дуги являются участками, на которых происходит ее формирование, то участки 4,5 обеспечивают формирование канала реза в обрабатываемом материале.

Разная природа воздействия на обрабатываемый материал лазерного луча и плазменной дуги накладывает определенные ограничения на лазерную обработку материалов с высокой отражательной способностью. В этих случаях прибегают к дополнительным приемам по снижению отражательной способности подобного класса материалов за счет нанесения на поверхность различного рода поглощающих световое излучение покрытий.

Однако данное решение оказывается не приемлемым при резке слоистых композиций, когда одна из составляющих с высокой отражательной способностью находится внутри композиции. Так, рисунок 1.10 иллюстрирует результат лазерной резки композиции сталь + медь при наложении лазерного излучения со стороны стали.

Технология и режимы лазерной резки соответствовали раскрою стали, о рациональности которых свидетельствует формирование канала реза в верхней части композиции, которое может быть описано процессами поглощения лазерного излучения обрабатываемым материалом, его нагревом

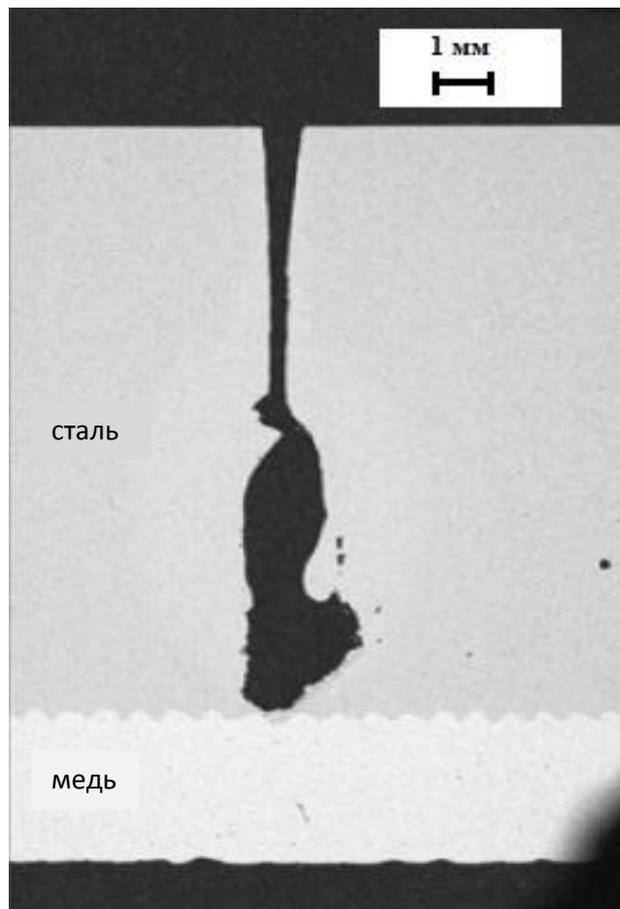


Рисунок 1.10 – Результат лазерной резки слоистой композиции «сталь + медь», полученной сваркой взрывом

вплоть до температур плавления и испарения с последующим удалением продуктов расплава из зоны реза. По мере продвижения лазерного луча вглубь композиции характер процесса резко меняется на границе двух металлов. В силу высокой отражающей способности меди на данном этапе обработки происходит практически полное отражение световой энергии от границы раздела. Факт полного отражения лазерного луча подтверждается расширением канала реза в нижней части стальной составляющей, примыкающей к границе раздела, и отсутствием практически какого-либо результата в формировании канала реза в меди.

Анализ возможных механизмов по устранению данных проблем при раскрое подобного рода композиций материалов с помощью лазерного луча показал на отсутствие известных в практике лазерного раскроя технических и технологических решений.

Очевидно, что для реза данных материалов необходимо задействовать технологические методы, основанные на иных физических процессах взаимодействия подводимой энергии и обрабатываемого материала [76]. Учитывая специфику тонкоструйной плазменной резки как аналога лазерной обработки по обеспечению высокой точности и качества реза, предполагается целесообразным ее использование как технологического метода обработки слоистых композиций, выполненных из различного рода листовых металлических материалов.

Анализ возможных технологий термической резки металлических материалов – кислородной, тонкоструйной плазменной и лазерной показывает, что каждая из них обладает определенными преимуществами и недостатками с позиций точности, качества реза и производительности процесса. В целом можно согласиться со сравнительной оценкой рассматриваемых технологий, предложенной одним из ведущих производителей оборудования для термической резки фирмой HYPERTHERM (США). Сравнение представлено по оценкам качества резки, производительности, эксплуатационных затрат и технического обслуживания компонентов оборудования (таблица 1. 12) [77].

Таблица 1.12 – Сравнительная оценка технологий термической резки

	Кислородная резка	Тонкоструйная плазменная резка	Лазерная резка
Качество резки	<ul style="list-style-type: none"> •Хорошая угловатость •Большая зона термического влияния •Количество окалины требует обработки •Не эффективна для нержавеющей стали и алюминия 	<ul style="list-style-type: none"> •Отличная угловатость •Маленькая зона термического влияния •Практически без образования окалины •Резка мелких деталей с качеством от хорошего до отличного 	<ul style="list-style-type: none"> •Отличная угловатость •Маленькая зона термического влияния •Практически без образования окалины •Резка мелких деталей с качеством от хорошего до отличного при самом узком разрезе
Производительность	<ul style="list-style-type: none"> •Низкие скорости резки •Время предварительного нагрева увеличивает время прожига 	<ul style="list-style-type: none"> •Очень высокие скорости резки для любой толщины материала •Очень короткое время прожига •Резаки с возможностью быстрого отключения обеспечивают максимальную производительность 	<ul style="list-style-type: none"> •Очень быстро для тонких материалов (тоньше 6 мм); медленнее для более толстых материалов •Длительное время прожига для толстых материалов

Эксплуатационные затраты	<ul style="list-style-type: none"> Низкая производительность и необходимость во вторичной обработке повышают затраты на единицу продукции, делая их выше, чем у плазменной резки 	<ul style="list-style-type: none"> Длительный срок службы расходных материалов и отличное качество резки снижают затраты на единицу продукции, делая их ниже, чем при использовании других технологий 	<ul style="list-style-type: none"> Высокие затраты на единицу продукции в связи с высокими энергозатратами, потреблением газов, высокими затратами на техническое обслуживание и относительно низкими скоростями резки при обработке толстых материалов
Техническое обслуживание	<ul style="list-style-type: none"> Простые требования к техническому обслуживанию зачастую позволяют выполнять обслуживание силами собственных специалистов 	<ul style="list-style-type: none"> Умеренные требования к техническому обслуживанию: обслуживание многих компонентов можно выполнять силами собственных специалистов 	<ul style="list-style-type: none"> Сложные задачи по техническому обслуживанию, для выполнения которых нужны специализированные технические специалисты

На основании опыта эксплуатации данных технологий можно выделить области их рационального применения с позиций обрабатываемого материала, его толщины и масштаба промышленного производства. Схематично сравнение конкурирующих технологий представлено на рисунке 1.11.

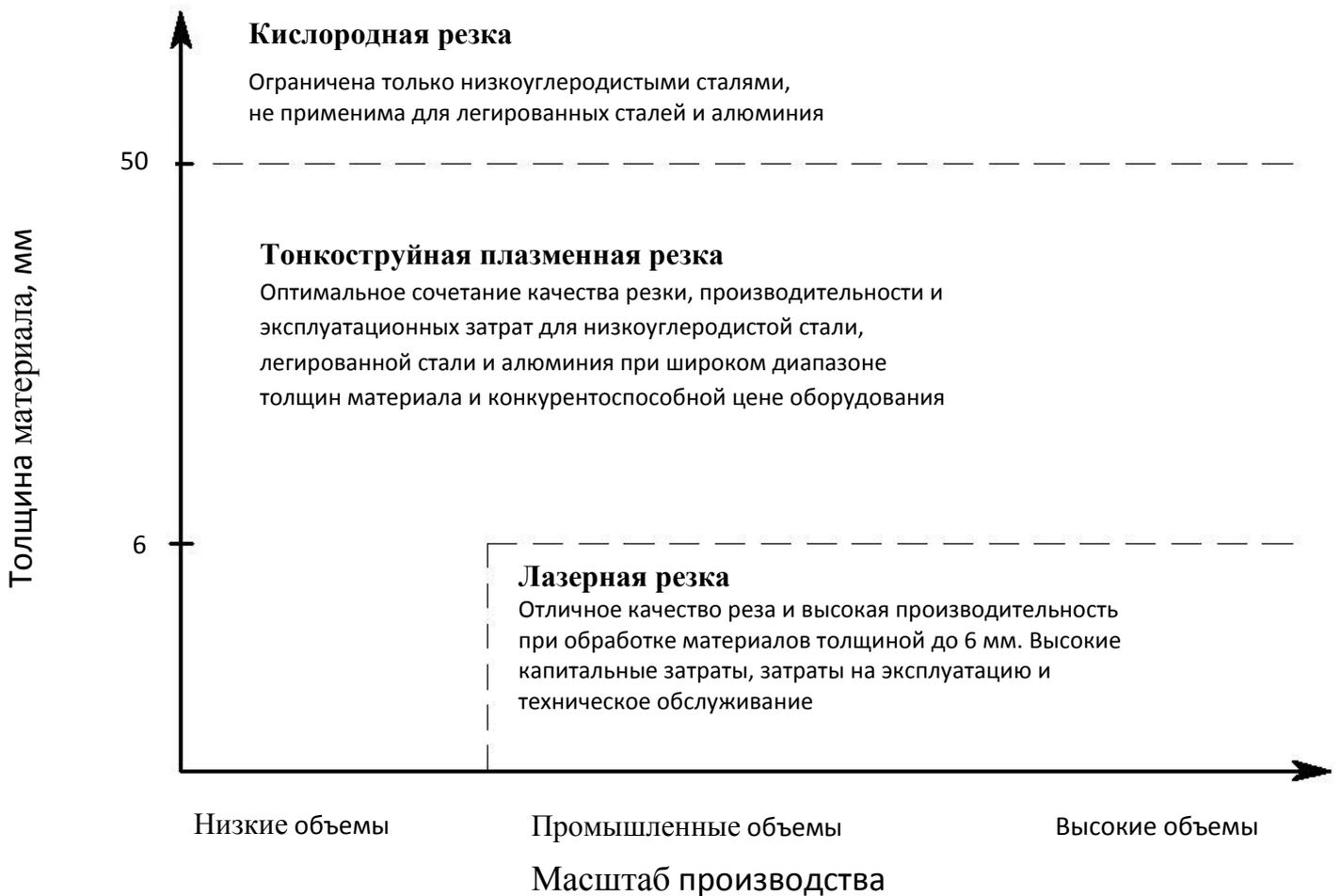


Рисунок 1.11 – Сравнение технологий термической резки материалов

Данные сравнительные оценки применимы только для резки мономатериалов, но не приемлемы для поиска решений в обработке слоистых композиций, выполненных из разнородных металлов и сплавов.

1.5 Выводы

Как показал аналитический обзор, среди современных методов создания композиционных материалов наибольшей привлекательностью обладает сварка взрывом, обеспечивающая надежное соединение металлов и сплавов, резко различающихся не только по химическому составу, но и по механическим и физическим свойствам. Возможность плакирования одного материала другим позволяет создавать композиции исходя из требуемых условий эксплуатации конкретного изделия.

Наряду с приобретением новых качеств у создаваемой сваркой взрывом слоистой композиции возникают проблемы в обработке подобного класса материалов. Исходя из физических основ создания сварных соединений при помощи взрыва, технологические схемы, основанные на них, позволяют получать заготовки в основном в виде листовых материалов, реже цилиндрических оболочек.

Проблема получения изделий из слоистых композиционных материалов проявляется уже на стадии заготовительного производства, на этапе разделительных операций листового материала.

Изучение современных методов резки материалов показало перспективность применения технологий, основанных на электрофизических, в частности термических, процессах разрушения материала. Анализ таких технологических методов как лазерная обработка, кислородная резка, плазменно-дуговая резка с позиций точности, качества реза, производительности и экономичности обработки показал, что наиболее привлекательной для обработки рассматриваемого класса материалов является плазменно-дуговая, реали-

зованная в наиболее современной технологии – тонкоструйной плазменной резке.

В связи с этим необходимость исследований, направленных на расширение технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки для раскроя биметаллических композиций, является актуальной задачей.

1.6 Цель и задачи исследования

В связи с выше изложенным была сформулирована цель диссертационной работы, заключающаяся в расширении технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки в части обработки слоистых биметаллических композиций, выполненных из разнородных материалов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выбор метода получения слоистых материалов и анализ существующих технологий разделительной резки.
2. Назначение технологических схем и оптимизация режимных параметров тонкоструйной плазменной резки модельных материалов, составляющих исследуемые биметаллические композиции с оценкой точности и качества реза.
3. Проведение экспериментальных исследований раскроя биметаллических композиций для выбора рациональных технологических схем тонкоструйной плазменной резки с оптимизацией режимных параметров по критериям точности и качества реза.
4. Изучение процессов, протекающих в канале реза для различных схем плазменного раскроя исследуемых сварных биметаллических композиций, на основе структурных исследований.
5. Разработка технологических рекомендаций по выбору технологических схем тонкоструйной плазменной резки и назначению режимных параметров для раскроя биметаллических композиций.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящий раздел работы в соответствии со сформулированной целью и поставленными для ее достижения задачами посвящен выбору исходных материалов для создания биметаллических композиций сваркой взрывом, а также методик и аналитического и технологического оборудования для проведения экспериментальных исследований.

2.1 Исходные материалы для получения биметаллических композиций

В настоящих исследованиях в качестве исходных металлических материалов для получения биметаллических соединений сваркой взрывом были выбраны медь, алюминий, нержавеющая сталь. Основой для плакирования отмеченными выше материалами служила низкоуглеродистая сталь Ст3, что объясняется широким ее распространением как дешевого конструкционного материала. Создание же на основе стали плакированного слоя из определенного материала направлено на обеспечение требуемых свойств для конкретных условий эксплуатации изделия. Этим объясняется выбор нержавеющей стали в качестве плакирующего материала в биметаллической композиции для использования в изделиях, предназначенных для эксплуатации в условиях коррозии.

Выбор меди в качестве плакирующего элемента в биметаллическом соединении, позволяет создать материал, обладающий хорошими антифрикционными свойствами с одной стороны, и обеспечивающий достаточную конструктивную прочность изделия с другой. Выбор сварки взрывом как технологического метода получения композиции «Сталь+Медь» объясняется тем, что в обычных условиях данные металлы не образуют химического соединения, т.к. имеют ограниченную растворимость в твердом состоянии, плохо смачиваются, а температуры их кристаллизации существенно различаются. Биметаллические композиции «Сталь+Алюминий» имеют хорошие перспек-

тивы как легкий конструкционный материал, обладающий необходимой конструктивной прочностью.

В целом биметаллические композиции из материалов, обладающих значительной разницей в механических, физических и др. свойствах, можно рассматривать как класс новых конструкционных материалов, обладающих комплексом особых свойств.

Как отмечено выше, в качестве основы биметаллических соединений использовался листовой прокат углеродистой стали обыкновенного качества марки Ст3сп ГОСТ 380-2005, толщиной 3 мм. Химический состав стали, механические свойства и теплофизические характеристики представлены в таблицах 2.1 – 2.3 [78].

Таблица 2.1 – Химический состав стали Ст3сп

	Массовая доля химических элементов, %										
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Ti
Основные элементы согласно ГОСТ 380-2005	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,30	Не регламентировано							
Фактически	0,1505	0,4892	0,2379	0,0064	0,0102	0,0940	0,0694	0,1850	0,0068	0,0005	0,0013

	Al	Nb	W	As	Sn	Co	Pb	B	Sb	Ta
Основные элементы согласно ГОСТ 380-2005	Не регламентировано									
Фактически	0,0376	0,0017	0,0007	0,0060	0,0177	0,0105	-	-	0,0014	0,0034

	Zr	Bi	Ca	Mg	Zn	Ce	La	N	Te	Fe
Основные элементы согласно ГОСТ 380-2005	Не регламентировано									
Фактически	-	0,0059	0,0010	0,0002	0,0048	0,0015	0,0030	0,0146	-	98,6423

Таблица 2.2 – Механические свойства стали СтЗсп

Состояние материала	Толщина листа, мм	Временное сопротивление, δ_B , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %
Лист горячекатанный	2-3,9	360-460	22

Таблица 2.3 – Теплофизические свойства стали СтЗсп

Плотность, г/см ³	Теплоемкость, кал/г·град	Теплопроводность, ккал/м·час·град			Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
		20°С	200°С	500°С		
7,80	0,1077	63	53	37	1539	277

В качестве антикоррозионного плакирующего материала для биметалла использовался листовый прокат нержавеющей стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т ГОСТ 5582-75 толщиной 2 мм. В таблицах 2.4-2.6 представлен химический состав, механические свойства и теплофизические характеристики данного материала [79].

В качестве другого плакирующего материала служил алюминий марки А5М ГОСТ 21631-76 в виде листового проката толщиной 3 мм. Химический состав, механические и теплофизические свойства представлены в таблицах 2.7-2.9 [80].

Таблица 2.4 – Химический состав стали 12Х18Н10Т

	Массовая доля химических элементов, %							
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P
Основные элементы согласно ГОСТ 5582-75	не более 0,12	не более 0,8	не более 2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	5-с-0,8	0,020	0,035
Фактически	0,0503	0,5450	1,2215	17,3036	9,1888	0,3207	0,0007	0,0242

	Cu	Mo	V	Al	Nb	W	As	Sn
Основные элементы согласно ГОСТ 5582-75	Не регламентировано							
Фактически	0,1465	0,0850	0,0452	0,0796	0,0202	0,0188	0,0094	0,0069

	Co	Pb	B	Sb	Ta	Zr	Bi	Ca
Основные элементы согласно ГОСТ 5582-75	Не регламентировано							
Фактически	0,1880	0,0052	0,0005	0,0143	-	0,0075	0,0270	0,0002

	Mg	Zn	Ce	La	N	Te	Fe
Основные элементы согласно ГОСТ 5582-75	Не регламентировано						
Фактически	0,0110	0,0248	0,0181	0,0038	0,0226	0,0050	70.6065

Таблица 2.5 – Механические свойства стали 12Х18Н10Т

Режим термической обработки листов	Временное сопротивление, δ_B , МПа	Предел текучести, δ_T , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %
	не менее		
Закалка 1050-1080° С, охлаждение в воде или на воздухе	530	205	40

Таблица 2.6 – Теплофизические свойства стали 12Х18Н10Т

Плотность, г/см ³	Теплоемкость, кал/г·град	Теплопроводность, ккал/м·час·град			Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
		20° С	200° С	500° С		
7,80	0,1077	12-13	14-15	18	1460-1500	277

Таблица 2.7 – Химический состав алюминия А5М

	Массовая доля химических элементов, %								
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ga	Ti
Основные элементы согласно ГОСТ 21631-76	не менее 99,50	0,25	0,30	0,02	0,05	0,03	0,06	0,03	0,02
Фактически	99,4863	0,0791	0,3312	0,0301	0,0033	0,0010	0,0107	0,0093	0,0057

	Cr	Ni	B	Be	Bi	Ca	Cd	Co
	Основные элементы согласно ГОСТ 21631-76	Не регламентировано						
Фактически	0,0030	0,0046	0,0008	-	0,0036	0,0015	0,0023	0,0037

	P	Pb	Sb	Sn	Sr	V	Zr
	Основные элементы согласно ГОСТ 21631-76	Не регламентировано					
Фактически	-	0,0020	0,0031	0,0008	-	0,0171	0,0009

Таблица 2.8 – Механические свойства листов алюминия А5М

Состояние материала листов	Толщина листа, мм	Временное сопротивление, δ_B , МПа	Предел текучести, δ_T , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %
		не менее		
Отожженое	0,9-10,5	60	-	30

Таблица 2.9 – Теплофизические свойства алюминия А5М

Плотность, г/см ³	Теплоемкость, кал/г·град	Теплопроводность, ккал/м·час·град	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
2,70	0,2129	197	660	390

Для создания еще одной биметаллической композиции в качестве плакирующего материала был использован листовой прокат меди марки М1

ГОСТ 495-92 толщиной 2 мм. В таблицах 2.10-2.12 отображены химический состав, механические свойства и теплофизические характеристики данного материала [81].

Таблица 2.10 – Химический состав меди М1

	Cu+Ag, %	Примеси, %							
		Pb	Fe	Sn	Si	Sb	As	Mn	Ni
Согласно ТУ.У27.4- 00195452- 015-2003	99,90	Прочие элементы (исключая Ag, Ni, O ₂) всего 0,05%							
Фактически	99,97	0,0024	0,0015	0,0042	Сл.	0,0012	0,0001	-	0,0109

	Примеси, %									
	Bi	P	Zn	S	Ag	Cd	O ₂	Co	Cr	Se
Согласно ТУ.У27.4- 00195452- 015-2003							0,100			
Фактически	0,0004	0,0020	0,0023	0,0005	-	Сл.	0,0042	-	-	-

Таблица 2.11 – Механические свойства листов меди М1

	Временное сопротивление, δ_B , МПа	Относительное удлинение, δ , %, не менее
Согласно ГОСТ 495-92	200-260	36
Фактически	213-215	45-47

Таблица 2.12 – Теплофизические свойства меди М1

Плотность, г/см ³	Теплоемкость, кал/г·град	Теплопроводность, ккал/м·час·град			Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
		20°С	200°С	500°С		
9,0	0,0913	330	321	309	1083	213

Сварка взрывом биметаллических композиций производилась в лаборатории физики взрыва Института Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск).

2.2 Технологическое оборудование для тонкоструйной плазменной резки

Раскрой листовых материалов осуществляется на технологическом комплексе тонкоструйной плазменной резки, состоящим из следующих основных блоков: система ЧПУ BURNY PHANTOM ST (1), координатный стол с порталом (2), плазматрон PerCut 160 (3), источник тока Hi – Focus 130i с газовой консолью (4), газобаллонное оборудование (5) (рисунок 2.1).

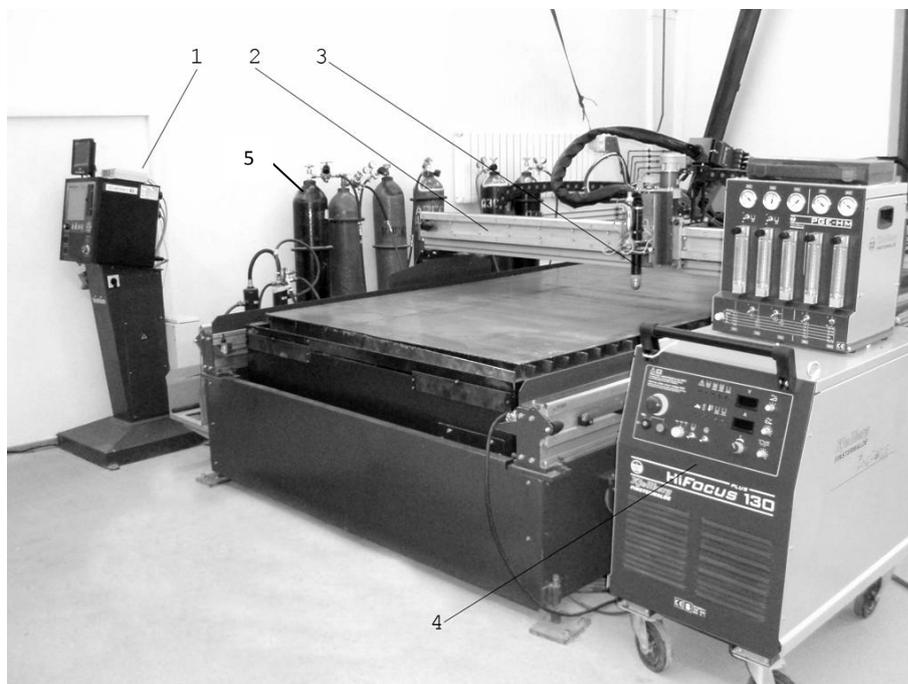


Рисунок 2.1 – Технологический комплекс тонкоструйной плазменной резки

Система ЧПУ обеспечивает перемещение плазматрона по заданной траектории, а раскрой осуществляется по программе обработки единичной детали или по программе раскладки деталей в пределах листа с учетом информации о настройках процесса для обеспечения требуемой точности формообразования [65, 66].

Источник технологического тока Hi – Focus 130i обеспечивает требуемые энергетические параметры процесса, а встроенная газовая консоль – расходы плазмообразующего и завихряющего газов [75].

2.3 Методы экспериментальных исследований

2.3.1 Химический анализ материалов

Определение химического состава используемых в работе материалов – углеродистой стали марки Ст3, нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, алюминия марки А5М, проводилось на оптико-эмиссионном спектрометре модели ARL 3460 с точностью определения концентрации легирующих элементов не ниже 0,001%. Результаты измерений для указанных материалов представлены в таблицах 2.1, 2.4, 2.7. Химический состав меди марки М1 в соответствии с сертификатом – свидетельством о приемке № EN 10204-3.1 приведен в таблице 2.10.

2.3.2 Методы структурных исследований

Для изучения структурно-фазового состояния материалов в работе применялась оптическая и растровая электронная микроскопия.

2.3.2.1 Оптическая микроскопия

Металлографические исследования проводили на микроскопе модели Axio Observer A1m с использованием методов светлого и темного поля во всем диапазоне увеличений от 25х до 1500х. Съемка изображений с микроскопа осуществлялась камерой модели AxioCam MRc5. Подготовка образцов для металлографических исследований проводилась с использованием прессы Buchler SimpliMet 1000 в соответствии с рекомендованными методиками. Шлифование и полирование образцов осуществлялось на установке Struers LaboPol-5, начиная с операций шлифования на абразивных кругах зернистостью 110, 22 мкм с последующим переходом на тонкое шлифование и последовательное полирование с алмазной суспензией размером от 9 мкм до 1 мкм. Травление образцов для выявления структурного состояния материала

производилось 3% раствором HNO_3 в этиловом спирте и слабым раствором хлорного железа.

2.3.2.2 Растровая электронная микроскопия

Растровая микроскопия на электронном микроскопе модели EVO 50XVP предназначалась для изучения тонкого строения биметаллических материалов на предварительно химически протравленных шлифах при использовании увеличения от $\times 50$ до $\times 3000$. Для получения больших увеличений использовался растровый электронный микроскоп CarlZeiss 1540 с полевой эмиссией катода.

2.3.2.3 Рентгенофазовый анализ

Анализ химических процессов, протекающих в канале реза при тонкоструйной плазменной резке, проводился методом рентгеновской дифрактометрии. Дифракционные картины образцов регистрировались на $\theta - \theta$ дифрактометре мод. ARL X'TRA с использованием медной рентгеновской трубки в качестве источника рентгеновского излучения. Немонохроматизированное излучение регистрировалось энергодисперсионным Si (Li) детектором, настроенным на регистрацию $\text{Cu } K\alpha_1/\alpha_2$ длин волн. Пучок падающих на образец лучей имел прямоугольное поперечное сечение, размеры которого, а также угол расходимости пучка изменялись с помощью ряда щелей и коллиматора Соллера. Размеры облучаемой области на образце составляли $\sim 15 \times 5$ мм. Рентгенограммы регистрировали в режиме времени ($t = 5$ с) с шагом $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$.

2.3.3 Методы исследования топографии поверхности реза

Геометрическое состояние поверхности после любой обработки является одним из критериев оценки качества обработки в целом. Для изучения

геометрического состояния поверхности необходима оценка как ее микрогеометрии, так и макрогеометрических искажений. Изучения профилей поверхности по сечениям производилось на профилографе - профилометре модели 252 с цифровой индикацией результатов измерений. Оценка высотных и шаговых характеристик геометрии поверхности возможна при использовании следующих параметров в соответствующих диапазонах:

- R_a (от 0,02 до 100 мкм);
- H_{\max} , H_{\min} (от 0,1 до 100 мкм);
- t_p (90-100%);

при соответствующих горизонтальном (от 0,5 до 2000) и вертикальном (от 10 до 50000) увеличениях.

Для получения трехмерного изображения топографии исследуемой поверхности использовался комплекс ZYGO New View 7300, реализующий современные технологии трехмерной сканирующей интерферометрии.

2.3.4 Оценка точности реза

Оценка точности реза проводилась на поперечных шлифах образцов после раскроя и заключалась в определении углов наклона кромок реза в соответствии с рекомендуемой методикой по ISO 9013: 2002 [82] (рисунок 2.2).

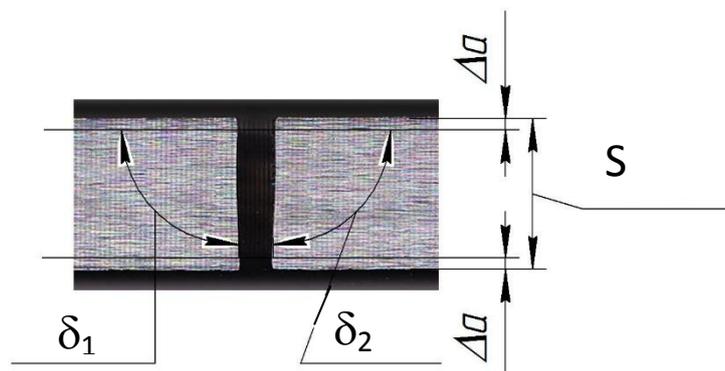


Рисунок 2.2 – Схема определения отклонения кромок реза от перпендикулярности в соответствии с методикой по ISO 9013: 2002

Угловое отклонение кромок реза от перпендикулярности (δ_1, δ_2) оценивалось на базовой длине, значение которой определялось как $(S - 2\Delta a)$, где S – толщина реза, Δa – зависит от толщины реза и определяется по таблице 2.13.

В настоящей работе для оценки точности реза использован параметр $\alpha = \delta - 90^\circ$.

Качественная оценка состояния поверхности реза и количества грата на нижней кромке осуществлялась на микроскопе МБС-10.

Таблица 2.13 – Зависимость величины Δa от толщины реза

Толщина реза, мм	Δa , мм
$S \leq 3$	0,1
$3 < S \leq 6$	0,3
$6 < S \leq 10$	0,6
$10 < S \leq 20$	1,0
$20 < S \leq 40$	1,5

2.3.5 Измерение микротвердости поверхностного слоя в зоне реза

Изучение состояние материала в зоне термического влияния при тонкоструйной плазменной резке проводилось по распределению микротвердости, как характеристики, отражающей комплекс механических свойств и структурно-фазовое состояние материала. Измерение микротвердости производилось на микротвердомере ПМТ – 3М в соответствии с ГОСТ 4950 – 76 [83], регламентирующим методы измерения микротвердости изделий из черных и цветных металлов, сплавов, минералов, стекол, пластмасс и т.д. вдавливанием алмазных наконечников. Измерение микротвердости производилось при нагрузках 50, 100 г.

ГЛАВА 3 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ современных технологий резки металлических материалов, представленный в 1 разделе работы, позволил выявить определенные ограничения в их использовании для реализации поставленной цели по поиску технологических решений в обработке биметаллических композиций, состоящих из разнородных материалов. Так кислородная резка оказывается неприемлемой в виду ограничения в номенклатуре обрабатываемых материалов, представленных только классом низкоуглеродистых сталей. Это ограничение связано, прежде всего, с физикой процесса обработки в условиях кислородной резки. Также имеет место ограничение, связанное с диапазоном рекомендуемых толщин разрезаемого материала.

Лазерная резка из-за специфики взаимодействия светового излучения с веществом также имеет ограничения в обработке определенных классов материалов, особенно, если эти материалы находятся внутри слоистых композиций, и известные технические и технологические решения не применимы. Для данной технологии также существуют ограничения, связанные с толщиной обрабатываемого материала, но уже со стороны больших значений.

В этой связи представляется перспективным исследование технологических схем тонкоструйной плазменной резки, приближающейся по точности и качеству к лазерной обработке, но имеющей преимущества по производительности и себестоимости процесса [72, 77]. Иной механизм передачи энергии от плазменного столба к обрабатываемому материалу (по сравнению с лазерным излучением) позволяет рассчитывать на достижение положительных результатов в обработке слоистых композиций разнородных материалов. Основная задача при этом заключается в поиске рациональных технологических схем, оптимизации режимных параметров, выборе лобовой стороны раскрытия биметаллических композиций.

Поскольку тонкоструйная плазменная резка является термическим способом разделения материалов, то очевидно, что основным параметром, определяющим процесс обработки, является плотность мощности плазменной дуги. Последняя зависит от тока дуги и диаметра столба. Для реализации процесса раскроя определенной толщины конкретного материала необходимо назначение скорости перемещения теплового источника относительно изделия ниже критической, обеспечивающей сквозной прорез материала [84]. Исходя из данных соображений разработчиком технологий тонкоструйной плазменной резки (фирма Kjellberg, Германия) предложен ряд технологических схем (Hi – Focus, Hi – Focus^{plus}, Hi – FocusF) для различных толщин реза. Класс обрабатываемого материала в пределах указанных технологических схем определяет выбор плазмообразующего (режущего) и завихряющего газов и назначение их параметров (расход и давление), что обуславливает характер газо и гидродинамических процессов в зоне реза [75].

Оптимизация скорости, как технологического параметра, направлена на обеспечение таких критериев обработки как отсутствие грата на нижней кромке реза, достижение его перпендикулярности, минимизация оплавления на верхних кромках.

3.1 Технологические возможности плазменного раскроя модельных материалов

3.1.1 Конструкционные углеродистые стали

Принимая во внимание выбор для исследования определенных марок металлических материалов, представим обобщенные зависимости скоростей обработки от толщины реза для отмеченных выше технологических схем тонкоструйной плазменной резки.

На рисунке 3.1 показана зависимость скорости обработки от толщины реза конструкционных сталей для технологии Hi – Focus [85].

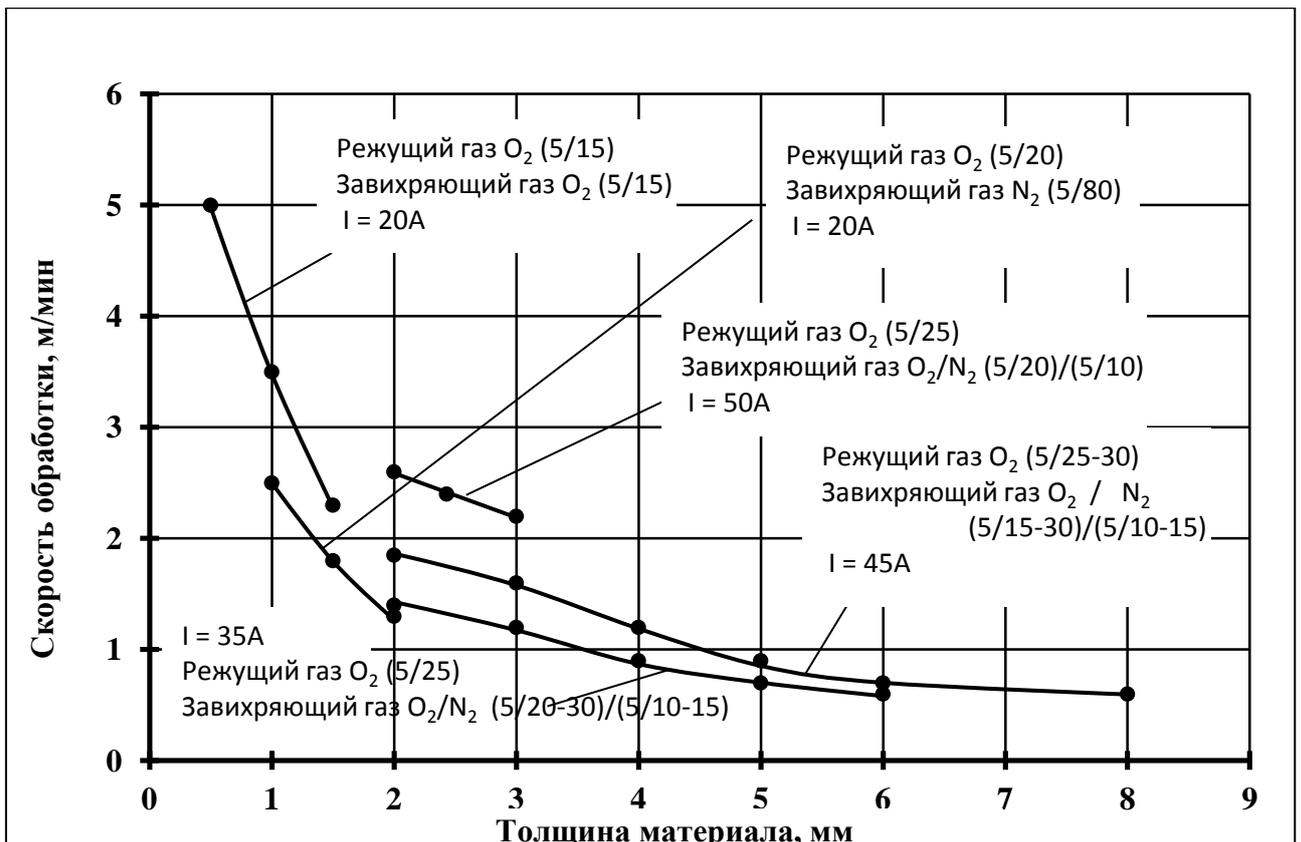


Рисунок 3.1 – Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Ni – Focus

Данная технология ограничена диапазоном толщин реза от 0,5 до 8 мм при изменении токовых значений от 20 до 50 А. Диапазон рекомендованных скоростей находится в пределах от 0,5 до 5 м/мин. По данной технологии при обработке конструкционных сталей в качестве режущего газа используется кислород с параметрами давления 5 бар и расхода от 10 до 25 условных делений по шкале прибора установки Ni – Focus 130i. Так, при минимальном значении тока $I = 20$ А, формирование качественного реза в конструкционных углеродистых сталях возможно в диапазонах толщин от 0,5 до 1,5 мм при соответствующих скоростях обработки. Реализация данной технологической схемы на больших толщинах возможна при повышении тока дуги до 35 – 45 А, соответствующем увеличении расхода режущего газа и снижении скорости обработки. Кроме этого, при толщинах реза свыше 1,5 мм необходима смена завихряющего газа с кислорода на азот, а при толщине, превышающей 2 мм – на кислородо-азотную смесь.

Следует обратить внимание, что для изменения тока дуги как техноло-

гического параметра необходима установка соответствующего сопла, что неизменно приведет к изменению ширины реза от 1,2 мм при $I = 20$ А до 2,3 мм при $I = 45$ А.

При необходимости обработки конструкционных сталей в расширенном диапазоне толщин реза (от 4 до 30 мм) рекомендуется использовать следующую технологическую схему - Hi – Focus^{plus} (рисунок 3.2) [85]. Данная схема характеризуется расширенным диапазоном рабочих токов (от 50 до 130 А), обеспечивая формирование качественного реза на скоростях от 0,5 до 2,7 м/мин. Как и в предыдущей схеме в качестве режущего газа используется кислород, но на повышенном давлении (10 бар) при регулируемых расходах от 20 до 60 условных делений шкалы прибора. В качестве завихряющего газа применяется азот (на токах 50 А) и кислородо-азотная смесь ($I = 100-130$ А). Как и следовало ожидать, переход к максимальным токам на значительных толщинах реза сопровождается увеличением его ширины до 3,2 мм.

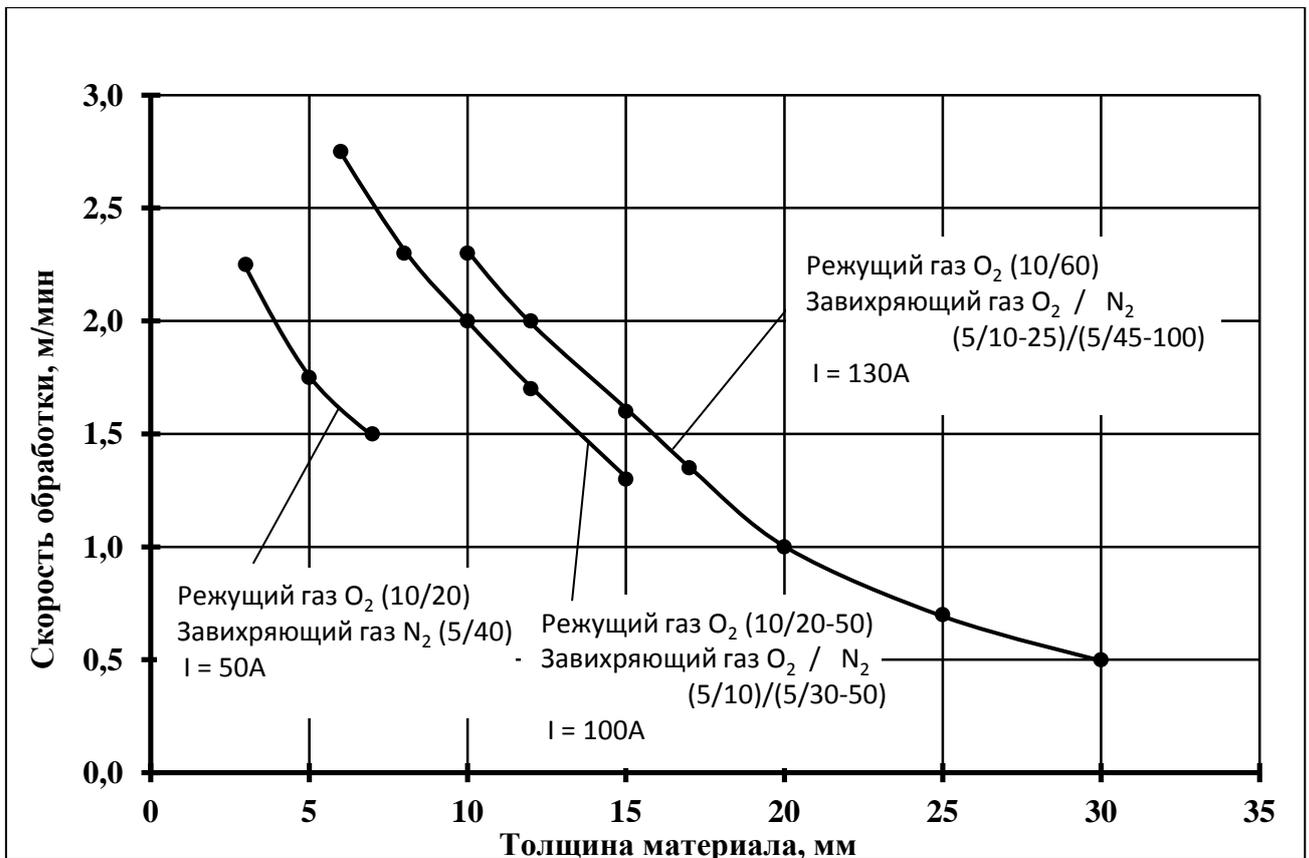


Рисунок 3.2 – Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Hi – Focus^{plus}

Третья технологическая схема (Ni – FocusF) в обработке конструкционных сталей также ориентирована на широкий диапазон толщин реза (6-25 мм) как и предшествующая (Ni – Focus^{plus}), но отличающаяся постоянством мощности дуги при максимально возможном токе $I = 130$ А установки Ni – Focus 130i (рисунок 3.3) [85].

По существу технологическая схема Ni – FocusF является аналогом схемы Ni – Focus^{plus}, с единственным отличием использования максимальных токов на относительно малых толщинах реза (6-10 мм).

Возможность обработки широкого диапазона толщин на одних технологических режимах, с одной стороны, является привлекательным, поскольку не требует дополнительной переналадки плазмотрона, а с другой стороны, эксплуатация на максимальных токах ведет к ускоренному износу расходных элементов плазмотрона и росту энергозатрат.

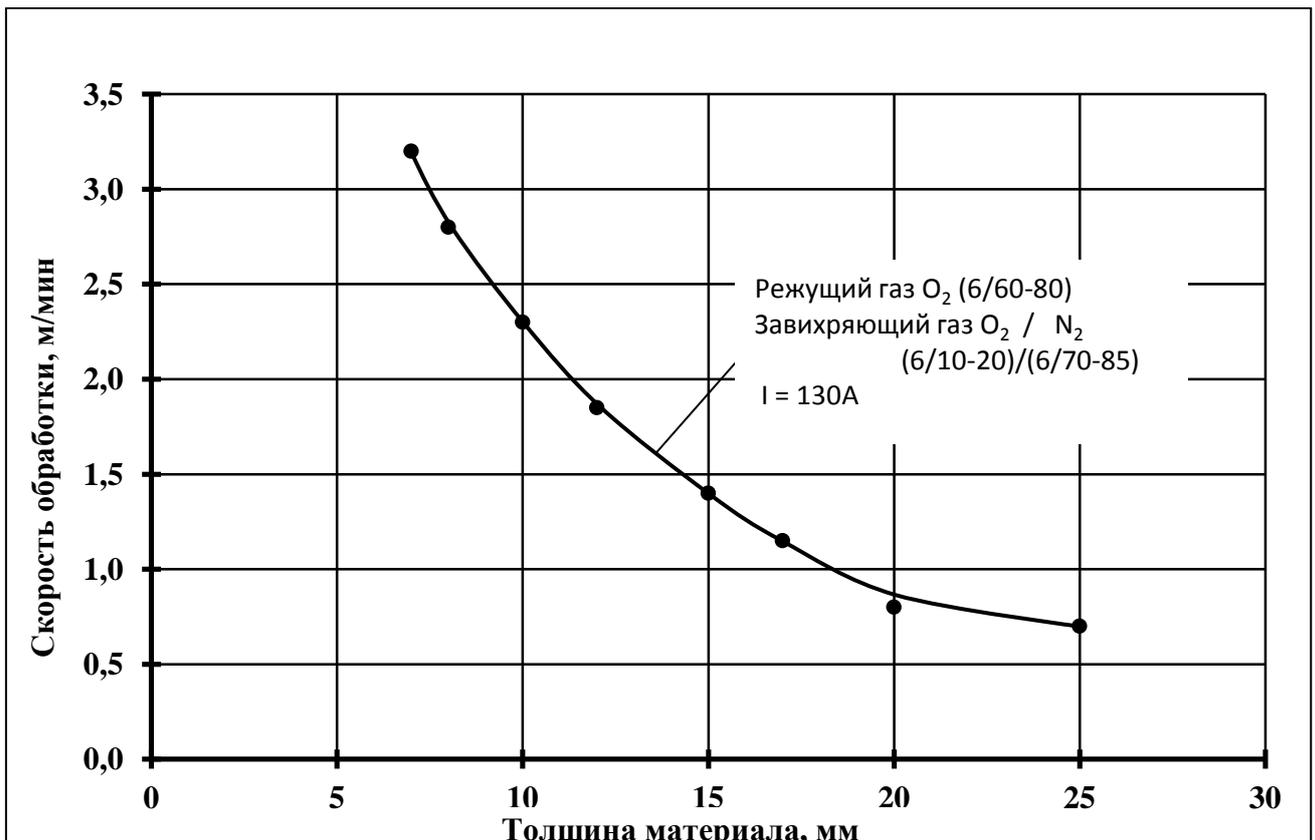


Рисунок 3.3 – Технологические параметры раскрыя конструкционных сталей для технологической схемы Ni – FocusF

3.1.2 Легированные стали

Легирование железоуглеродистых сплавов различными химическими элементами, направленное на создание у материала благоприятных прочностных, коррозионных, жаропрочных и др. свойств, оказывает существенное затруднение в механической обработке традиционными методами, основанными на процессах лезвийного и абразивного резания.

Учитывая специфику термического метода разделения металлических материалов, следует ожидать, что характер изменения технологических параметров тонкоструйной плазменной резки в исследуемом диапазоне толщин реза у легированных и конструкционных углеродистых сталей будет аналогичен. На рисунке 3.4 представлены режимные параметры раскроя легированных сталей для технологических схем Hi – Focus и Hi – FocusF [86].

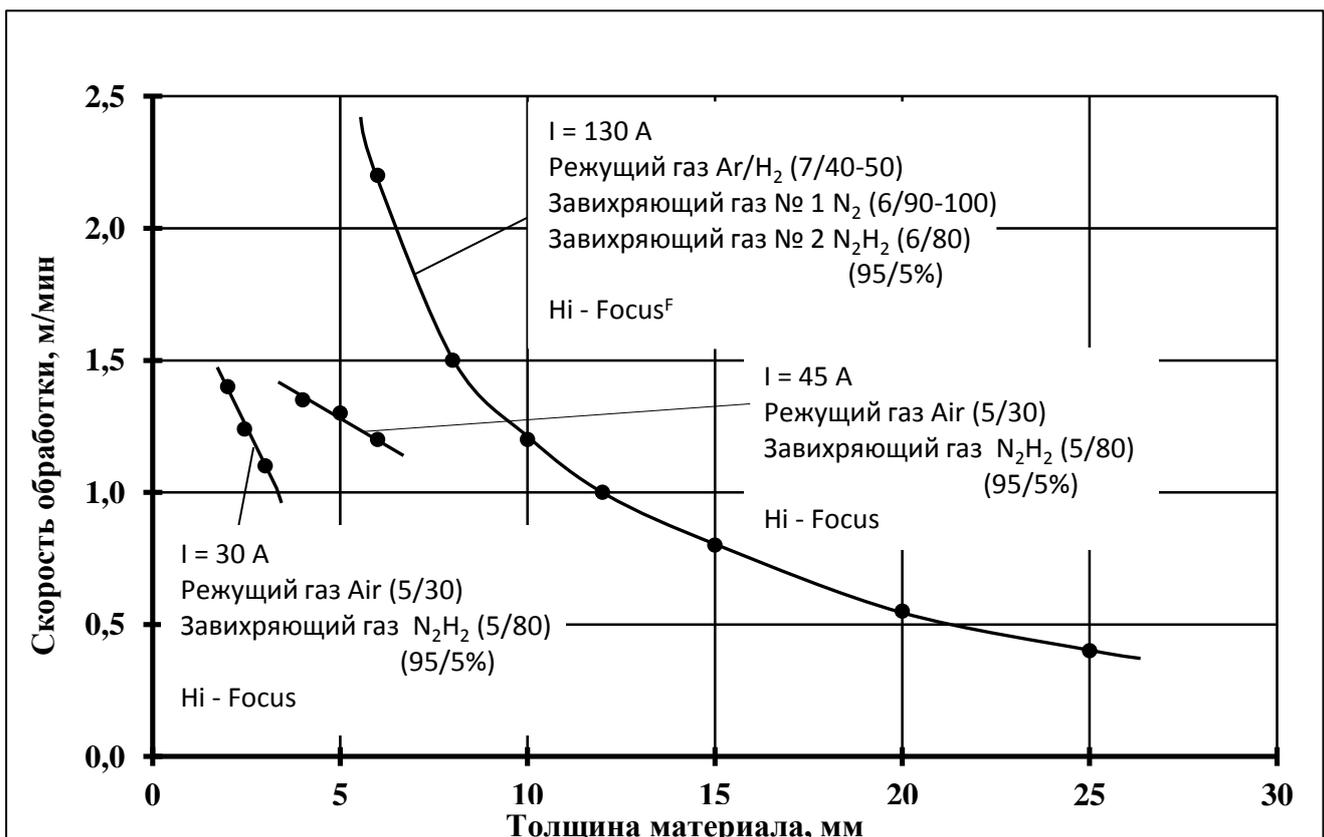


Рисунок 3.4 – Технологические параметры раскроя легированных сталей для технологических схем Hi – Focus, Hi – FocusF

Совместный анализ результатов, представленных на рисунках 3.1, 3.3 и 3.4, подтвердил идентичный характер зависимостей во всем диапазоне толщин реза. Различие проявляется в составах режущих и завихряющих газов, что объясняется разницей в химических составах сравниваемых материалов.

Следует отметить, что при обработке углеродистых конструкционных сталей скорость обработки в среднем в 1,5 раза выше по сравнению с обработкой легированных сталей во всем диапазоне толщин реза.

3.1.3 Алюминиевые и медные сплавы

Резка алюминиевых сплавов реализуется с использованием технологических схем Ni – Focus для толщин материала в интервале от 1 до 6 мм (рисунок 3.5) и Ni – FocusF – в интервале от 5 до 25 мм (рисунок 3.6.) [87].

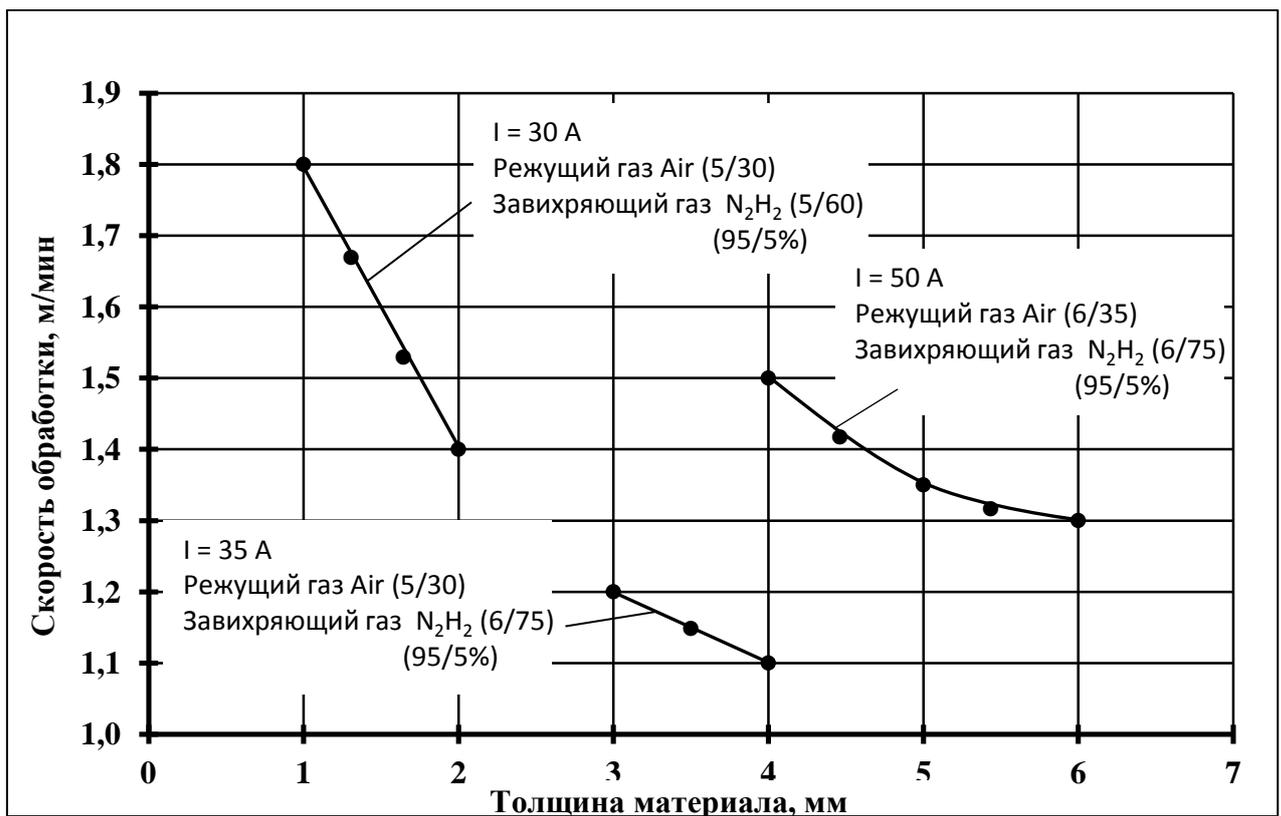


Рисунок 3.5 – Технологические параметры раскроя алюминиевых сплавов для технологической схемы Ni – Focus

Для малых толщин в качестве режущего газа использован воздух, а завихряющего – азото-водородная смесь. Резка на токах от 30 до 50 А реализована на скоростях от 1,3 м/мин для толщины реза 6 мм до 1,8 м/мин – для 1 мм. При этом ширина реза изменялась от 1,9 до 1,5 мм.

Переход к технологической схеме Ni – FocusF предполагает замену рабочего газа на водород, а завихряющий газ является двухкомпонентным, состоящим из азота и азото-водородной смеси.

В целом характер изменения скорости обработки от толщины реза для обеих технологических схем аналогичен результатам обработки как углеродистых конструкционных, так и легированных сталей.

Для тонкоструйного плазменного раскроя меди и медных сплавов разработчик оборудования рекомендует использовать технологические схемы и режимные параметры для обработки углеродистых конструкционных сталей (рисунки 3.1, 3.3) [88].

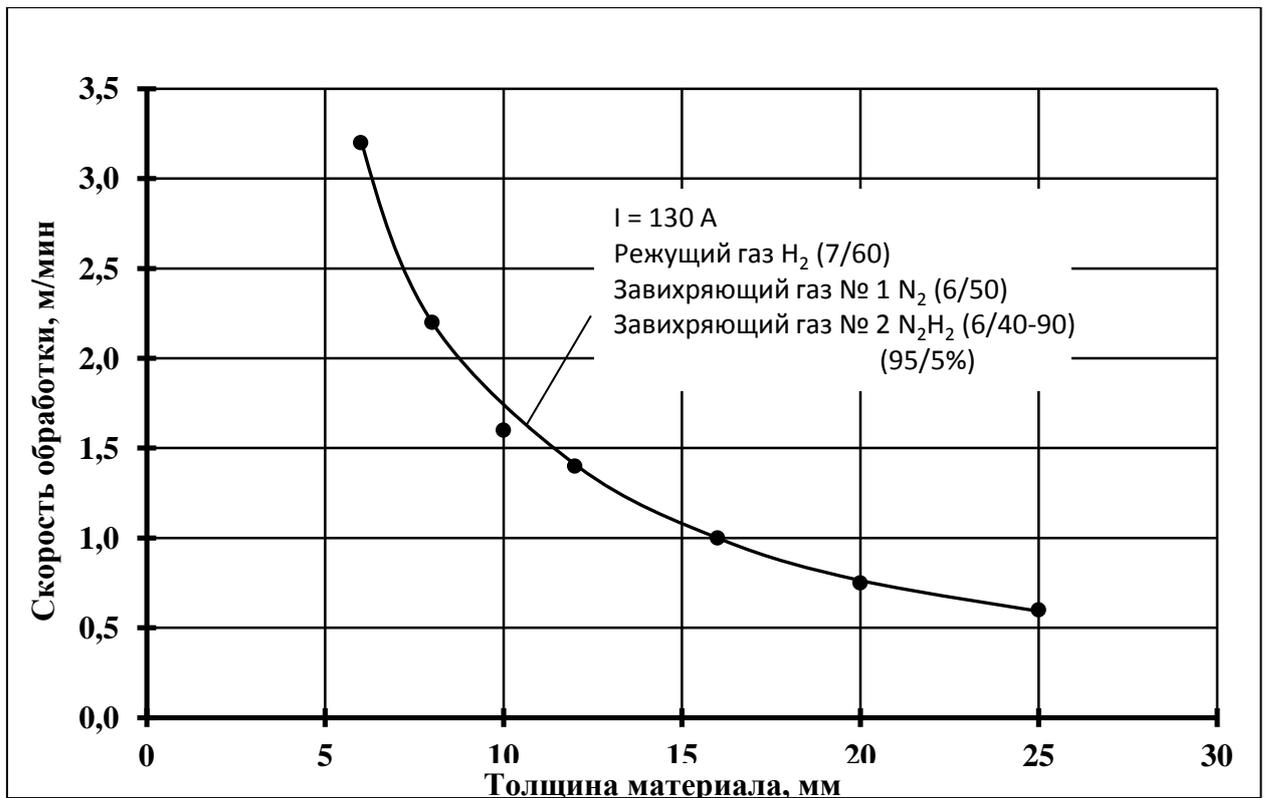


Рисунок 3.6 – Технологические параметры раскроя алюминиевых сплавов для технологической схемы Ni – FocusF

Результаты, представленные на рисунках 3.1 – 3.6, могут рассматриваться как режимные области для технологических схем обработки исследуемых классов материалов. Для выявления режимов раскроя конкретной марки металла в определенном состоянии поставки необходимо проведение экспериментальных исследований с оптимизацией обработки по отмеченным выше критериям качества реза.

3.2 Оптимизация режимов плазменного раскроя модельных материалов

В разделах 3.1.1 – 3.1.3 работы были определены технологические возможности плазменного раскроя исследуемых классов модельных материалов, которые позволяют оценить область реализации той или иной технологической схемы (Hi – Focus, Hi – Focus^{plus}, Hi – FocusF) в зависимости от толщины предполагаемого реза.

Оптимизация режимов обработки в рамках конкретной технологической схемы, которая может быть назначена на основе предварительного анализа по данным рисунков 3.1 – 3.6, должна производиться по критериям точности и качества реза определенной марки материала и его толщины.

3.2.1 Низкоуглеродистая сталь Ст3 и нержавеющей сталь 12Х18Н10Т

Так для основного модельного материала – углеродистой стали марки Ст3сп толщиной 3 мм на основании анализа результатов рисунков 3.1 – 3.3 в качестве основной технологической схемы тонкоструйной плазменной резки целесообразно использовать технологию Hi – Focus. Из возможных вариантов обработки с токами 35 А, 45 А и 50 А следует остановиться на последнем, как обладающим наибольшей мощностью плазменной дуги, а, следовательно, допускающим обработку на максимальных скоростях (2,2 м/мин).

Принимая для обработки определенную технологическую схему с соответствующим значением токовой характеристики, набором режущего и завихряющего (завихряющих) газов и их параметров, в роли технологическо-

го режима для оптимизации качества реза конкретной марки материала определенной толщины и состояния поставки может быть использована только скорость обработки. В качестве оптимизационных параметров качества реза в соответствии со стандартом качества для термических методов резки [49] были приняты геометрические характеристики реза (отклонение от перпендикулярности), макро и микрогеометрия поверхности реза (волнистость и шероховатость) и характеристики структурно-фазовых превращений в зоне реза (зона термического влияния), а также наличие и размер грата на нижней кромке реза.

По результатам предварительных экспериментов был установлен диапазон варьирования скоростью обработки и составлял 2,0 – 2,4 м/мин [89].

Способ оценки геометрической точности реза через параметр отклонения от перпендикулярности представлен в разделе 2.2.3 настоящей работы и соответствует методике ISO 9013: 2002. Зависимость данного параметра точности реза от скорости обработки представлена на рисунке 3.7.

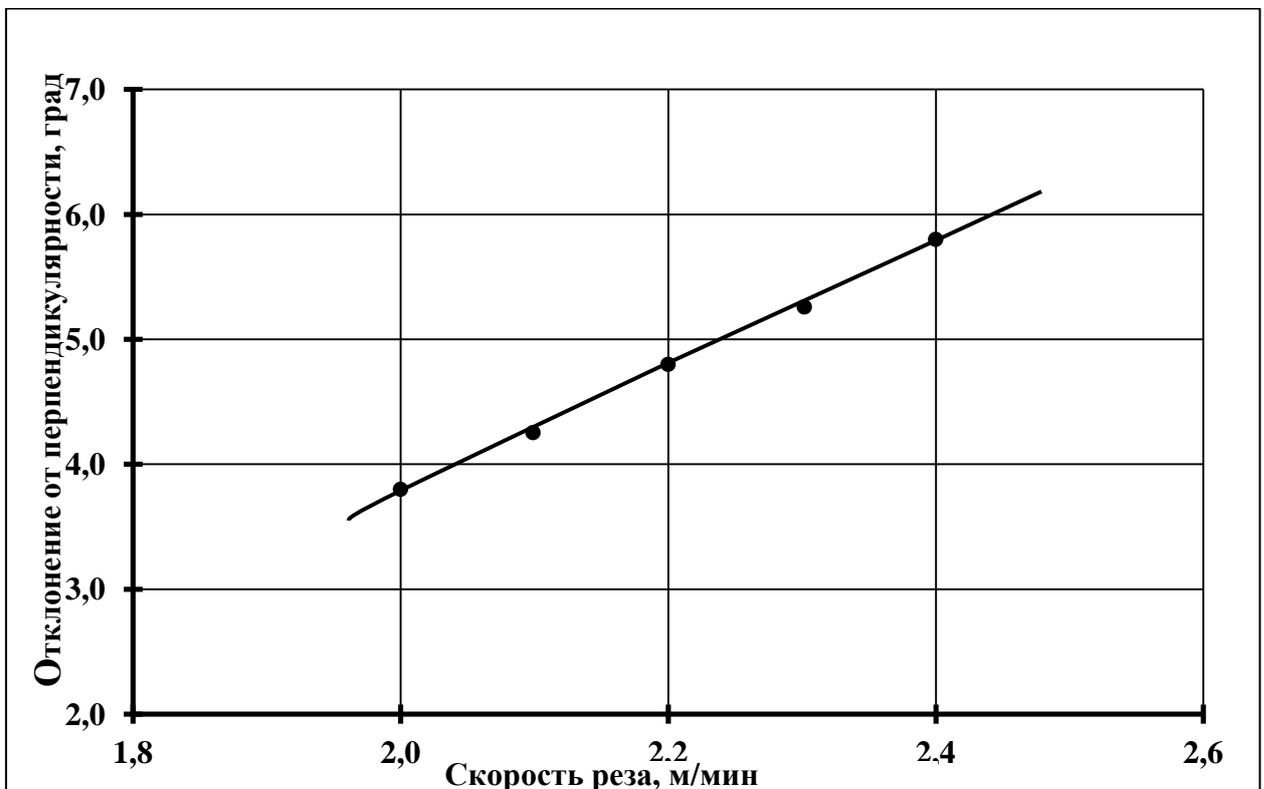


Рисунок 3.7 – Влияние скорости реза стали Ст3 на точность реза

Снижение точности реза с увеличением скорости обработки объясняется тем, что разделение металла при больших скоростях сопровождается «жесткими» условиями термического воздействия со значительным градиентом температур по толщине реза.

Данный результат подтверждается исследованиями работ [59, 65], где показано влияние скорости обработки на геометрическую точность реза.

Аналогичный характер имеет зависимость шероховатости поверхности реза от скорости обработки (рисунок 3.8).

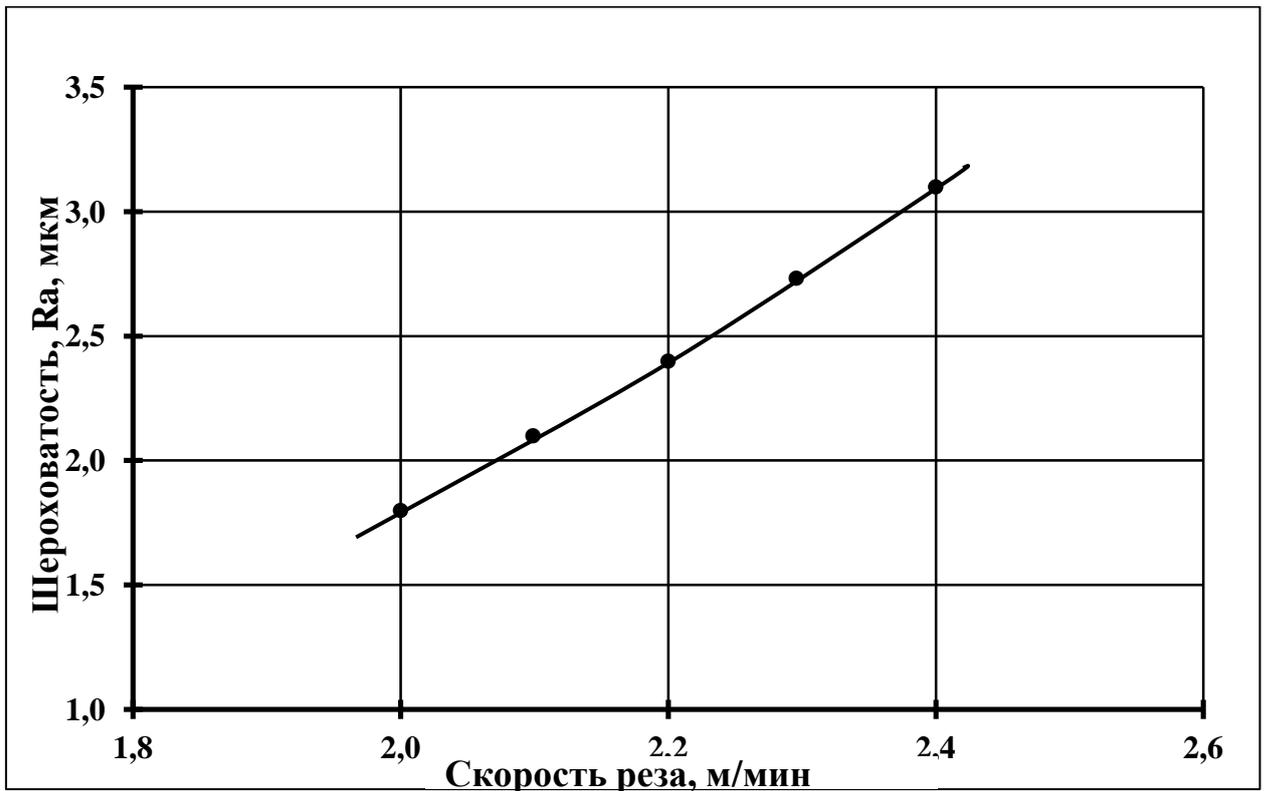


Рисунок 3.8 – Влияние скорости реза стали Ст3 на шероховатость поверхности реза

Внешний вид поверхности реза стали Ст3 при различных скоростях обработки показан на рисунке 3.9. Если на скорости $V = 2$ м/мин морфология поверхности реза относительно однородна, то с увеличением скорости до $V = 2,4$ м/мин на поверхности реза появляется рельеф, характерный для термических методов резки. Рельеф представляет собой совокупность следов от мгновенных положений потоков продуктов расплава из зоны реза. Увеличе-

ние скорости обработки вносит ограничения в развитие газодинамических потоков, участвующих в удалении продуктов расплава с поверхности реза.

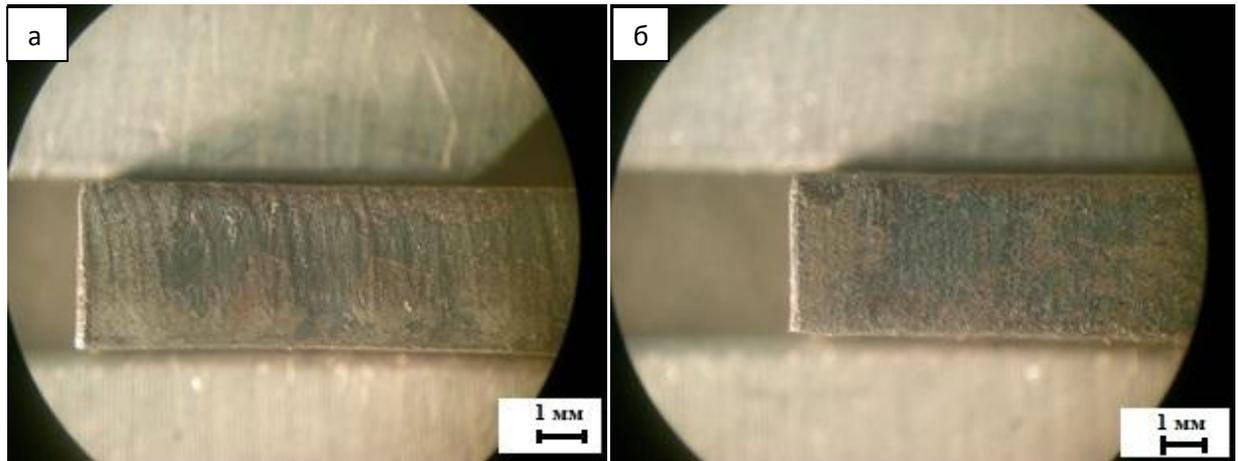


Рисунок 3.9 – Морфология поверхности реза стали Ст3:

а - $V = 2$ м/мин; б - $V = 2,4$ м/мин

Изучение процессов гратообразования на нижней кромке реза показало на отсутствие данного дефекта в существенной мере. Величина грата незначительно увеличивается со снижением скорости обработки, что объясняется «смягчением» газодинамических потоков в зоне реза. При этом образующийся грат легко отделим от кромок реза [90, 91].

Для оптимизации технологических режимов раскроя листовых материалов, выполненных из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 2 мм в первую очередь необходим подбор соответствующей технологической схемы, определяющей как токовые значения процесса, так и соответствующие составы, и параметры режущего и завихряющего либо завихряющих газов [92]. При постоянстве технологической схемы назначение режимов обработки сводится к установлению взаимосвязи параметров качества реза со скоростью обработки.

Исходя из вышеизложенного, целесообразным представляется выбор технологической схемы Ni – Focus с токовой характеристикой $I = 30$ А, режущим газом - Air (воздух), завихряющим газом – азото-водородной смесью с давлением и расходами, указанными на рисунке 3.4. Диапазон изменения скоростей в исследовании составлял $V = 0,9 - 1,3$ м/мин [86].

Анализ поверхности реза нержавеющей стали после обработки (рисунок 3.10) показал на отличия в ее морфологии в сравнении с углеродистой сталью (рисунок 3.9).



Рисунок 3.10 – Внешний вид поверхности реза нержавеющей стали 12X18Н10Т после тонкоструйной плазменной резки ($I = 30 \text{ А}$, $V = 1,3 \text{ м/мин}$)

Внешний вид поверхности реза нержавеющей стали 12X18Н10Т (рисунок 3.10) свидетельствует о наличии на ней разных участков. Так на фоне основного участка, образованного следами движущейся плазменной дуги, у верхней кромки реза имеет место участок с отличной от основной морфологии. Образование этого участка можно объяснить низкой теплопроводностью исследуемого материала. Так после расплавления металла в зоне реза и по мере его удаления потоками плазмы, на верхней кромке реза, вследствие сохранения высоких температур возможны химические реакции окисления металла, как атмосферным воздухом, так и неионизированной частью режущего газа с образованием тугоплавких соединений типа Cr_2O_3 . Появление в расплаве подобного рода окислов приведет к повышению его вязкости и затруднению полного удаления из зоны реза. Поэтому часть расплава осаждается в верхней части реза. Подтверждением данного объяснения служит результат роста зоны осаждения продуктов расплава на поверхности реза при сниже-

нии энергетических и гидродинамических характеристик процесса, проявляющихся при уменьшении тока резки и скорости обработки (рисунок 3.11) [86].



Рисунок 3.11 – Увеличение зоны осаждения расплава на поверхности реза нержавеющей стали 12X18H10Т при уменьшении тока и скорости резки ($I = 26 \text{ А}$, $V = 0,9 \text{ м/мин}$)

Низкая теплопроводность нержавеющей стали обуславливает высокую чувствительность качества реза к энергетическим параметрам плазменного раскроя. В связи с этим, наряду с установлением взаимосвязи качества реза со скоростью обработки, необходимо оценить и влияние тока резки. Так как максимальное значение тока определяется типоразмером сопла, то его изменение возможно лишь в меньшую сторону. Это ограничение и определило диапазон варьирования параметром от $I = 26 \text{ А}$ до $I = 30 \text{ А}$.

Увеличение силы тока при тонкоструйной плазменной резке нержавеющей стали 12X18H10Т приводит к снижению шероховатости поверхности и уменьшению количества грата на нижней кромке реза (рисунки 3.12, 3.13).

Увеличение значения тока ведет к снижению участка осаждения расплава. Так при максимальном значении тока ($I = 30 \text{ А}$) отмеченный участок рельефа на поверхности реза практически отсутствует (рисунок 3.13, в).

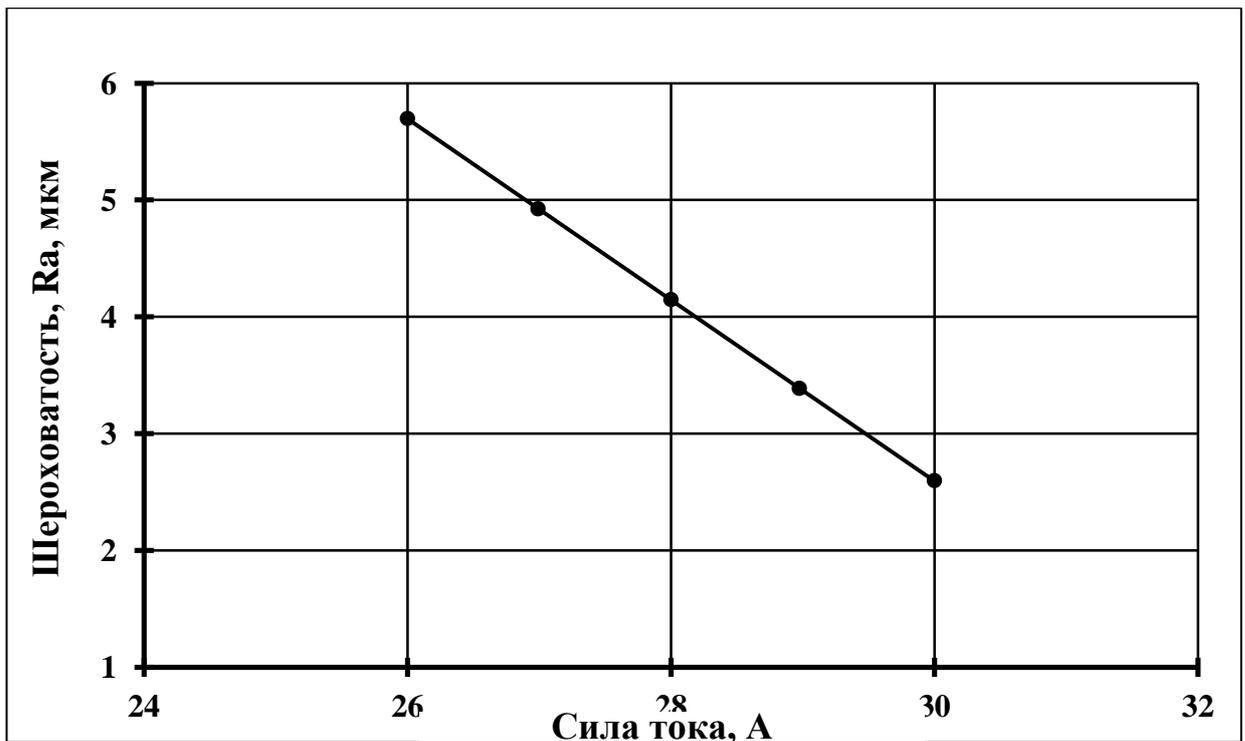


Рисунок 3.12 – Влияние силы тока на шероховатость поверхности реза стали 12X18H10T ($V = 1,1$ м/мин)

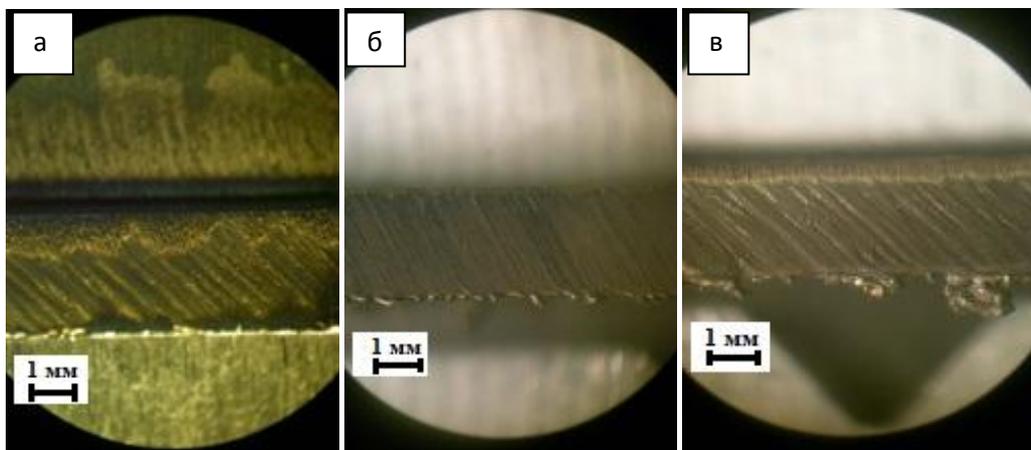


Рисунок 3.13 – Морфология поверхности реза нержавеющей стали 12X18H10T при различной силе тока:

а - $I = 26$ А; б - $I = 28$ А; в - $I = 30$ А; $V = 1,1$ м/мин

Как и при обработке конструкционных углеродистых сталей, увеличение скорости обработки нержавеющей стали ведет к росту шероховатости в исследуемом диапазоне токов резки (рисунок 3.14).

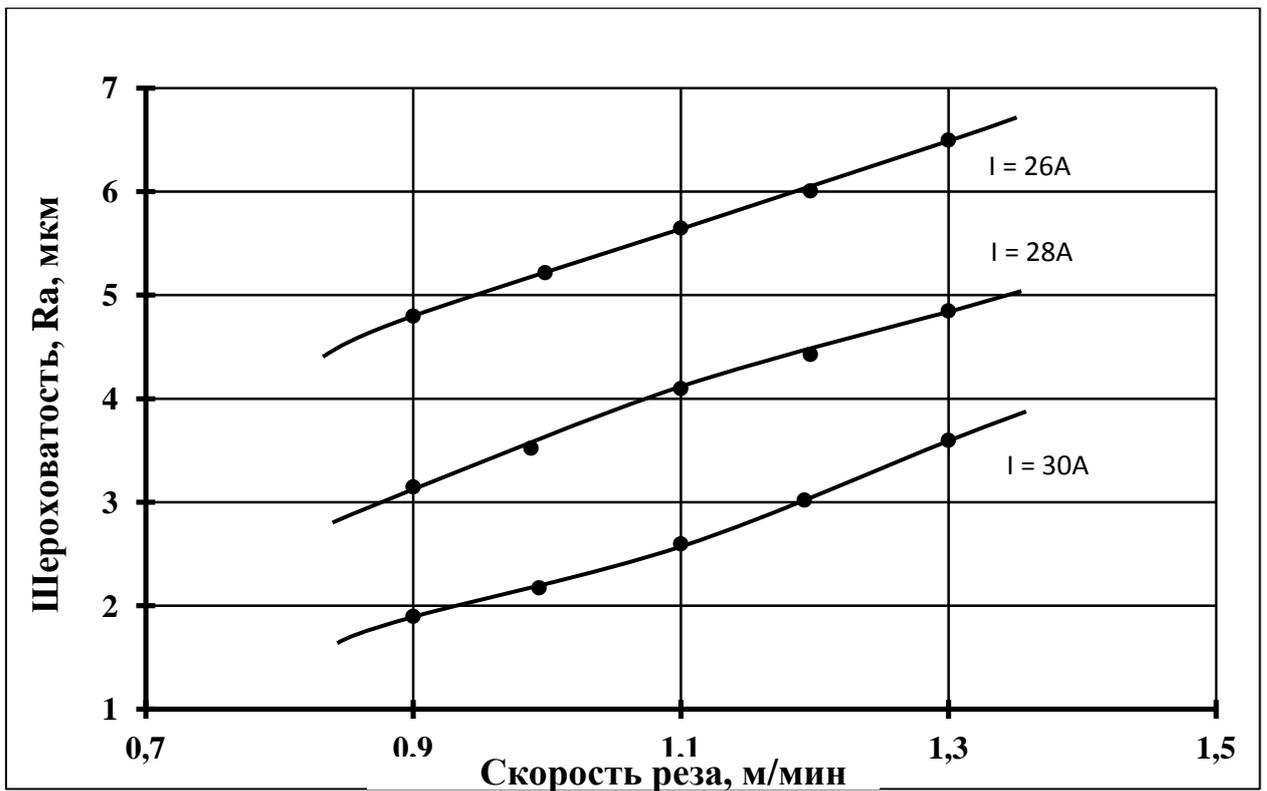


Рисунок 3.14 – Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности реза нержавеющей стали 12X18H10T

Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности реза имеет определенное противоречие. Несмотря на то, что снижение скорости реза ведет к появлению и росту участка осаждения элементов расплава на рельефе поверхности реза, ее шероховатость при этом снижается. Этот факт можно объяснить тем, что морфология поверхности реза без следов расплава имеет грубые риски, которые заполняются расплавом, и шероховатость поверхности в целом снижается [86].

Изучение влияния изменения скорости реза на геометрическую точность реза нержавеющей стали показало на аналогичное поведение зависимости, отмеченное для конструкционных сталей.

3.2.2 Алюминий А5М и медь М1

Параметры технологических схем для обработки алюминиевых сплавов, представленные на рисунках 3.5 и 3.6, могут рассматриваться как обоб-

щенные режимные области. Для установления оптимальных режимов раскроя сплава конкретной марки, в частности, алюминия А5М, в определенном состоянии поставки (листовой прокат) необходимо проведение экспериментальных исследований с оптимизацией обработки по критериям качества реза.

Принимая во внимание толщину листового проката (3 мм) алюминия и следуя рекомендациям выбора технологических схем (рисунок 3.5) для экспериментов по оптимизации качества реза наиболее подходящей оказывается схема Ni – Focus с токовым режимом $I = 35$ А на рекомендуемой скорости раскроя 1,2 м/мин. При этом в качестве режущего газа использован воздух с давлением 5 бар и расходом 30 условных единиц шкалы прибора, а завихряющего – азото-водородная смесь в соотношении 95/5 % с давлением 6 бар и расходом 75 единиц [87].

Как отмечалось ранее, для оптимизации качества реза в рамках выбранной технологической схемы наиболее приемлемым режимным параметром является скорость обработки. На основании предварительных экспериментов был определен диапазон ее варьирования, который составлял 1,0 – 1,4 м/мин.

Экспериментальные исследования по раскрою алюминия марки А5М с использованием выбранной технологической схемы показали на образование грата на нижней кромке реза во всем исследованном диапазоне скоростей (рисунок 3.15).

Образование грата на кромке реза можно объяснить действием нескольких факторов. Во первых, граатообразование при термических методах раскроя во многом определяется эффективностью удаления газодинамическими потоками продуктов расплава из канала реза. В основном это зависит от рационального сочетания таких параметров плазмообразующего и завихряющего газов, как давление и расход. Во вторых, эффективность истечения продуктов расплава из зоны реза во многом определяется его вязкостью. Так, движение реальных расплавов сопровождается возникновением сил трения

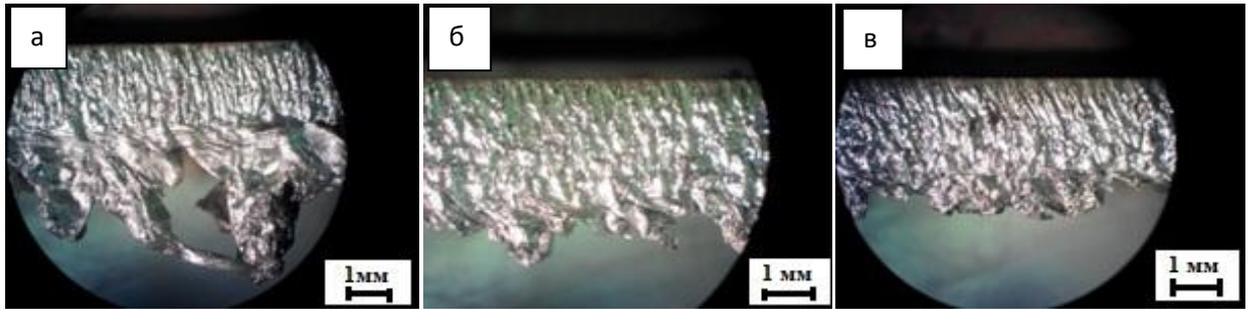


Рисунок 3.15 – Морфология поверхности реза алюминия А5М и формирование грата на нижней кромке при обработке на скоростях:

а – $V = 1,0$ м/мин; б - $V = 1,2$ м/мин; в - $V = 1,4$ м/мин

между слоями жидкости. Известно, что отношение сил трения к единице площади пропорционально градиенту скорости перемещения слоев. Коэффициент пропорциональности является характеристикой конкретного расплава в определенных температурных условиях и называется коэффициентом динамической вязкости [93].

Несмотря на то, что в интервале температур плавления ($\sim 700^\circ\text{C}$) расплав алюминия имеет меньшее значение коэффициента динамической вязкости (2,9 мПа·с) по сравнению с остальными модельными материалами (4,5 – 6,0 мПа·с – для широкого диапазона сталей в интервале температур плавления $1480 - 1680^\circ\text{C}$; 3,12 мПа·с – для меди при температуре 1200°C), характер течения расплава по каналу реза будет определяться значением его кинематической вязкости. Последняя определяется как отношение коэффициента динамической вязкости к плотности расплава. Учитывая, что алюминий из всех исследуемых материалов обладает наименьшей плотностью, значение кинематической вязкости оказывается максимальным ($1,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с для алюминия; $(0,64 - 0,85) \cdot 10^{-6}$ м²/с – для сталей; $0,35 \cdot 10^{-6}$ м²/с – для меди) [93]. Вероятно, этим можно объяснить разницу в параметрах плазмообразующих и завихряющих газов в аналогичных технологических схемах (Hi – Focus) с одинаковым токовым режимом ($I = 35$ А) для раскроя алюминиевых сплавов (рисунок 3.5) и углеродистых сталей (рисунок 3.1). Если параметры режущих газов по давлению и расходу (5 бар/30 усл. ед. – для алюминиевых сплавов,

5 бар/25 усл. ед. – для сталей) практически совпадают, параметры завихряющихся газов ощутимо отличаются (6 бар/75 усл. ед. – для алюминиевых сплавов, 5 бар/30 - 45 усл. ед. – для сталей). Увеличенное давление и повышенный расход завихряющегося газа при раскросе алюминиевых сплавов, вероятно, и предназначены для компенсации сил трения, связанных с повышенной кинематической вязкостью расплава алюминия.

Третьей вероятной причиной, и возможно, определяющей в повышенном гратообразовании при раскросе алюминия является образование тугоплавких оксидов алюминия при взаимодействии его расплава с растворенным кислородом воздуха, используемого в данной технологической схеме в качестве плазмообразующего газа. Наличие подобного рода оксидов в расплаве способствует повышению его вязкости и затруднению в полном удалении из канала реза.

Наличие оксидов алюминия в расплаве требует экспериментального подтверждения, что будет представлено в соответствующем разделе работы.

Анализ экспериментальных результатов (рисунок 3.15) свидетельствует об увеличении количества грата при снижении скорости обработки. Это можно объяснить некоторым увеличением объема жидкой фазы за счет расширения канала реза на малых скоростях и соответствующим ослаблением газодинамических потоков.

Количественное соотношение геометрии параметров реза алюминия в зависимости от скорости обработки показано на рисунке 3.16.

Снижение скорости обработки приводит к расширению канала как на входе, так и на выходе плазменной дуги, при этом угол наклона реза меняется незначительно (с $9,1^\circ$ до $9,3^\circ$).

Таким образом, наиболее приемлемые значения скорости раскроса алюминия марки А5М находятся в диапазоне 1,2 – 1,4 м/мин как с позиций уменьшения количества грата, так и формирования минимальной ширины реза. Дальнейшее повышение скорости обработки нецелесообразно, так как на определенном уровне произойдет непрорез материала [87].

Максимальное исключение грата при раскрое алюминиевых сплавов следует ожидать при замене плазмообразующего газа в исследуемой схеме с воздуха на инертный газ, что позволит исключить образование окислов в расплаве.

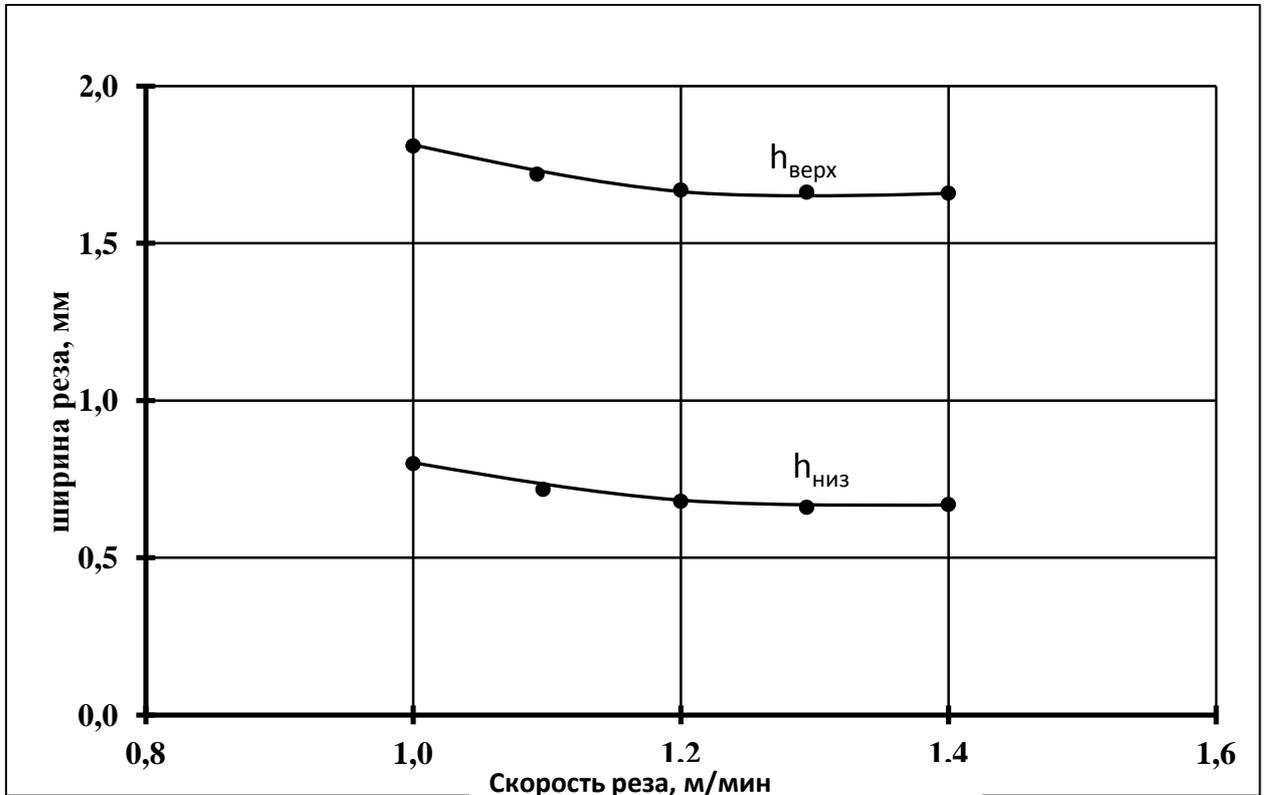


Рисунок 3.16 – Зависимость ширины реза от скорости обработки алюминия A5M: $h_{\text{верх}}$ – ширина реза по верхним кромкам; $h_{\text{низ}}$ – ширина реза по нижним кромкам

Неблагоприятные условия истечения продуктов расплава алюминия из канала реза определяют низкое качество его поверхности, что выражается уровнем шероховатости ($R_a = 12,1$ мкм) и отражается характером микрогеометрии, представленной на рисунке 3.17.

Если для обработки углеродистых и нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов известны рекомендуемые технологические схемы с токовыми характеристиками, составом газовых сред, их параметрами, соответствием скорости обработки предполагаемой толщине реза, то для раскроя меди и ее сплавов нет конкретных данных по назначению режимов в рамках определенных технологических схем. Существуют только общие рекомендации по

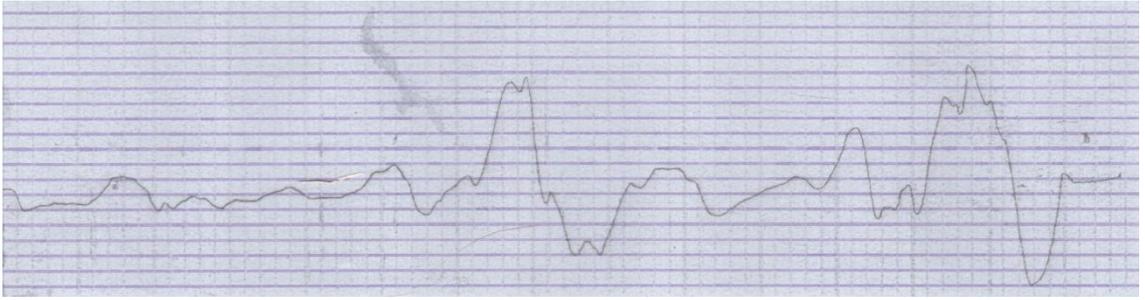


Рисунок 3.17 – Профилограмма поверхности реза алюминия А5М при раскрое по технологической схеме Ni – Focus для алюминиевых сплавов:

($I = 35 \text{ А}$, $V = 1,4 \text{ м/мин}$); В.У. = 500; Г.У. = 50

их выбору из ряда технологических схем, предназначенных для раскроя углеродистых сталей (рисунки 3.1, 3.3) [88].

Принимая во внимание то, что выбранная для экспериментов толщина реза составляет 2 мм, соответствующей технологической схемой следует признать схему Ni-Focus с токовым режимом $I = 35 \text{ А}$. В качестве плазмообразующего газа используется кислород, а завихряющего – смесь кислорода и азота. Диапазон рекомендуемых скоростей соответствует $V = 1,3 - 1,7 \text{ м/мин}$.

Анализ морфологий поверхностей реза, представленных на рисунке 3.18, свидетельствует о хорошем качестве раскроя без каких-либо следов осаждения элементов расплава. Это объясняется низким значением динамической и кинематической вязкости расплава меди и достаточными газодинамическими потоками для его удаления из канала реза.

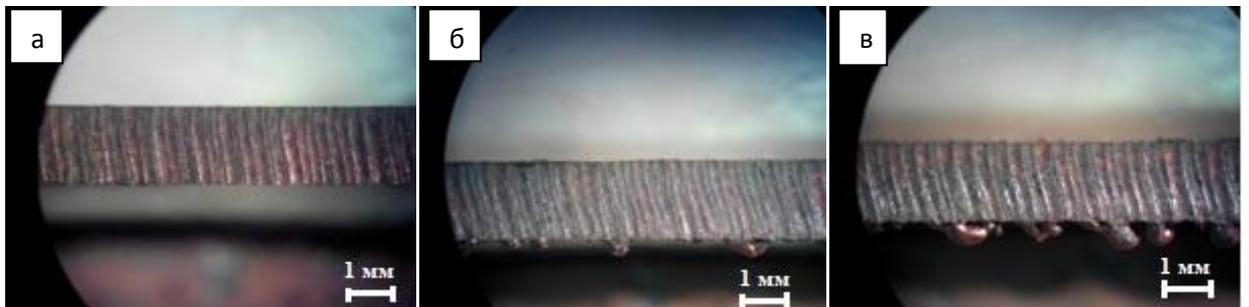


Рисунок 3.18 – Морфология поверхности реза меди М1 при разных скоростях обработки: а – $V = 1,3 \text{ м/мин}$; б – $V = 1,5 \text{ м/мин}$; в – $V = 1,7 \text{ м/мин}$

Повышение скорости реза до 1,7 м/мин приводит к образованию определенного количества грата на нижней кромке реза, который легко удаляется.

Анализ точности реза при раскросе меди показал на формирование определенной конусности, которая выражается разницей в ширине реза на верхних и нижних его кромках (рисунки 3.19, 3.20).

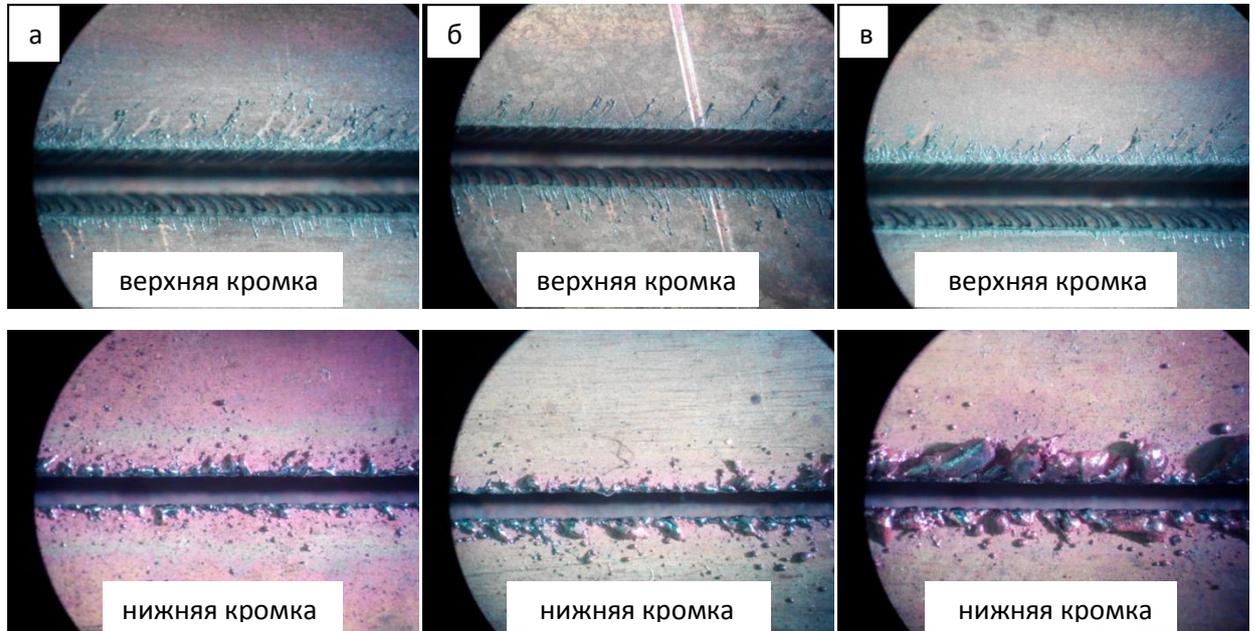


Рисунок 3.19 – Внешний вид реза по верхним и нижним кромкам:

а – $V = 1,3$ м/мин; б – $V = 1,5$ м/мин; в – $V = 1,7$ м/мин

Анализ результатов экспериментальных данных по раскросу меди марки М1 показал на хорошее качество реза без следов налипания продуктов расплава после обработки в исследованном диапазоне скоростей. Оптимальной скоростью реза является $V = 1,3$ м/мин, характеризующаяся практически отсутствием грата на нижней кромке реза. Значительную конусность реза можно объяснить разной эффективностью теплопередачи от плазменной дуги обрабатываемому материалу в верхней и нижней части ее столба при высокой теплопроводности меди [88].

Количественная оценка качества поверхности реза представлена профилограммой на рисунке 3.21, а топография – на рисунке 3.22.

Сравнение поверхности реза алюминия А5М (рисунок 3.15) и меди М1 (рисунок 3.18) указывает на различие их морфологий. Так, поверхность реза

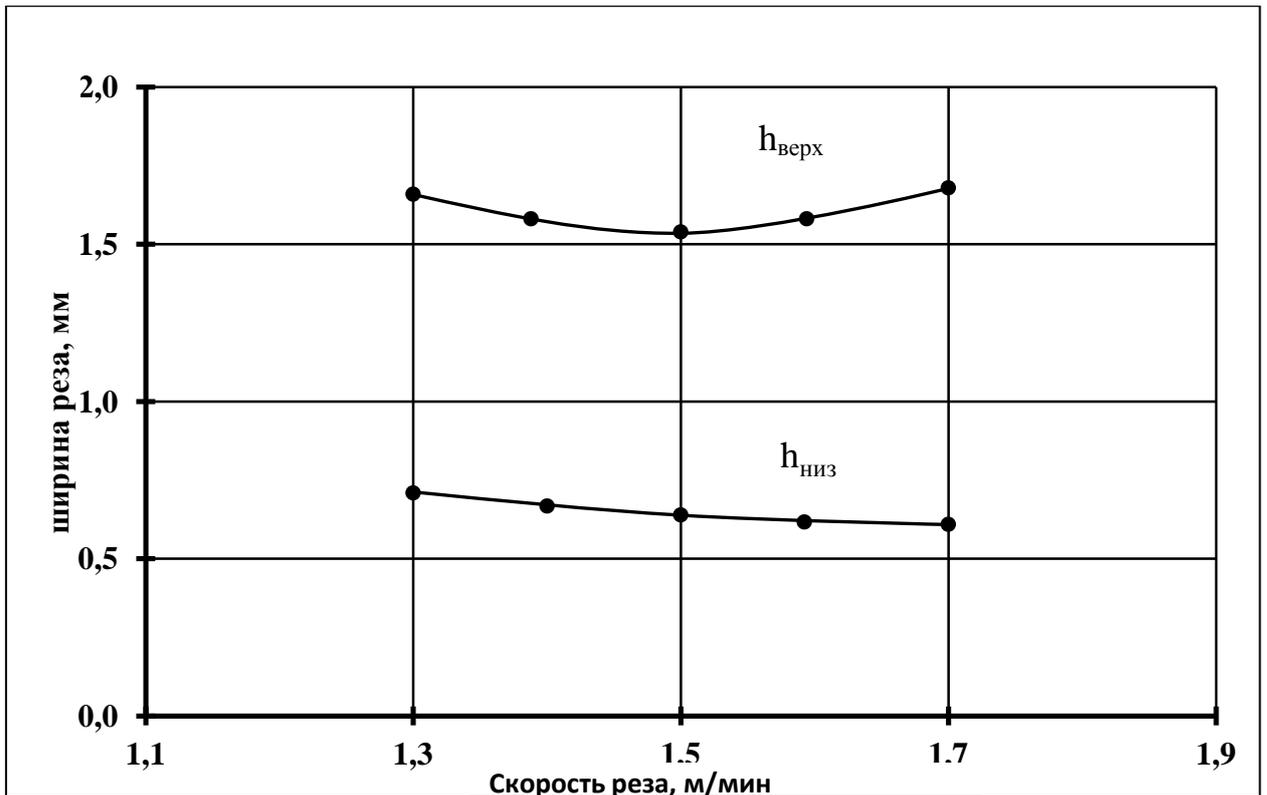


Рисунок 3.20 – Зависимость ширины реза меди М1 от скорости обработки:
 $h_{\text{верх}}$ – ширина реза по верхним кромкам; $h_{\text{низ}}$ – ширина реза по нижним кромкам

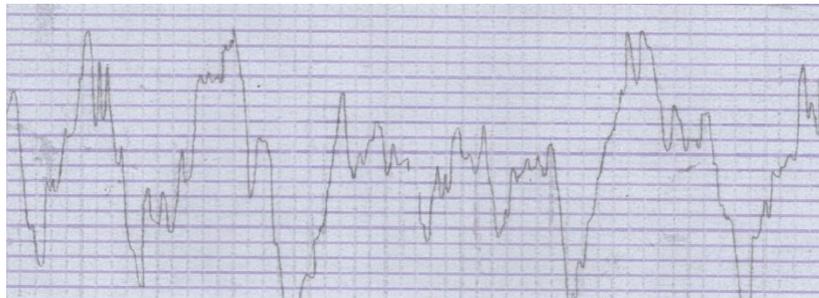


Рисунок 3.21 – Профилограмма поверхности реза меди М1 при раскросе по технологической схеме Ni – Focus для углеродистых сталей:
 $(I = 35 \text{ А}, V = 1,3 \text{ м/мин}); В.У. = 2000; Г.У. = 50$

меди можно считать классической для термических методов разделительной резки, представляющей собой чередование следов взаимодействия плазменной дуги с обрабатываемым материалом. На поверхности реза отсутствуют следы осаждения продуктов расплава и их скопления на нижних кромках ре-

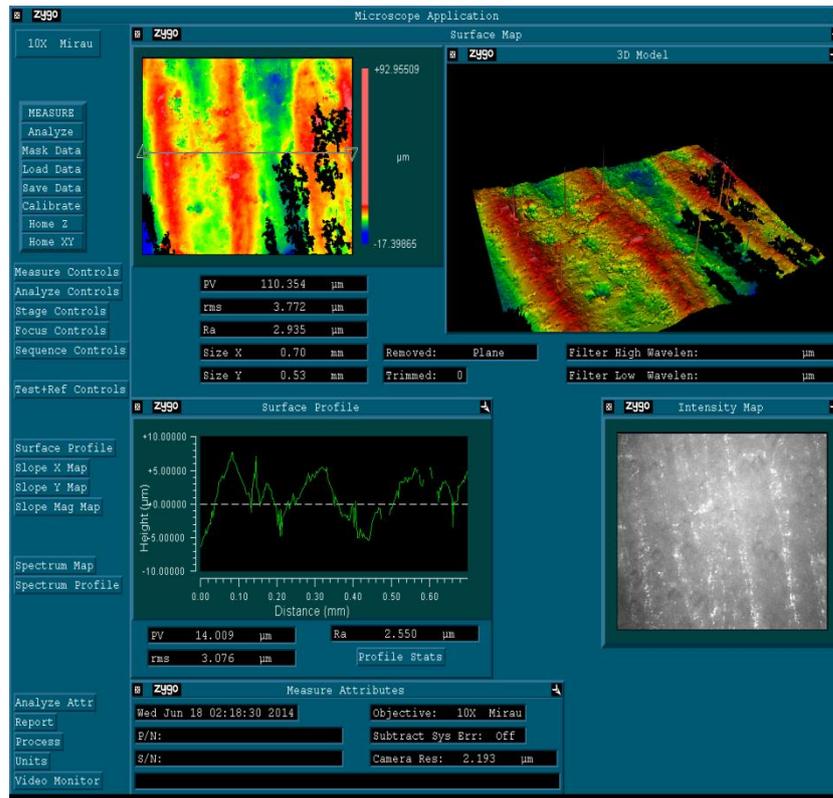


Рисунок 3.22 – Топография поверхности реза меди М1 при раскрое по технологической схеме Ni – Focus для углеродистых сталей:

$$(I = 35 \text{ A}, V = 1,3 \text{ м/мин})$$

за в виде грата. Это свидетельствует о действии в канале реза газодинамических потоков, достаточных для полного удаления из него продуктов расплава. Этому способствует низкая кинематическая вязкость расплава меди. На поверхности реза алюминия (рисунок 3.15) только в верхней его части просматриваются элементы характерного для плазменного раскроя рельефа. Остальная поверхность реза плакирована элементами расплава, с образованием на нижних краях ошутимого грата. Объяснение механизма формирования подобной морфологии реза и возможные мероприятия по ее улучшению были рассмотрены выше.

Визуальное различие в характере рельефа поверхностей реза алюминия и меди подтверждается результатами профилографирования (рисунки 3.17 и 3.21). Если профилограмма поверхности реза меди (рисунок 3.21) и ее топограмма (рисунок 3.22) отражают ее рельеф в виде чередующихся бороздок с

шероховатостью $R_a = 5,98$ мкм, то профилограмма поверхности реза алюминия (рисунок 3.17) описывает микрогеометрию поверхности осажденного расплава с шероховатостью $R_a = 12,1$ мкм.

3.3 Выводы

1. Анализ технологических схем тонкоструйного плазменного раскроя листовых металлических материалов показал на перспективность их использования для обработки в широком диапазоне толщин реза (от 0,5 до 25 мм). Для раскроя углеродистых сталей в диапазоне малых толщин (0,5 – 8 мм) наиболее приемлема технологическая схема Ni – Focus на малых токах (20 – 50 А) с использованием в качестве плазмообразующего газа кислорода, а завихряющего – кислородо-азотной смеси. Данная схема обеспечивает качественный рез углеродистых сталей на скоростях от 0,6 до 5 м/мин.

Повышение давления и расхода кислорода в составе плазмообразующего газа до 2^x раз характеризует переход к технологической схеме Ni – Focus^{plus}, обеспечивающей раскрой углеродистых сталей толщиной от 3 до 30 мм на токовых режимах от 50 до 130 А. При этом достигается увеличение скорости реза на 20 – 25 % по сравнению со схемой Ni – Focus для сопоставимых токовых режимов.

Технологическая схема Ni – FocusF отличается использованием максимально возможных токов (130 А) в широком диапазоне толщин реза (6 -25 мм).

Использование кислорода во всех технологических схемах раскроя углеродистых сталей объясняется тем, что помимо расплава обрабатываемого материала энергией плазменной дуги в обработке задействован механизм кислородной резки.

2. Технологические схемы обработки легированных сталей Ni – Focus и Ni – FocusF отличаются от одноименных схем, используемых для углеродистых сталей, заменой плазмообразующего газа с кислорода на воздух (Ni

– Focus) и кислорода на аргоно-водородную смесь (Ni – FocusF). Также логична замена кислорода в составе завихряющего газа на водород. Исключение из состава газов кислорода связано с ограничением возможности образования в расплаве тугоплавких оксидов легирующих элементов обрабатываемого материала. Это привело бы к повышению вязкости расплава и ухудшению условий его удаления из канала реза.

Сравнение одноименных схем для обработки легированных и углеродистых сталей на сопоставимых токовых режимах показало на значительную разницу (до 1,5 – 2 раз) в скорости реза.

3. Для раскрытия алюминиевых сплавов на технологических схемах Ni – Focus и Ni – FocusF необходимо использование в качестве плазмообразующего газа воздуха (Ni – Focus) и водорода (Ni – FocusF). При схожести используемых газов в данных схемах при раскрытии легированных сталей и алюминия, в последнем случае, наблюдается увеличение скорости реза от 20 до 50 % (на сопоставимых токовых режимах), что объясняется более низкой температурой плавления алюминия.

4. Существующие технологические схемы могут быть рекомендованы для раскрытия меди и ее сплавов на режимах, характерных для обработки углеродистых сталей.

5. Назначение режимов в рамках определенной технологической схемы для обработки конкретной марки материала в состоянии поставки заключается в оптимизации скорости обработки по критериям качества реза – гратообразованию на кромках, отклонению реза от перпендикулярности и шероховатости поверхности.

Выявлено, что повышение скорости обработки углеродистых и легированных сталей в исследованном диапазоне приводит к снижению точности реза и ухудшению шероховатости его поверхности. При этом отмечено увеличение количества грата на малых скоростях обработки, что можно объяснить ослаблением газодинамических потоков в канале реза, ответственных за удаление расплава.

Изучение морфологии поверхности реза нержавеющей стали 12Х18Н10Т позволило выявить наличие в верхней его части участка осаждения части расплава. Неполное удаление расплава из канала реза можно объяснить повышением его вязкости, связанной с образованием в расплаве тугоплавких соединений легирующих элементов за счет их частичного окисления растворенным кислородом в неионизированной части воздуха, используемого в технологической схеме Ni – Focus. Установлен факт роста зоны осаждения продуктов расплава на поверхности реза при снижении энергетических и газодинамических характеристик процесса, проявляющихся при уменьшении тока и скорости резки.

6. Выявлены особенности раскрытия алюминия марки А5М, заключающиеся в образовании грата во всем исследованном диапазоне скоростей и осаждении продуктов расплава на поверхности реза. Это можно объяснить как максимальным значением кинематической вязкости алюминия (из ряда исследованных модельных материалов), так и образованием окислов. Наличие окислов в расплаве также повышает его вязкость, ухудшая условия удаления продуктов обработки из канала реза. Установлен диапазон оптимальных скоростей (1,2 – 1,4 м/мин) раскрытия алюминия А5М как с позиций уменьшения количества грата, так и формирования минимальной ширины реза.

7. Раскрытием проката меди марки М1 с использованием технологической схемы Ni – Focus на режимах обработки углеродистых сталей показал на достижение хорошего качества реза без следов осаждения расплава на его поверхности. Достижение максимальной скорости (1,7 м/мин) из исследованного диапазона приводит к появлению незначительного легкоудаляемого грата на кромках реза.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

Анализ технологических схем тонкоструйной плазменной резки позволяет выявить наиболее приемлемую для раскроя определенного класса материалов и назначить параметр токового режима в зависимости от толщины реза. В рамках выбранной технологической схемы необходима оптимизация скоростного режима по критериям точности, качества реза и производительности раскроя конкретной марки материала. Результаты решения этих вопросов при обработке мономатериалов представлены в предшествующих разделах работы.

Однако, остается открытой проблема в обработке биметаллических материалов как с позиций установления технологической схемы с определенным значением токового режима, выбора составов и параметров плазмообразующего и завихряющего газов, так и решения вопроса о том, с какой стороны биметаллического соединения производить раскрой. В связи с этим методика экспериментальных исследований предполагает простой перебор возможных вариантов обработки биметаллических композиций в виде: M1+M2 или M2+M1. При этом используемые технологические схемы плазменного раскроя в каждом варианте соответствуют обработке как одной (M1), так и другой (M2) составляющей биметаллической композиции.

4.1 Низкоуглеродистая сталь Ст3 + нержавеющая сталь 12X18H10T

Исследуемая композиция является соединением сваркой взрывом низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм и нержавеющей стали 12X18H10T толщиной 2 мм. Суммарная толщина сварного пакета составила 5 мм.

Принимая во внимание биметаллический характер композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» для ее раскроя возможен выбор технологической

схемы для обработки как конструкционных углеродистых (рисунки 3.1 –3.3), так и легированных сталей (рисунок 3.4). Так для раскроя пакета толщиной 5 мм можно рекомендовать следующие технологические схемы обработки конструкционных сталей:

- Ni – Focus на токовых режимах 35 и 45 А (рисунок 3.1);
- Ni – Focus^{plus} на токовом режиме 50 А (рисунок 3.2);
- Ni – FocusF на токовом режиме 130 А (рисунок 3.3).

Из обозначенных схем для изучения были выбраны две: Ni – Focus^{plus} с $I = 50$ А с рекомендуемой скоростью обработки $V = 1,75$ м/мин и Ni – FocusF с $I = 130$ А на скорости $V = 3,3$ м/мин.

Аналогично при выборе в качестве вариантов обработки из технологических схем раскроя легированных сталей возможны следующие варианты (рисунок 3.4):

- Ni – Focus на токовом режиме 45 А с рекомендуемой скоростью обработки $V = 1,3$ м/мин;
- Ni – FocusF на токовом режиме 130 А с $V = 2,45$ м/мин.

Несмотря на привлекательность технологических схем Ni – FocusF с токовым режимом $I = 130$ А, обеспечивающих раскрой на максимальных скоростях, от них следует отказаться. Так экспериментальные исследования подтвердили неудовлетворительное качество реза (рисунок 4.1) при использовании данной технологической схемы, как для конструкционных, так и легированных сталей независимо от того, с какой стороны биметалла производился рез.

Плохое качество реза характеризуется значительным гратом на нижней кромке, удалить который возможно лишь при последующей механической обработке. Данный факт можно объяснить тем, что на максимальном токовом режиме формируется значительная (до 3,5 мм) ширина реза, а небольшая толщина пакета не обеспечивает формирования оптимальной схемы взаимодействия плазменной дуги с обрабатываемым материалом с наличием всех характерных участков плазменного столба (рисунок 1.9).

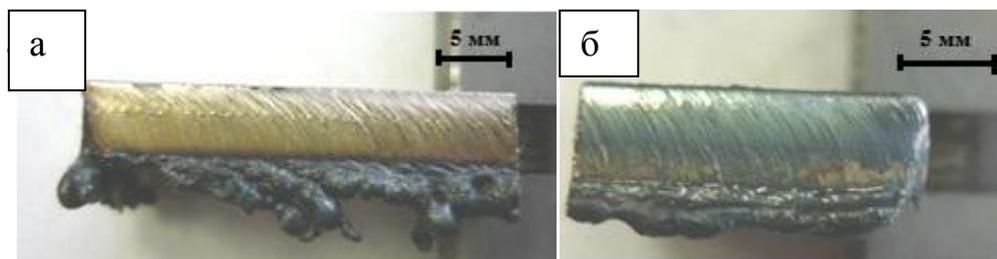


Рисунок 4.1 – Гратообразование на нижней кромке реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при обработке по технологической схеме $Ni - FocusF$ для легированных сталей при раскрое:
а – со стороны стали 12Х18Н10Т; б – со стороны стали Ст3

Использование «жестких» токовых режимов разделительной резки на малых толщинах пакета приводит к формированию плазменного столба с низким положением анодного пятна в канале реза. Последнее сопровождается соответствующим уменьшением, вплоть до исчезновения участка плазменной струи, ответственного за удаление продуктов расплава из зоны реза. Низкое положение анодного пятна приводит к интенсивному расплаву и перегреву материала в канале, его стеканию на нижнюю кромку реза. Отсутствие достаточных по интенсивности газодинамических потоков в широком канале реза не обеспечивает эффективного удаления расплава с кромок реза, что приводит к его свариванию с основным металлом.

Таким образом, высокопроизводительная технологическая схема $Ni - FocusF$ может быть рекомендована для резки малых толщин с необходимостью последующей механической обработки для обеспечения требуемой точности и качества.

В связи с этим для раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» использовались технологические схемы $Ni - Focus^{plus}$ с токовым режимом $I = 50$ А и $V = 1,75$ м/мин, рекомендованная для обработки углеродистых сталей и $Ni - Focus$ с $I = 45$ А и $V = 1,3$ м/мин – для легированных сталей [94].

4.1.1 Обработка на режимах раскроя легированных сталей

Как отмечалось выше, каждая из отмеченных технологических схем применялась для раскроя биметаллической композиции как со стороны низкоуглеродистой стали Ст3, так и нержавеющей - 12X18H10T.

На рисунке 4.2 представлено фото поперечного сечения реза при раскрое на различных скоростях биметаллической композиции со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Ni – Focus для легированных сталей.

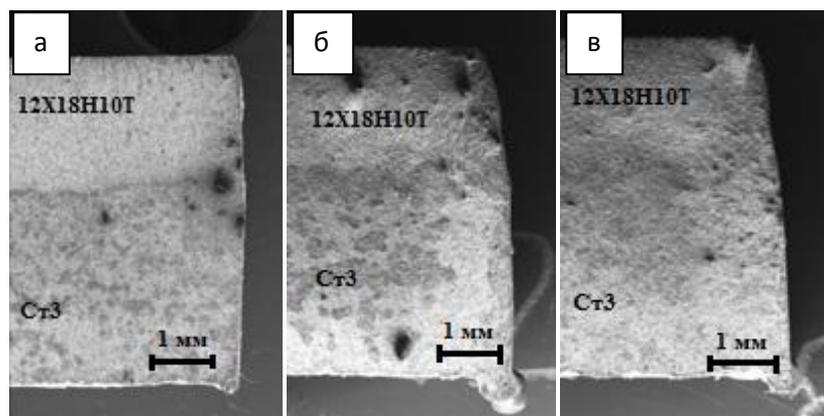


Рисунок 4.2 – Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при раскрое со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Ni – Focus с $I = 45$ А для легированных сталей:

а - $V = 1,1$ м/мин; б - $V = 1,3$ м/мин; в - $V = 1,5$ м/мин

Количественные показатели точности реза исследуемой композиции на отмеченных режимах представлены на рисунке 4.3.

Анализ полученных результатов позволяет предположить возможные механизмы формирования точности реза данной биметаллической композиции при различных скоростях обработки. Так незначительное отклонение реза от перпендикулярности на участке стали 12X18H10T ($\alpha_2 = +2,2^\circ$) на скорости обработки $V = 1,1$ м/мин (рисунок 4.2, а) можно объяснить малым значением коэффициента теплопроводности данного материала с одной стороны, а с другой – достаточным временем прогрева материала на всем участке в виду малой скорости движения канала реза [86, 91]. На нижнем участке компо-

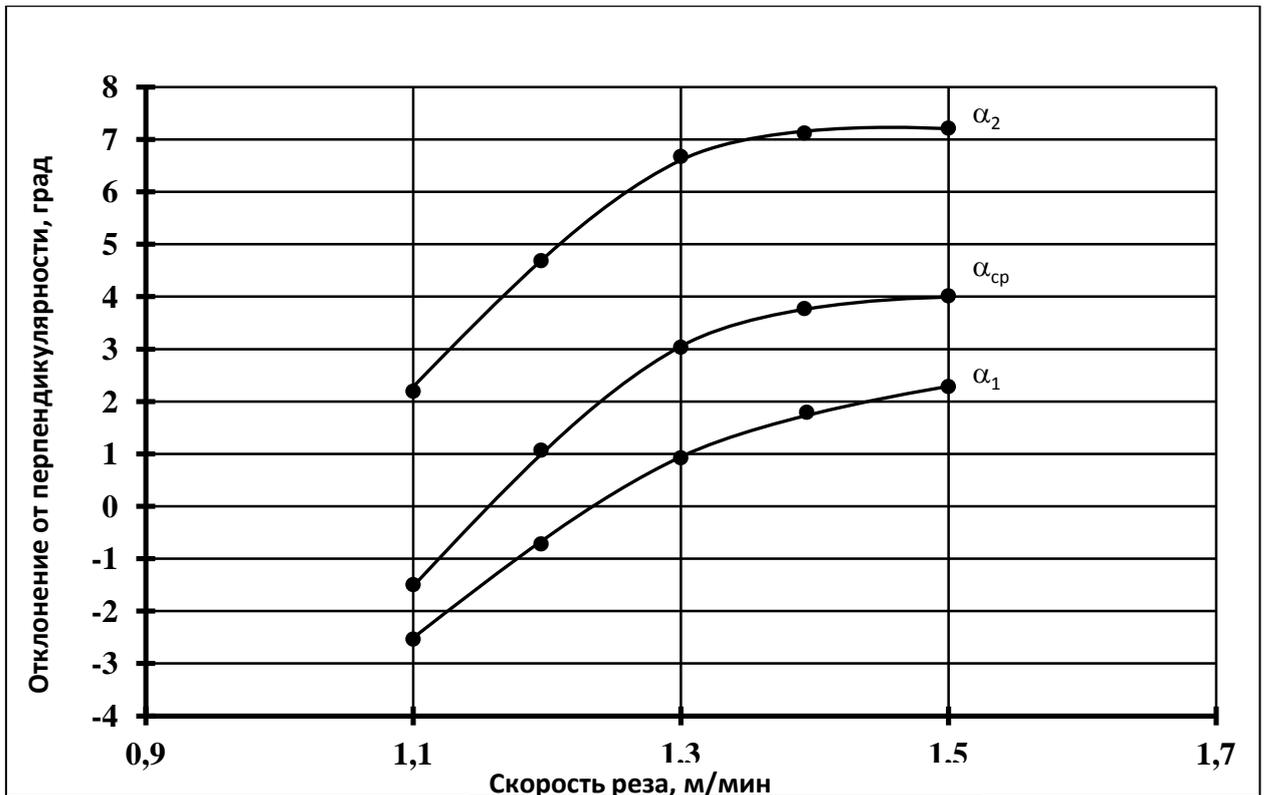


Рисунок 4.3 – Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали 12Х18Н10Т по технологической схеме Ni – Focus с $I = 45$ А для легированных сталей:

α_1 – отклонение от перпендикулярности реза составляющей сталь Ст3;

α_2 – отклонение от перпендикулярности реза составляющей сталь 12Х18Н10Т;

$\alpha_{ср}$ – среднее отклонение реза биметаллической композиции

зиции, представляющем низкоуглеродистую сталь (рисунок 4.2, а), наблюдается формирование обратного конуса ($\alpha_1 = -2,53^\circ$) с расширением зоны реза к низу. Вероятно, это связано с малой скоростью обработки и повышенным стоком тепла от нержавеющей составляющей к низкоуглеродистой вследствие значительной разницы в их коэффициентах теплопроводности.

Повышение скорости обработки до 1,3 м/мин исключает фактор излишнего перегрева расплава в зоне реза, формируя традиционную геометрию реза с уменьшением ширины реза к низу (рисунок 4.2, б) и обеспечивая, с

одной стороны, повышение точности реза на участке стали Ст3 ($\alpha_1 = 0,93^\circ$), а с другой, снижение ее на участке нержавеющей составляющей ($\alpha_2 = 6,68^\circ$).

Последующее увеличение скорости обработки до 1,5 м/мин сопровождается дальнейшим ухудшением точности реза на обоих участках композиции (рисунок 4.2, в).

На рисунке 4.3 представлена обобщенная характеристика точности реза композиции в целом как средний угол его наклона ($\alpha_{\text{ср}}$). Данная характеристика является условной, но в определенной степени может служить мерой точности реза слоистых композиций.

Анализ результатов раскроя исследуемой композиции на режимах обработки легированных сталей при резе со стороны стали 12Х18Н10Т показал, что наилучшие результаты по точности соответствуют скоростному режиму обработки $V = 1,2$ м/мин. При этом на нижнем участке композиции (сталь Ст3) наблюдается незначительный отрицательный угол отклонения от перпендикулярности ($\alpha_1 \sim -1^\circ$), при повышенном значении угла $\alpha_2 \sim 4^\circ$ на участке нержавеющей стали. Принимая во внимание то, что верхний участок по размерам меньше нижнего в 1,5 раза, средний угол отклонения реза можно условно принять равным $\alpha_{\text{ср}} \sim 1^\circ$. На исследованных скоростях обработки при данной технологической схеме наблюдается минимальное количество грата, с незначительным его увеличением при росте скорости раскроя.

Оценка топографии поверхности реза по характеристике шероховатости представлена на рисунке 4.4. В исследованном диапазоне скоростей обработки прослеживаются незначительные колебания шероховатости (от $Ra = 5,78$ мкм при минимальной скорости до $Ra = 8,74$ мкм – при максимальной). Колебания в значениях шероховатости, вероятно, объясняются различающимися условиями удаления жидкой фазы из канала реза.

Типичная профилограмма поверхности реза для исследуемых режимов плазменного раскроя представлена на рисунке 4.5, а ее топография – на рисунке 4.6.

Использование исследуемой технологической схемы для раскрытия композиции при обработке со стороны низкоуглеродистой стали позволило выявить несколько иной характер геометрии реза (рисунок 4.7).

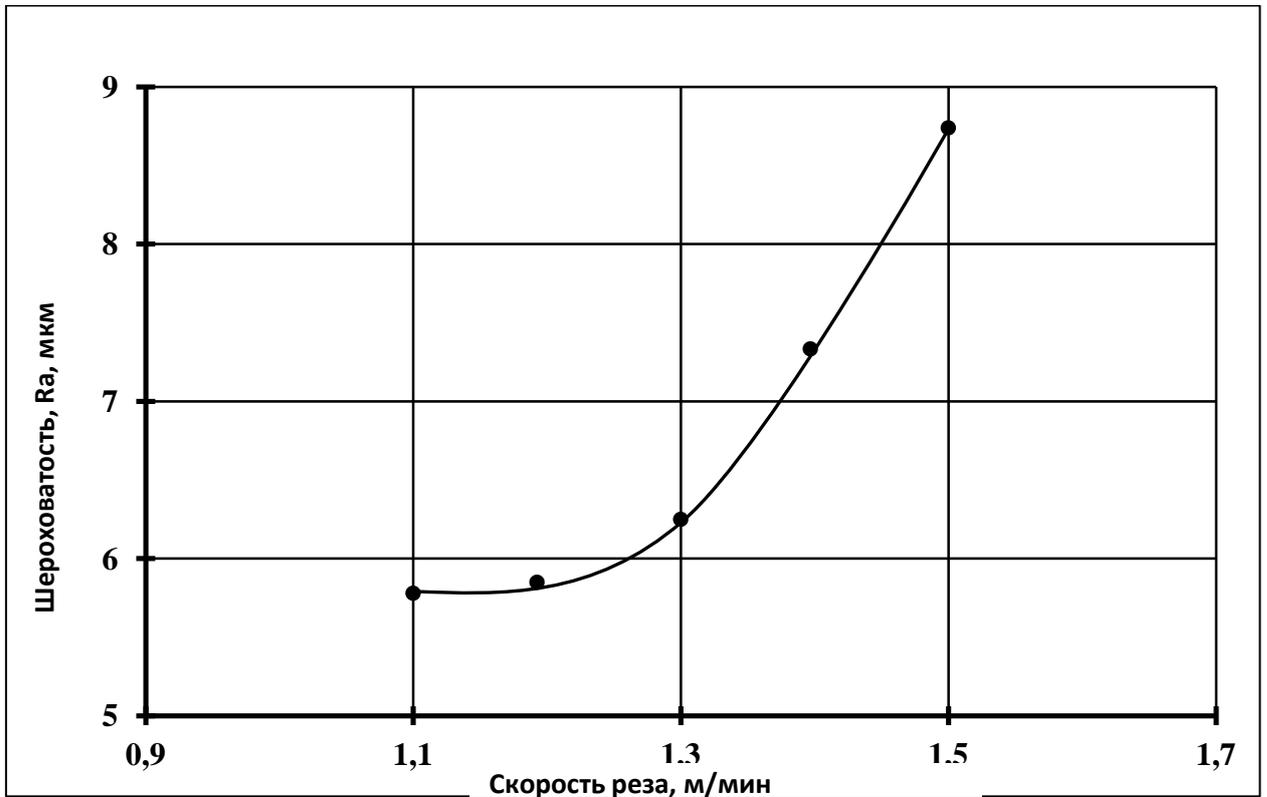


Рисунок 4.4 – Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое со стороны стали 12Х18Н10Т по технологической схеме Ni – Focus с $I = 45$ А для легированных сталей

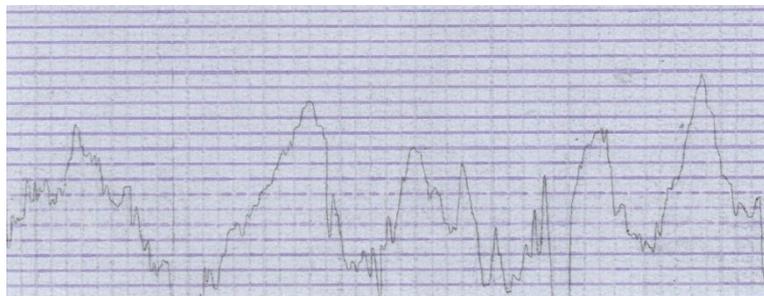


Рисунок 4.5 – Профилограмма поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Ni – Focus ($I = 45$ А, $V = 1,3$ м/мин); рез со стороны стали 12Х18Н10Т; В.У. = 2000; Г.У. = 50

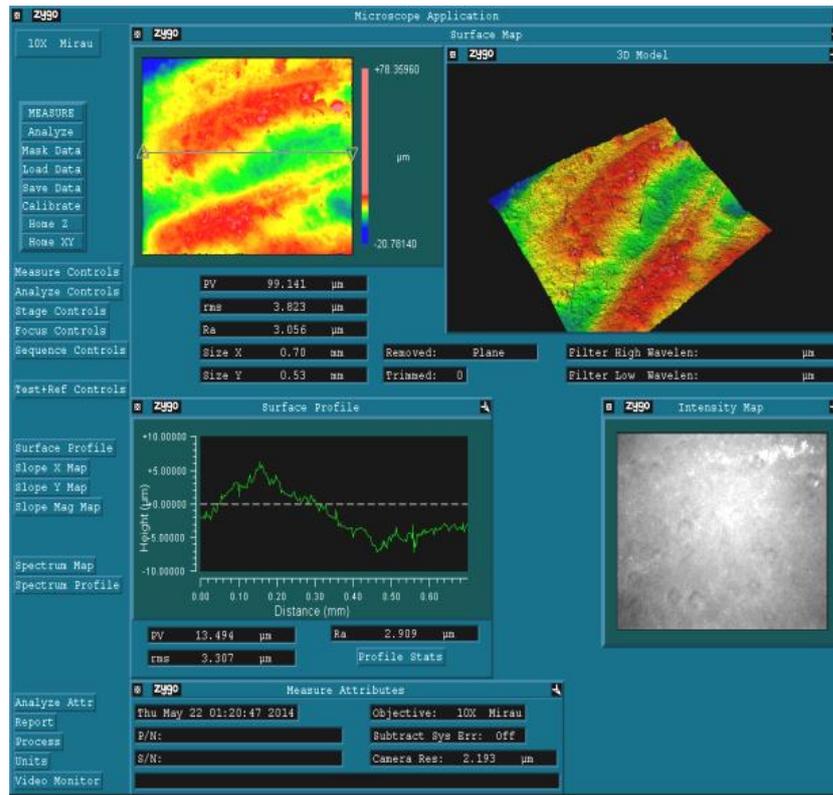


Рисунок 4.6 – Топография поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Ni – Focus ($I = 45$ А, $V = 1,3$ м/мин); рез со стороны стали 12Х18Н10Т

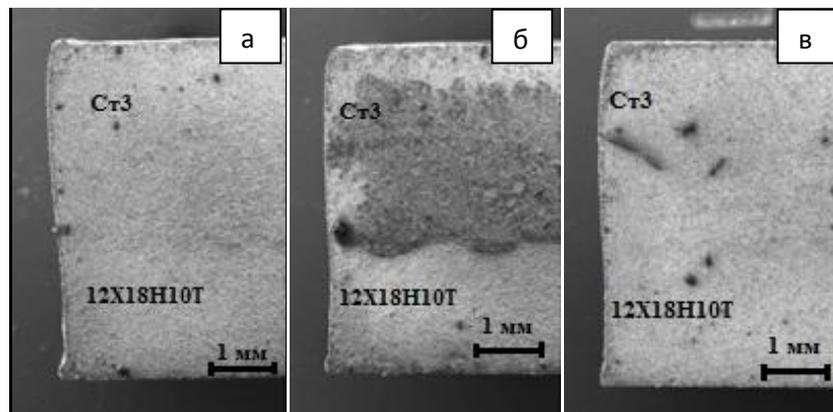


Рисунок 4.7 – Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме Ni – Focus с $I = 45$ А для легированных сталей: а – $V = 1,1$ м/мин; б - $V = 1,3$ м/мин; в - $V = 1,5$ м/мин

Изучение геометрии реза позволило выявить три характерных участка, имеющих приблизительно одинаковые размеры. Так первый участок в верх-

ней части пакета занимает $\sim 2/3$ толщины низкоуглеродистой составляющей и изменяет свое угловое положение от отрицательного значения ($\alpha_1 = -1,72^\circ$) для минимальной скорости обработки ($V = 1,1$ м/мин) до положительного ($\alpha_1 = +1,59^\circ$) – для максимальной скорости ($V = 1,5$ м/мин). Следующий за первым участком второй находится в переходной зоне сталь Ст3 – сталь 12X18Н10Т и имеет отрицательный угол наклона реза от $\alpha_2 = -4,99^\circ$ до $\alpha_2 = -3,98^\circ$ в исследованном диапазоне скоростей. Третий участок описывает геометрию реза на большей части нержавеющей составляющей. Характерным для данного участка является тот факт, что геометрия реза на нем является практически идеальной ($\alpha_3 = 0$) во всем диапазоне исследований. Влияние скорости обработки на точность геометрии реза на отмеченных участках в данной схеме исследований показано на рисунке 4.8. Здесь также приведена усредненная характеристика (α_{cp}) точности реза.

Если изменение α_{cp} для предыдущей схемы находится в пределах от $-1,49^\circ$ до $+4,02^\circ$, то для данной схемы α_{cp} колеблется от $-3,72^\circ$ до $-1,46^\circ$, т.е. рез всегда имеет расширение к низу. Вероятно, это связано с тем, что данный режим обработки не является оптимальным для раскроя конструкционных углеродистых сталей.

В данной схеме исследований также наблюдается минимальное количество легко отделимого грата на нижней кромке реза.

Качество поверхности реза является удовлетворительным и может быть проиллюстрировано результатами профилографирования (рисунки 4.9, 4.10).

Результаты по исследованию морфологии поверхности реза на комплексе для оценки топографии представлены на рисунке 4.11.

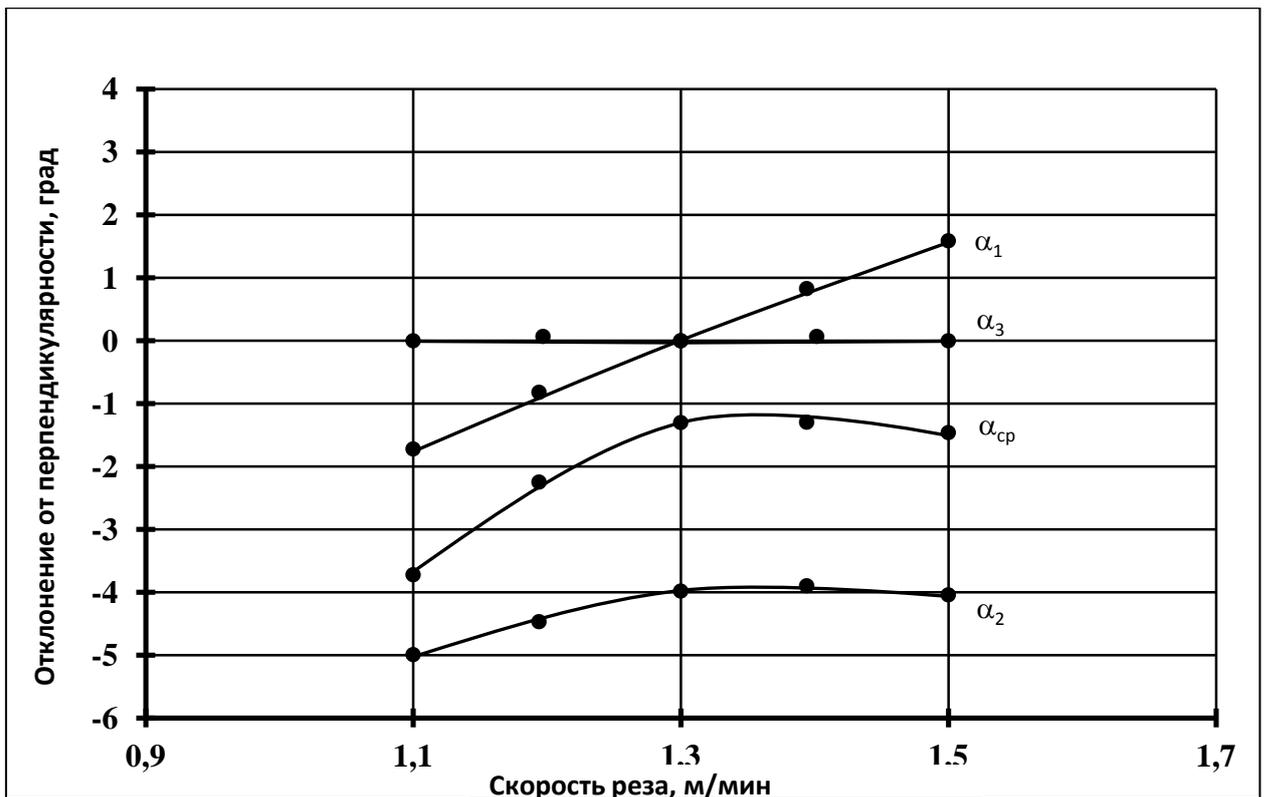


Рисунок 4.8 – Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрене со стороны стали Ст3 по технологической схеме Ni – Focus с $I = 45$ А для легированных сталей:
 α_1 – отклонение от перпендикулярности реза на первом участке;
 α_2 – отклонение от перпендикулярности реза на втором участке;
 α_3 – отклонение от перпендикулярности реза на третьем участке;
 $\alpha_{ср}$ – среднее отклонение реза биметаллической композиции

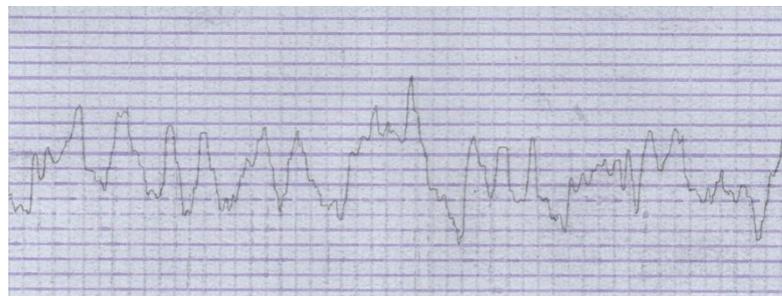


Рисунок 4.9 – Профилограмма поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Ni – Focus ($I = 45$ А, $V = 1,3$ м/мин); рез со стороны стали Ст3; В.У. = 2000; Г.У. = 50

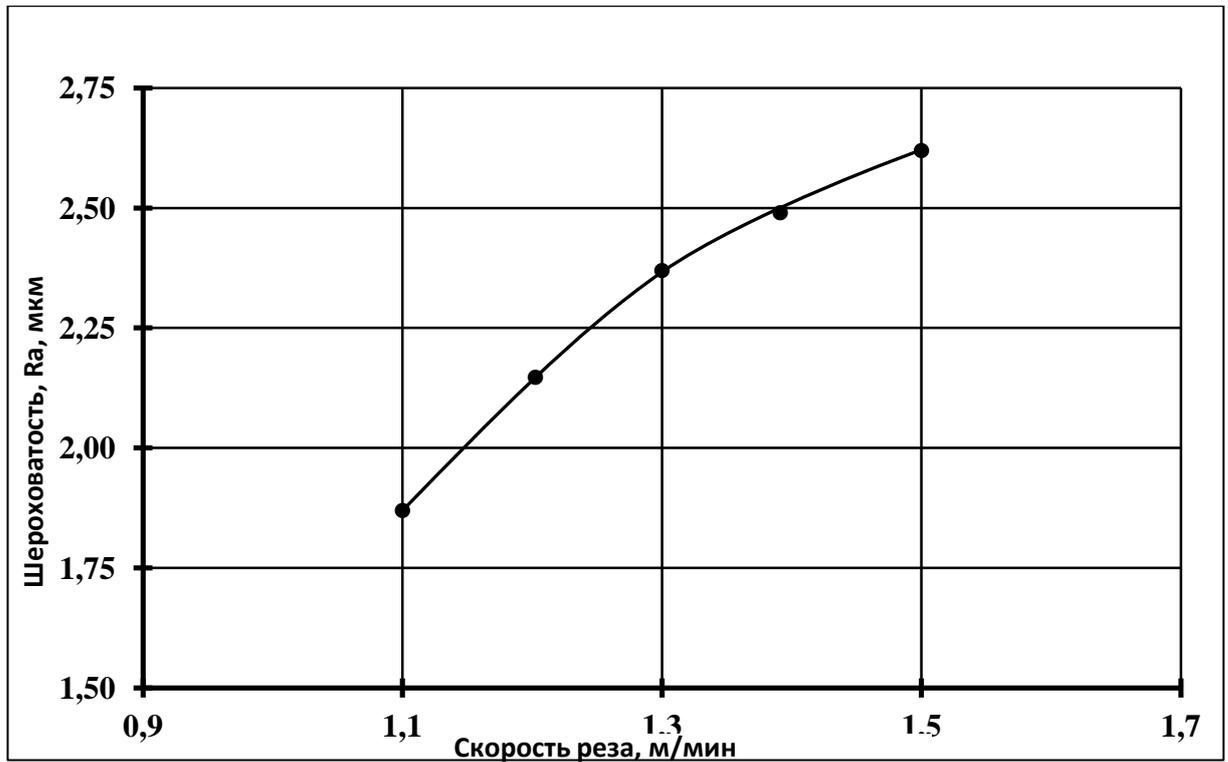


Рисунок 4.10 – Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскросе со стороны стали Ст3 по схеме Нi – Focus с $I = 45$ А для легированных сталей

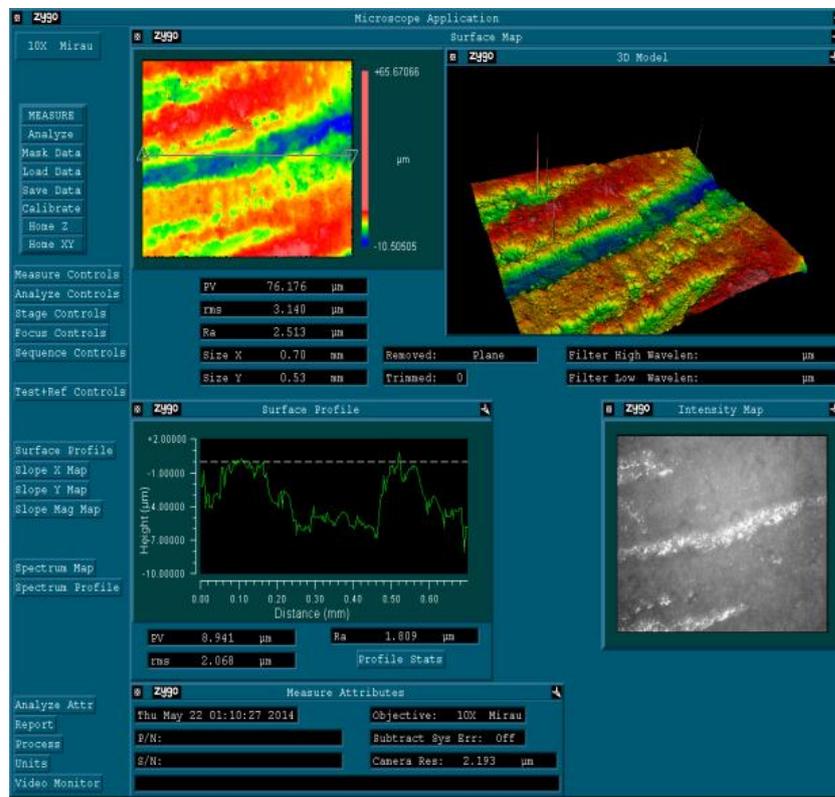


Рисунок 4.11 - Топография реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; схема Нi – Focus ($I = 45$ А, $V = 1,3$ м/мин); рез со стороны стали Ст3

4.1.2 Обработка на режимах раскроя конструкционных углеродистых сталей

Перед тем как приступить к анализу и обсуждению экспериментальных результатов по оптимизации реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на режимах раскроя, рекомендованных для обработки конструкционных углеродистых сталей, следует обратить внимание на повышенную скорость ($V = 1,75$ м/мин) реза при этой схеме по сравнению со скоростью ($V = 1,3$ м/мин) – для схемы обработки легированных сталей. При этом токовый режим для обеих схем сопоставим, и равнялся $I = 50$ А и 45 А, соответственно. Возможность обработки конструкционных углеродистых сталей на повышенных скоростях и характеризует технологическую схему $Ni - Focus^{plus}$. Следует иметь в виду, что данная схема пригодна только для раскроя углеродистых сталей, когда формирование реза осуществляется одновременно по двум механизмам – расплавление материала за счет передачи ему энергии от столба плазменной дуги и интенсивного окисления железа в зоне реза с последующим удалением оксида струей кислорода. Механизм кислородной резки углеродистых сталей подробно рассмотрен в разделе 1.3 работы. Для реализации схемы $Ni - Focus^{plus}$ для обработки данного класса сталей в качестве плазмообразующего газа используется кислород, а завихряющего – кислородо-азотная смесь при повышенных давлениях и расходах (по сравнению со схемой $Ni - Focus$), обеспечивающих достаточные по динамике газовые потоки для удаления увеличенных объемов расплавленного металла из зоны реза (рисунок 3.2) [94].

Исследование технологической схемы $Ni - Focus^{plus}$ по раскрою биметаллической композиции проводилось по принятой в исследованиях схеме: рез осуществлялся как со стороны нержавеющей, так и углеродистой составляющих.

Внешний вид поперечного сечения реза для различных скоростей обработки исследуемой биметаллической композиции показан на рисунке 4.12.

Рез производился с использованием технологической схемы Ni – Focus^{plus} со стороны нержавеющей составляющей.

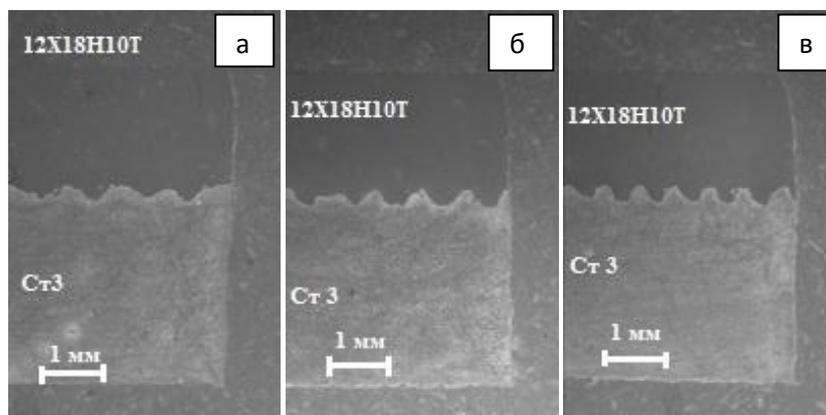


Рисунок 4.12 – Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при раскрое со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Ni – Focus^{plus} с $I = 50$ А для конструкционных углеродистых сталей: а – $V = 1,5$ м/мин; б - $V = 1,75$ м/мин; в - $V = 2,0$ м/мин

На рисунке 4.13 представлена зависимость отклонения реза от перпендикулярности от скорости обработки с оценкой точности, как на отдельных участках биметаллического соединения, так и усреднено по всему резу.

Исследование точности формообразования реза показывает, что в области низких скоростей реза формируется обратный конус с расширением реза к низу, что связано с излишним перегревом материала на низких скоростях и наличием окислительных реакций на участке углеродистой стали. Повышение скорости обработки до средних значений ($V = 1,75$ м/мин) исключает излишний расплав в нижней части биметалла, что обеспечивает повышение точности реза. Дальнейшее увеличение скорости вплоть до 2,0 м/мин приводит к значительному отклонению реза от перпендикулярности в верхней части образца на участке нержавеющей стали.

Анализ морфологии поверхности реза свидетельствует о плохой ее микрогеометрии (рисунок 4.14) со следами стоков расплава нержавеющей стали на нижнем участке углеродистой стали.

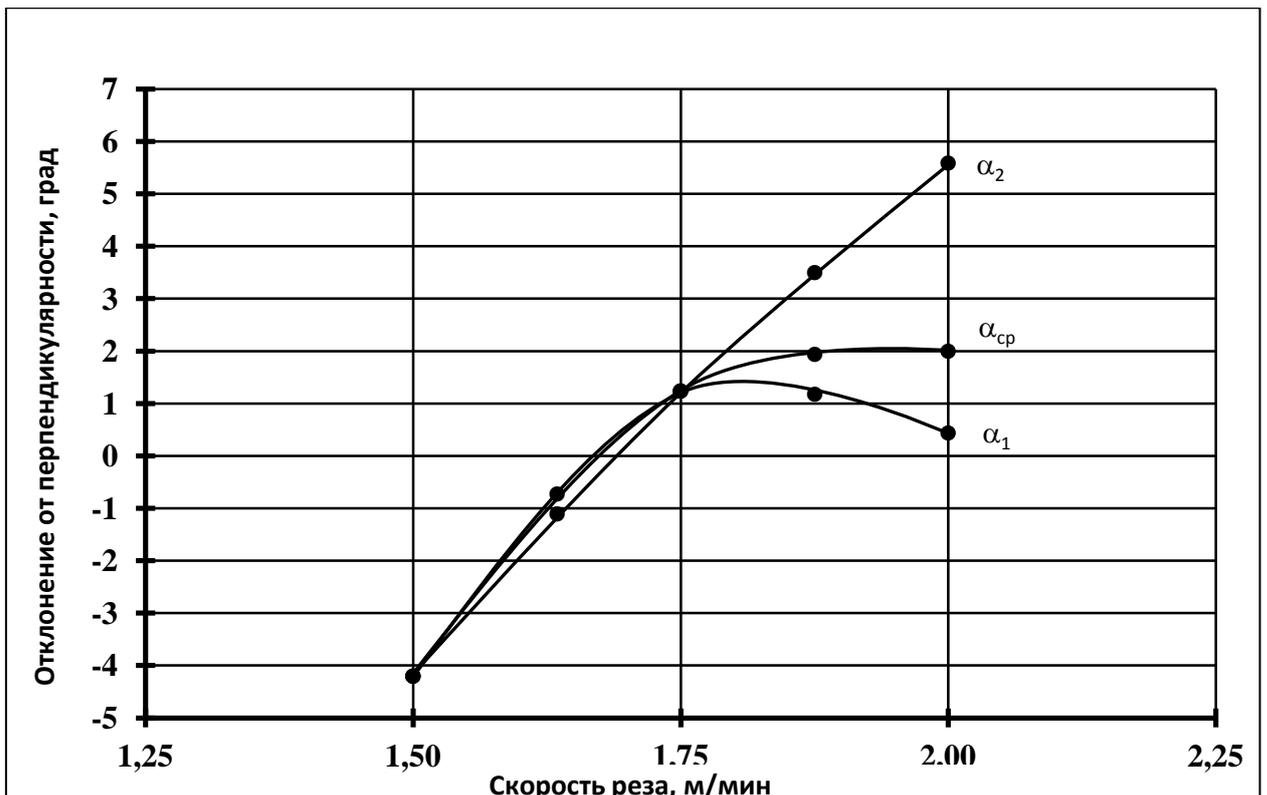


Рисунок 4.13 – Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали 12Х18Н10Т по технологической схеме Ni – Focus^{plus} с I = 50 А для углеродистых сталей:

α_1 – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь Ст3»;

α_2 – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь 12Х18Н10Т»;

$\alpha_{ср}$ – среднее отклонение реза от перпендикулярности биметалла

Реализация схемы Ni – Focus^{plus} для раскроя биметаллической композиции со стороны составляющей «сталь Ст3» в установленном диапазоне скоростей позволило выявить особенности в обеспечении точности реза (рисунки 4.15, 4.16).

Повышение скорости обработки ухудшает показатель точности реза как на участке отдельных составляющих биметалла, так и композиции в целом. Если на скорости $V = 1,5$ м/мин точность реза максимальна, то повышение скорости реза до 2 м/мин приводит к резкому ее ухудшению. Это, вероятно, связано с тем, что при повышении скорости обработки происходит смещение анодного пятна вверх по каналу реза и в нижней его части мощ-

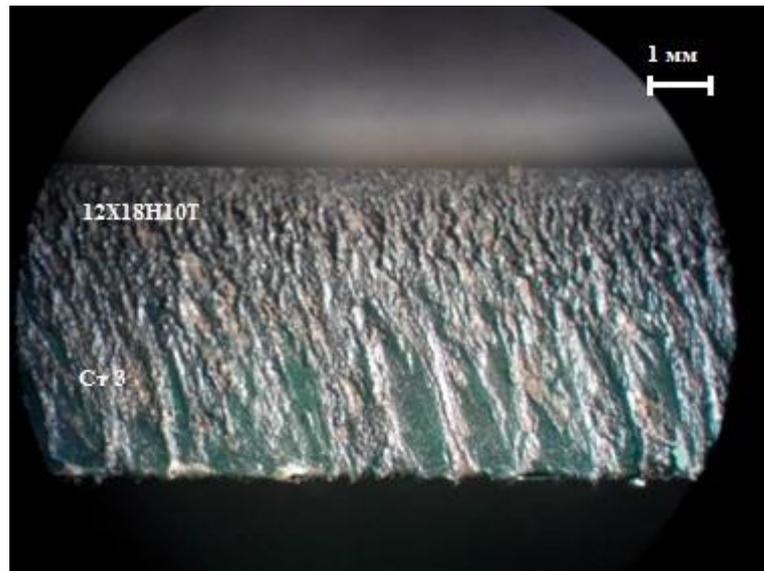


Рисунок 4.14 – Морфология поверхности реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при раскroe со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Ni – Focus^{plus} для углеродистых сталей

ность факела (рисунок 1.7) значительно ниже, чем на участках столба и анодного пятна. Это приводит к более интенсивному расплавлению в верхней части композиции и меньшему на участке нержавеющей стали. Более интенсивное расплавление на участке «сталь Ст3» также обеспечивается действием механизма кислородной резки.

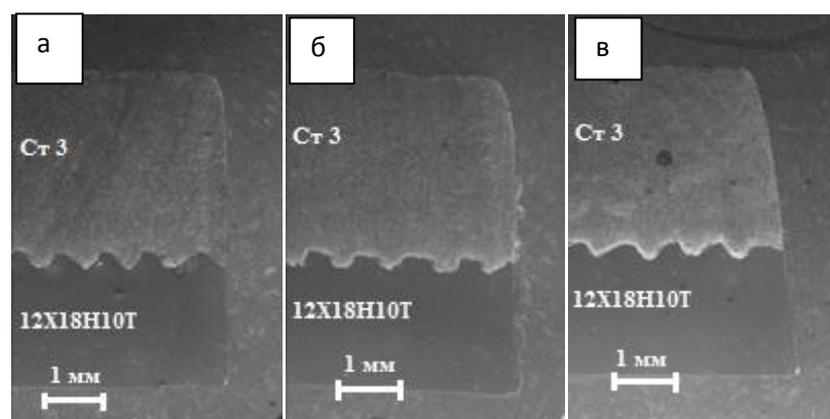


Рисунок 4.15 – Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при раскroe со стороны стали Ст3 по технологической схеме Ni – Focus^{plus} для углеродистых сталей:

а – $V = 1,5$ м/мин; б - $V = 1,75$ м/мин; в - $V = 2,0$ м/мин

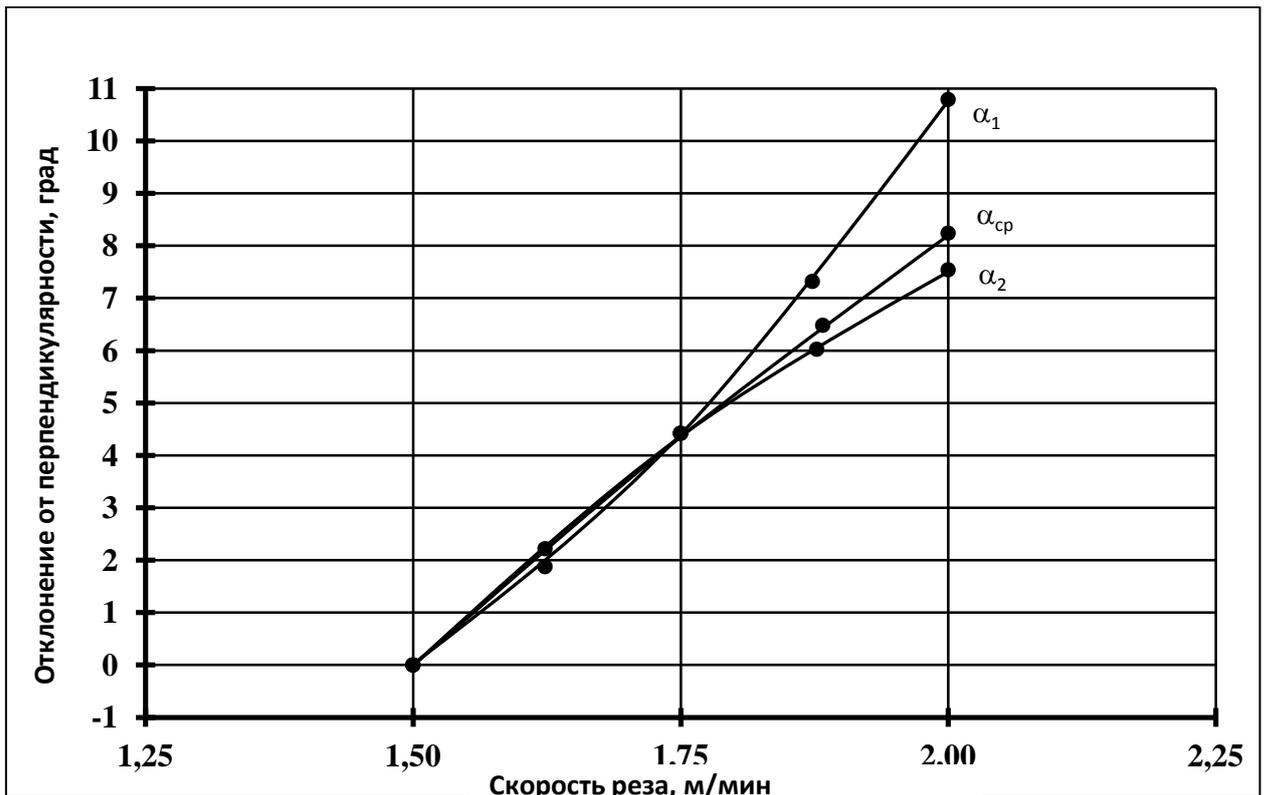


Рисунок 4.16 – Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме Ni – Focus^{plus} с I = 50 А для углеродистых сталей:

α_1 – отклонение реза от перпендикулярности на участке «сталь Ст3»;

α_2 – отклонение реза от перпендикулярности на участке «сталь 12Х18Н10Т»;

$\alpha_{ср}$ – среднее отклонение реза от перпендикулярности биметалла

Следует отметить, что раскрой биметаллической композиции по исследуемой схеме при резке с любой стороны не сопровождается образованием грата на нижней кромке реза.

Исследование качества поверхности реза также показало на низкое значение шероховатости и хорошую топографию (рисунки 4.17, 4.18).

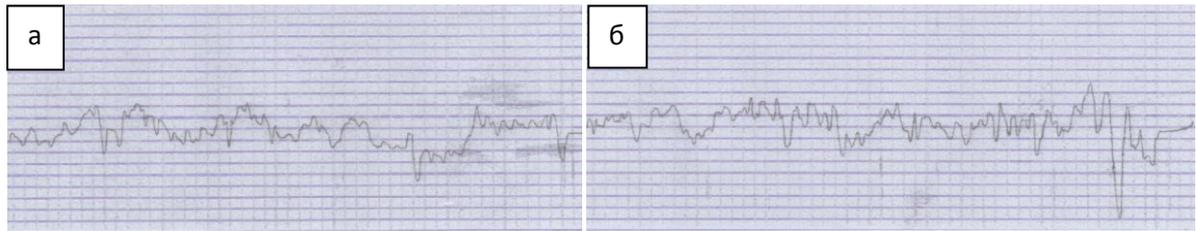


Рисунок 4.17 – Профилограмма поверхности реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Ni – Focus^{plus} (I = 50 А, V = 1,75 м/мин); рез со стороны стали Ст3; В.У. = 2000; Г.У. = 50:
а – на участке стали Ст3; б – на участке стали 12Х18Н10Т

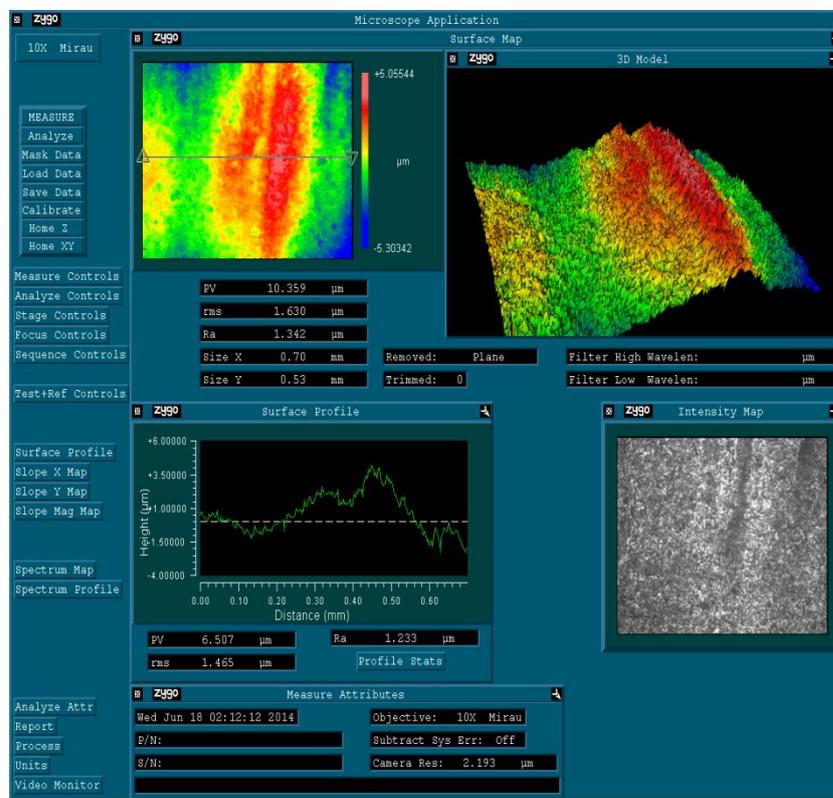


Рисунок 4.18 – Топография поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Ni – Focus^{plus} (I = 50 А, V = 1,75 м/мин); рез со стороны стали Ст3

4.2 Низкоуглеродистая сталь Ст3 + алюминий А5М

Данная биметаллическая композиция как объект для термической резки существенно отличается от исследованной ранее. Последнюю следует

рассматривать как соединение хотя и различных по химическому составу металлических материалов, но относящихся к одному классу сталей. Низкоуглеродистая сталь Ст3 и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т имеют близкие значения температур плавления (1539°C и $\sim 1500^{\circ}\text{C}$), а значения теплопроводности (37 и 18 ккал/м·час·град при 500°C) (таблицы 2.3, 2.6) являются сопоставимыми величинами. В тоже время биметаллическая композиция «сталь + алюминий» представляет собой сварное соединение черного и цветного металлов [13] со значительной разницей в реакции на тепловое воздействие. Низкая температура плавления алюминия (660°C) и его высокая теплопроводность (197 ккал/м·час·град) (таблица 2.9) будут определять особенности формирования канала реза исследуемой биметаллической композиции.

При выборе технологической схемы для ее раскроя, как и в исследовании предыдущей композиции необходимо рассматривать возможные варианты, приемлемые для реза конструкционных углеродистых сталей и алюминиевых сплавов при толщине пакета, равном 6 мм. Исходя из этих соображений следует рассматривать следующие технологические схемы:

- для раскроя углеродистых сталей – схема Ni – Focus^{plus} ($I = 50\text{ A}$, $V = 1,5\text{ м/мин}$) (рисунок 3.2);
- для раскроя алюминиевых сплавов – схема Ni – Focus ($I = 50\text{ A}$, $V = 1,3\text{ м/мин}$) (рисунок 3.5).

В технологической схеме Ni – Focus^{plus} в качестве плазмообразующего (режущего) газа используется кислород, а учитывая возможность реализации в формировании реза углеродистых сталей механизма кислородной резки, назначено повышенное (до 10 бар) значение его давления. Для удаления продуктов расплава используется завихряющий газ – азот.

Раскрой алюминиевых сплавов по технологической схеме Ni – Focus осуществляется с использованием в качестве режущего газа – воздуха, а завихряющего – азото-водородной смеси.

4.2.1 Обработка на режимах раскроя конструкционных углеродистых сталей

В данной серии экспериментов для раскроя биметаллической композиции «сталь + алюминий» была использована схема Ni – Focus^{plus}, предназначенная для обработки конструкционных углеродистых сталей. Раскрой производился как с одной, так и с другой стороны биметалла.

На рисунке 4.19 представлена геометрия реза при раскрое композиции со стороны стальной составляющей.

Анализ геометрии реза исследуемой композиции позволил выявить определенные различия в его формировании в верхней (стальной) и нижней (алюминиевой) части. Так формирование канала реза на стальном участке композиции происходит в оптимальных режимных условиях, что отражается в высокой точности реза – отклонение от перпендикулярности (α_1) не превышает $1,5^\circ$, а шероховатость поверхности реза составляет $R_a = 2,5$ мкм. На всем протяжении нижнего участка биметалла наблюдается расширение кана-

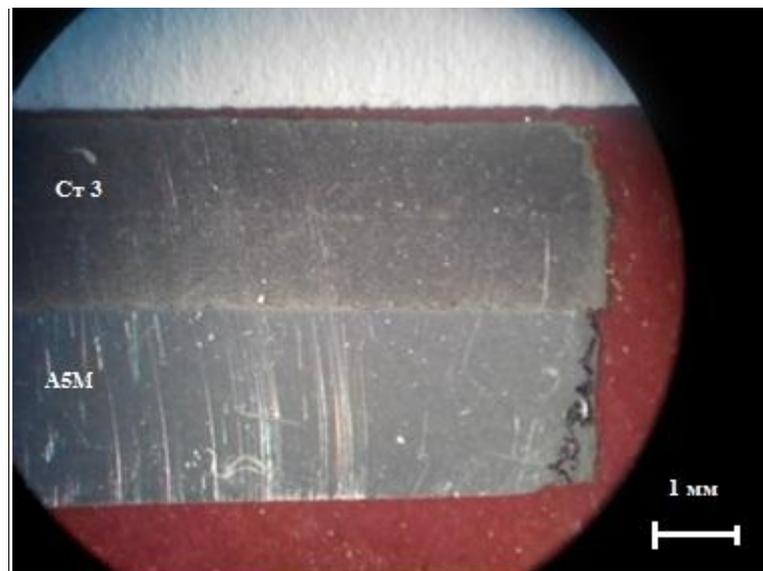


Рисунок 4.19 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Ni – Focus^{plus} ($I = 50$ А, $V = 1,5$ м/мин); рез со стороны стали Ст3

ла реза (до 0,1 – 0,2 мм на сторону), причем на поверхности реза алюминиевого участка наблюдается наплавление стали. Расширение канала реза в нижней половине пакета можно объяснить низкой температурой плавления алюминия. При относительно одинаковых температурно-временных условиях нагрева во всем канале реза положение границы расплава стальной составляющей будет определяться изотермой 1539 °С, а алюминия – 660 °С. Это объясняет разную глубину проплавления металлов, а, соответственно, и ширину реза на верхнем и нижнем участках биметалла. Разница в ширине приводит к созданию поднутрения на участке алюминиевой составляющей, что формирует определенную нишу для скопления части расплава стали (рисунок 4.20). Подобное искажение геометрии канала ухудшает газодинамические потоки, необходимые для полного удаления продуктов расплава из зоны реза. Это приводит к осаждению стального шлама на стенках канала в нижней части реза. Низкая температура плавления алюминия приводит к оплавлению нижней кромки реза при стекании по каналу высокотемпературных продуктов стального расплава.

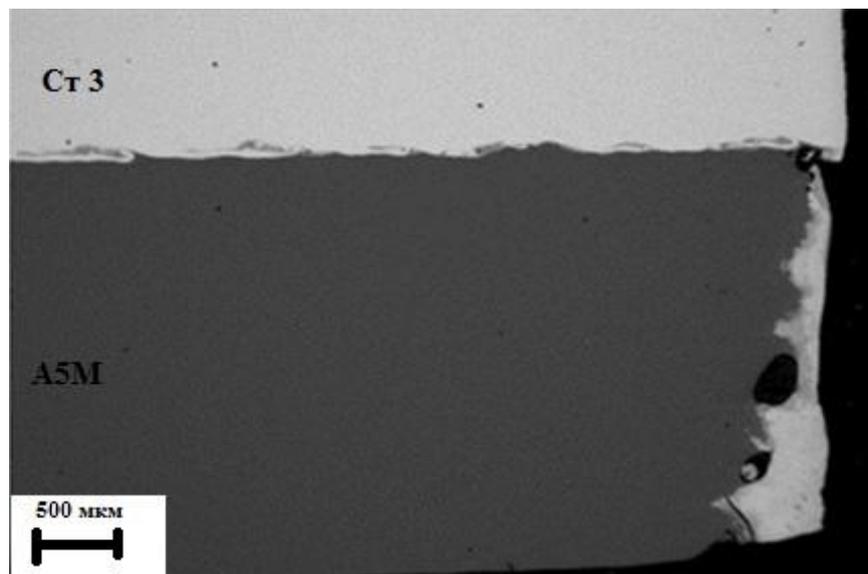


Рисунок 4.20 – Формирование канала реза на участке алюминиевой составляющей биметалла

Изменение скорости реза в интервале 1,3 – 1,7 м/мин не привело к существенному изменению геометрии канала реза ни по точности, ни шероховатости поверхности на обоих участках биметалла.

На рисунке 4.21 показан внешний вид поверхности реза исследуемой композиции, характерный для всего диапазона скоростей обработки. Для стальной составляющей биметалла характерна высокая точность (отклонение реза от перпендикулярности составляет $1 - 2^\circ$) и малое значение шероховатости ($R_a = 2,0 - 2,5$ мкм). В зоне алюминиевой составляющей поверхность реза гораздо худшего качества с кратерами, шероховатость которой традиционными методами количественно оценить не представляется возможным. В тоже время следует отметить, что в целом при данной технологической схеме раскроя со стороны углеродистой стали имеет место высокая точность реза по всей толщине композиции.

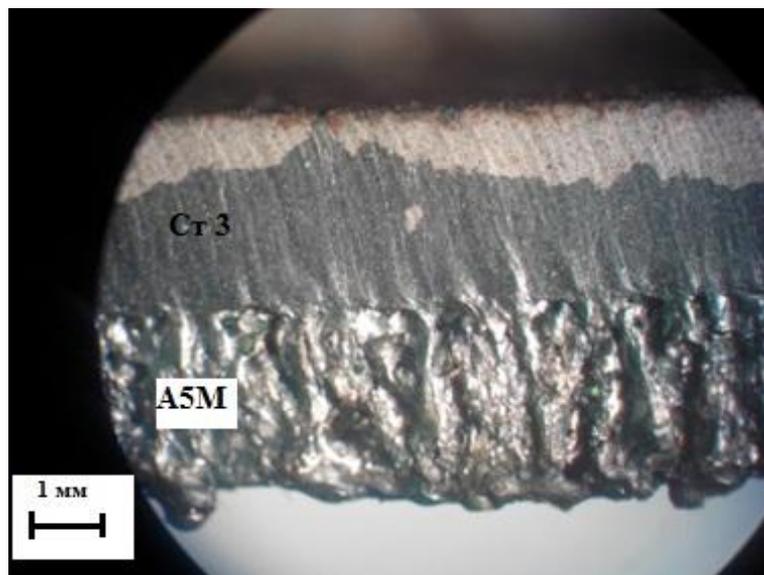


Рисунок 4.21 – Внешний вид поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме $Hi - Focus^{plus}$ ($I = 50$ А, $V = 1,5$ м/мин); рез со стороны стали Ст3

В условиях данной обработки наблюдается небольшое количество графа на нижней кромке реза не зависимо от изменения скорости реза в исследованном диапазоне. Иной характер формирования поверхности реза компози-

ции наблюдается при раскрое со стороны алюминиевой составляющей. Внешний вид поверхности реза показан на рисунке 4.22.

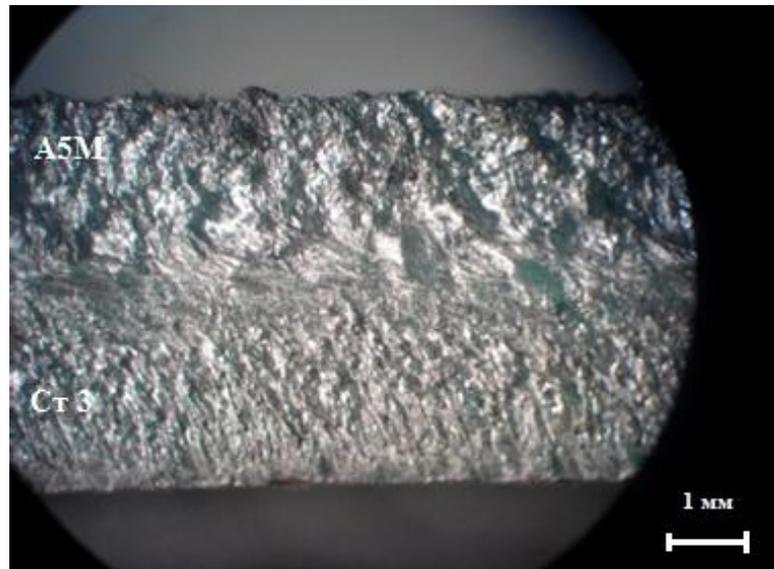


Рисунок 4.22 – Внешний вид поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Hi – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,7 \text{ м/мин}$); рез со стороны алюминия А5М

Соответствующая данному режиму раскроя геометрия реза представлена на рисунке 4.23.

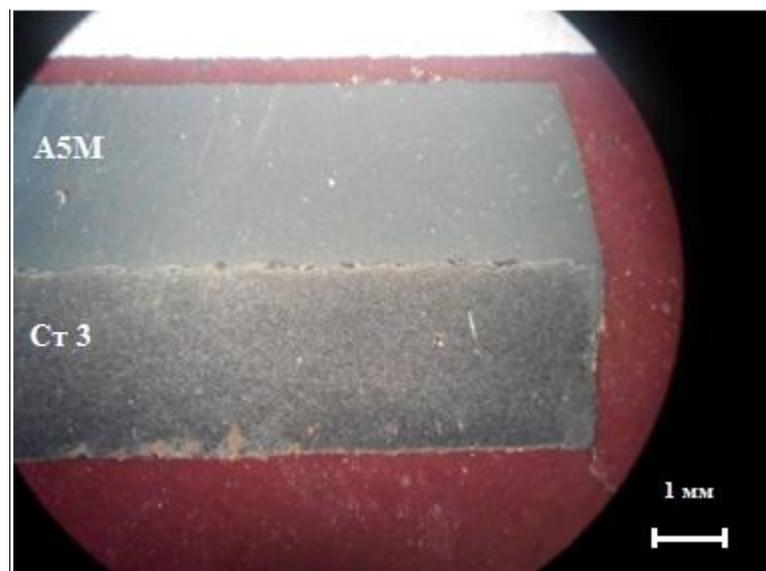


Рисунок 4.23 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Hi – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$, $V = 1,7 \text{ м/мин}$); рез со стороны алюминия А5М

Анализ морфологии поверхности реза биметалла (рисунок 4.22) на верхнем участке (алюминий) показывает на характерный для плазменного раскроя металла рельеф в виде следов воздействия плазменной дуги. На нижнем участке (сталь) подобного рельефа не наблюдается. Следует ожидать, что воздействие плазменной дуги на участке стальной составляющей будет происходить через слой не удаленного алюминиевого расплава, что и обуславливает формирование подобного рельефа поверхности в нижней части биметалла.

Наличие расплава алюминия на участке стали иллюстрирует рисунок 4.23. Исследуемая схема раскроя характеризуется отсутствием грата на нижней кромке реза. Однако снижение скорости обработки в исследованном диапазоне приводит к образованию значительных дефектов в виде вырывов в нижней части реза (рисунок 4.24).

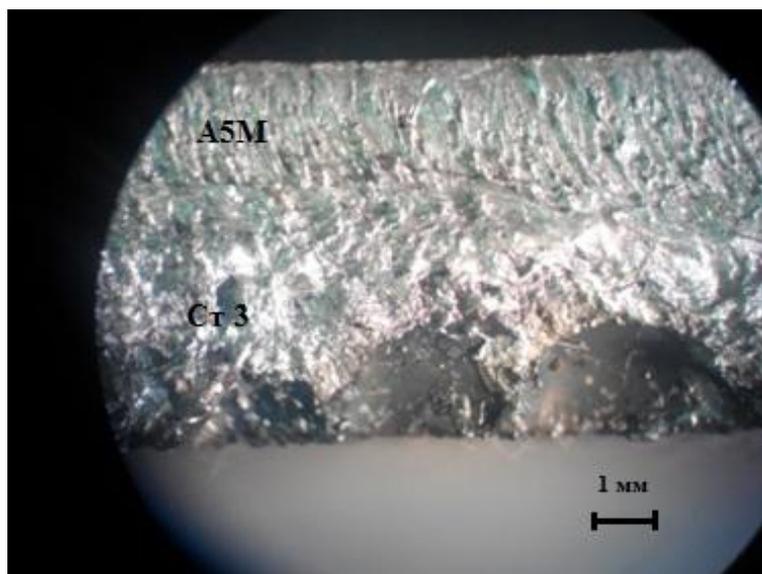


Рисунок 4.24 – Образование дефектов на поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Ni – Focus^{plus} (I = 50 А, V = 1,3 м/мин); рез со стороны алюминия А5М

Это может быть объяснено тем, что неполное удаление вязкого расплава алюминия вызывает нестабильность плазменного столба в канале реза за счет двойного дугообразования через элементы расплава алюминия на участке стальной составляющей.

Если раскрой композиции со стороны стали обеспечивает высокую точность реза, то при раскросе со стороны алюминия отклонение реза от перпендикулярности минимально только на участке стали Ст3. На участке алюминия А5М отклонение реза от перпендикулярности доходит до 12° при обработке на максимальной скорости, что согласуется с результатами исследований по раскрою алюминия, представленных в разделе 3.2.2. настоящей работы. Низкая точность реза объясняется высоким коэффициентом теплопроводности данного материала. Относительное повышение точности реза (до 7°) на участке алюминиевой составляющей достигается на минимальной скорости обработки (рисунок 4.25). Однако при этом, как было отмечено выше, наблюдается образование вырывов на участке стали Ст3.

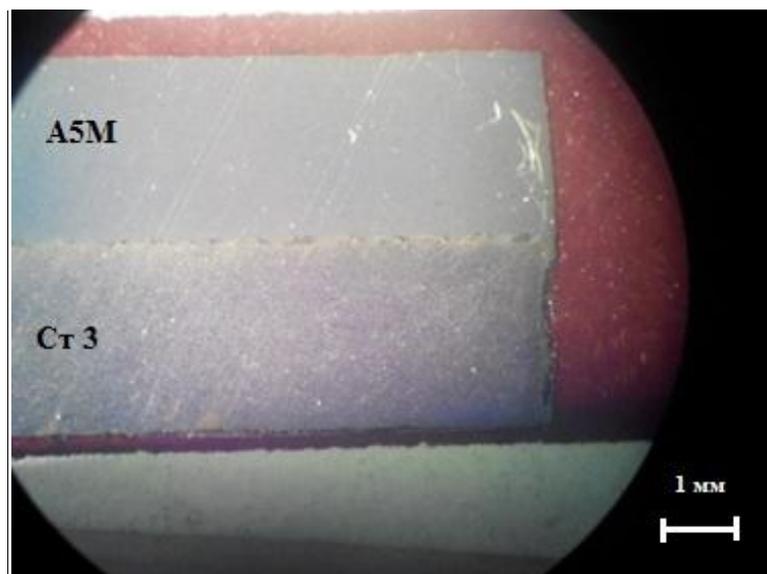


Рисунок 4.25 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскросе по технологической схеме Ni – Focus^{plus} ($I = 50$ А, $V = 1,3$ м/мин); рез со стороны алюминия А5М

4.2.2 Обработка на режимах раскроя алюминиевых сплавов

Переход к исследованию технологической схемы Ni – Focus на режимах обработки алюминиевых сплавов при неизменности токового режима и сопоставимости скоростей раскроя предполагает снижение газодинамиче-

ских потоков в канале реза вследствие уменьшения давления плазмообразующего газа в 2 раза по сравнению с предыдущей схемой.

Идентичность технологических схем $\text{Ni} - \text{Focus}$ и $\text{Ni} - \text{Focus}^{\text{plus}}$ с энергетических позиций позволяют предполагать схожесть в характере формирования канала реза. Действительно, в канале реза на участке алюминия (при раскрое со стороны стали Ст3) имеет место поднутрение, заполненное расплавом стали (рисунок 4.26).

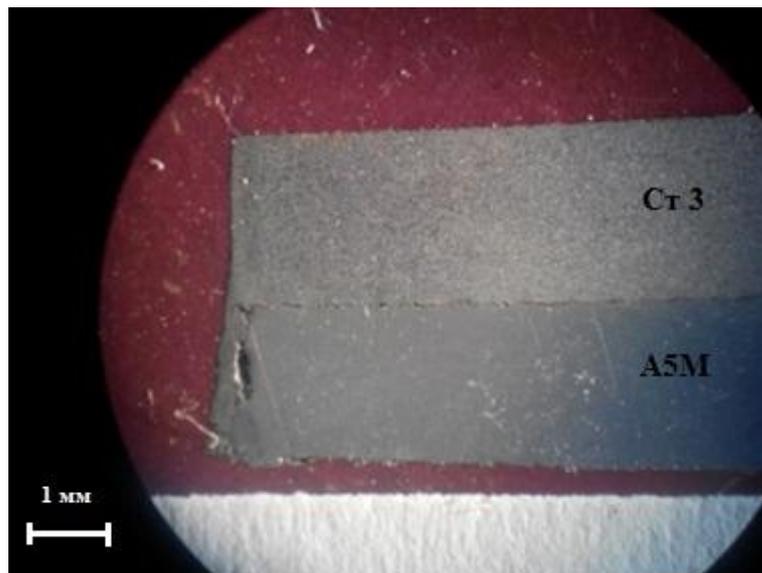


Рисунок 4.26 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме $\text{Ni} - \text{Focus}$ ($I = 50 \text{ А}$, $V = 1,1 \text{ м/мин}$); рез со стороны стали Ст3

Использование в технологической схеме $\text{Ni} - \text{Focus}$ для раскроя алюминиевых сплавов пониженных давлений плазмообразующего газа предопределяет снижение интенсивности газодинамических потоков и, как следствие, увеличение грата на нижней кромке реза по сравнению со схемой $\text{Ni} - \text{Focus}^{\text{plus}}$ на режимах раскроя углеродистых сталей. Раскрой биметалла со стороны стали Ст3, как и в предыдущей схеме, обеспечивает на верхнем участке композиции хорошую точность реза (отклонение от перпендикулярности не превышает $1,5 - 2,0^\circ$). Геометрия и шероховатость на участке алюминиевой составляющей определяется морфологией осажденного расплава стали после его застывания.

Изменение схемы обработки на раскрой со стороны алюминия по технологической схеме Ni – Focus на режимах обработки алюминиевых сплавов привело к непрорезу на всю толщину биметалла на скорости 1,5 м/мин. Это объясняется тем, что в данной схеме исследования участок стали Ст3 находится в зоне действия факела плазменной дуги (рисунок 1.7), обладающего наименьшей энергоэффективностью.

В целом, характер формирования реза, его точность и микрогеометрия оказался подобным результатам раскроя исследуемой композиции по технологической схеме Ni – Focus^{plus}.

4.3 Низкоуглеродистая сталь Ст3 + медь М1

Еще одним представителем сварного соединения разнородных металлов, исследуемых в диссертационной работе, является биметаллическая композиция «углеродистая сталь Ст3 + медь М1». Как и в случае соединения углеродистой стали с алюминием, в данной биметаллической композиции материалы обладают резко различающимися теплофизическими свойствами. Так у стали Ст3 температура плавления $T_{пл} = 1539 \text{ }^\circ\text{C}$, а теплопроводность $\lambda = 37 \text{ ккал/м}\cdot\text{час}\cdot\text{град}$ при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (таблица 2.3), а у меди $T_{пл} = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 309 \text{ ккал/м}\cdot\text{час}\cdot\text{град}$ при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (таблица 2.12). Существенная разница в теплофизических свойствах материалов в композиции предполагает их различное поведение при термической резке биметалла.

Следуя принятым в работе рекомендациям по выбору технологической схемы тонкоструйной плазменной резки материалов, установленными при исследовании предыдущих композиций, и принимая во внимание результаты обработки модельных материалов (разделы 3.1.1, 3.1.3), возможными технологическими вариантами для раскроя пакета толщиной 5 мм могут быть признаны схемы Ni – Focus и Ni – Focus^{plus} со следующими режимными параметрами:

- Ni – Focus – $I = 45 \text{ А}$, $V = 0,9 \text{ м/мин}$ (рисунок 3.1);

- $\text{Ni} - \text{Focus}^{\text{plus}} - I = 50 \text{ A}, V = 1,75 \text{ м/мин}$ (рисунок 3.2).

Учитывая факт, что в исследуемой биметаллической композиции при общей толщине пакета 5 мм участок углеродистой стали Ст3 составляет 3 мм, и принимая во внимание результаты исследований по раскрою модельного материала – меди М1 (раздел 3.2.2), представляется перспективным изучение возможности использования высокопроизводительной схемы $\text{Ni} - \text{Focus}^{\text{plus}}$ для раскроя рассматриваемого сварного соединения.

Как и предполагалось, экспериментальные исследования подтвердили, что существенная разница в теплофизических свойствах составляющих биметалла определила специфику в формообразовании канала реза. Так на рисунке 4.27 представлена геометрия поперечного сечения реза биметаллической композиции при раскросе со стороны стали Ст3 по технологической схеме $\text{Ni} - \text{Focus}^{\text{plus}}$ на режимах, предназначенных для обработки углеродистых сталей.



Рисунок 4.27 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскросе по технологической схеме $\text{Ni} - \text{Focus}^{\text{plus}}$ ($I = 50 \text{ A}, V = 1,75 \text{ м/мин}$); рез со стороны стали Ст3

В целом геометрия реза исследуемой композиции на участке стали Ст3 подчиняется общим закономерностям формирования канала реза при раскросе углеродистых сталей при использовании технологий тонкоструйной плаз-

менной резки. Это относится к показателям точности, шероховатости реза и графообразованию. На рисунке 4.28 показана зависимость отклонения реза от перпендикулярности от скорости обработки.

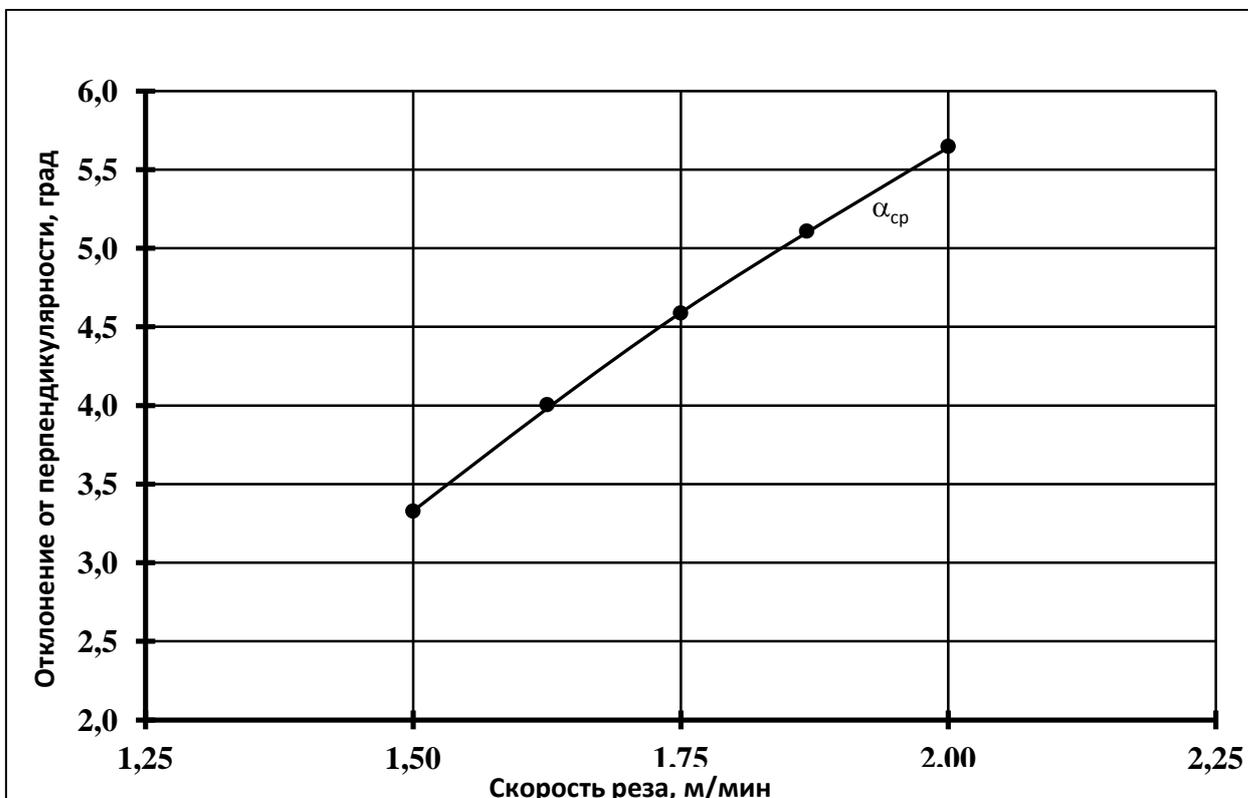


Рисунок 4.28 – Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» на точность реза при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме Ni – Focus^{plus} с I = 50 А для углеродистых сталей

Полученные результаты в целом согласуются с данными по точности реза модельного материала – стали Ст3 (рисунок 3.7). Следует отметить образование наплыва размером 0,15 - 0,17 мм на медном участке композиции (рисунок 4.27). Причину образования подобного дефекта на поверхности реза можно объяснить тем, что определенная часть расплава материала верхнего участка (стали Ст3), попадая на поверхность реза меди, вследствие высокой теплопроводности последней, резко остывает до температур ниже $T_{пл}$, осаждаясь в виде наплава. Внешний вид поверхности реза композиции представлен на рисунке 4.29.

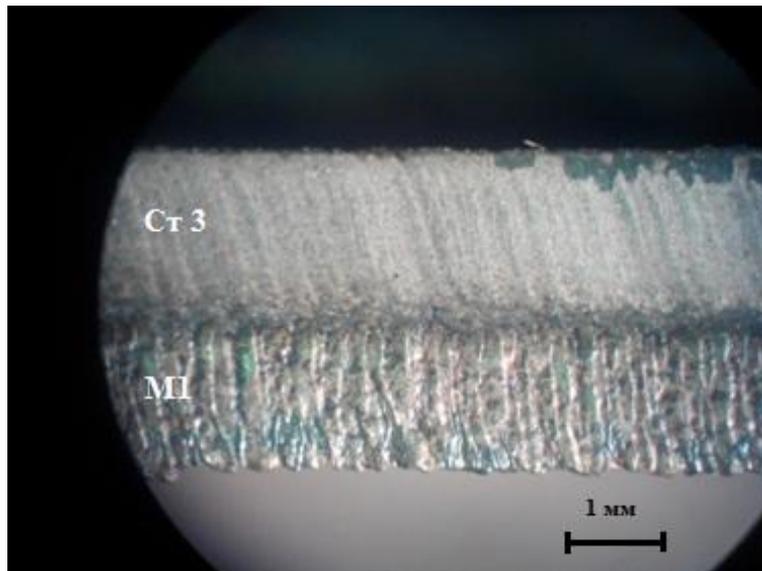


Рисунок 4.29 – Внешний вид поверхности реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» со следами расплава стали на участке меди при раскрое со стороны стали Ст3

Варьирование скоростью раскроя в исследованном диапазоне (1,5 – 2,0 м/мин) не приводит к заметному изменению геометрии и размеров наплыва расплава стали на участке меди. Изменяется лишь характер стоков от более грубых следов на максимальных скоростях до мелких – на минимальных (рисунок 4.30).

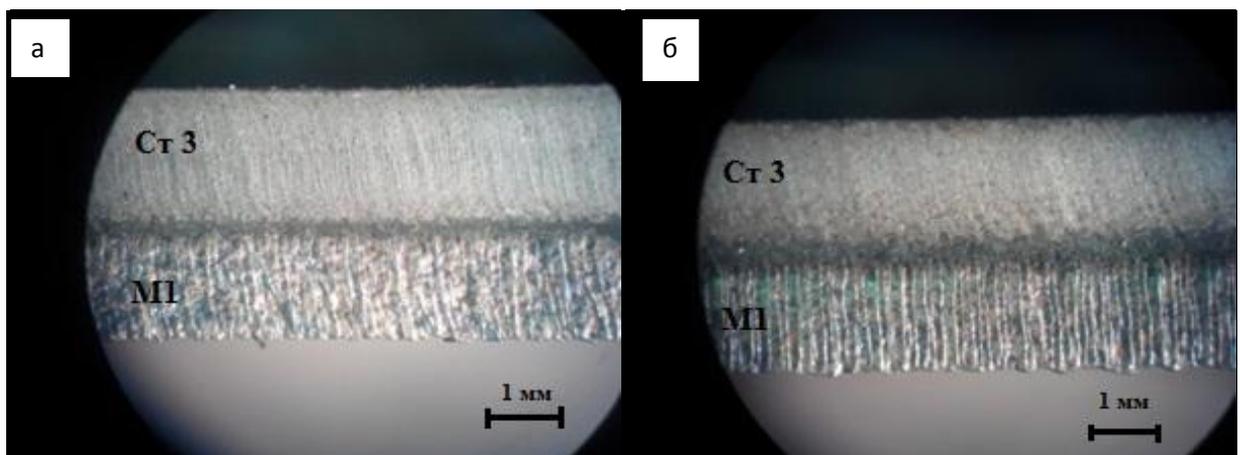


Рисунок 4.30 – Изменение характера стоков расплава стали на участке меди на скоростях: а – $V = 2,0$ м/мин; б - $V = 1,5$ м/мин

Повышение скорости реза также приводит к увеличению угла наклона стоков, что объясняется изменением направления гидродинамических потоков в канале реза.

Анализ микрогеометрии поверхности реза на участках биметалла показал, что шероховатость на участке стали – $R_a = 1,5-2,5$ мкм, меди - $R_a = 3-6$ мкм, что является характерным для плазменного раскроя отдельных составляющих данной композиции. Также следует отметить отсутствие грата на нижней кромке реза, чему способствуют низкие значения кинематической вязкости обрабатываемых металлов.

Изменение верхней стороны раскроя биметаллической композиции со стальной на медную приводит к существенному изменению, как геометрии реза, так и состояния его поверхности. Следует отметить, что попытка раскроя на максимальной (2,0 м/мин) скорости сопровождалась непрорезом пакета на всю толщину. Подобная картина наблюдалась при раскрое композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» со стороны алюминия при максимальной скорости ($V = 1,7$ м/мин). В обоих случаях раскрой начинался со стороны составляющей биметалла с максимальной теплопроводностью, что и определило интенсивный характер оттока тепла от плазменной дуги на верхнем участке композиции, что вызвало перераспределение мощности дуги по толщине реза. В таком случае произошло снижение верхней границы скорости раскроя, гарантирующей сквозной прорез материала.

Изучение геометрии реза (рисунок 4.31) показало, что на верхнем (медном) участке наблюдается формирование узкого канала реза со значительным отклонением его от перпендикулярности. Это полностью соответствует характеру раскроя модельного материала – меди (раздел 3.2.2), при котором наблюдается значительная разница ширины реза по верхним и нижним кромкам (рисунки 3.19, 3.20), обуславливающая отклонение реза от перпендикулярности от $4,55^\circ$ до $5,7^\circ$ в исследованном диапазоне скоростей [88].

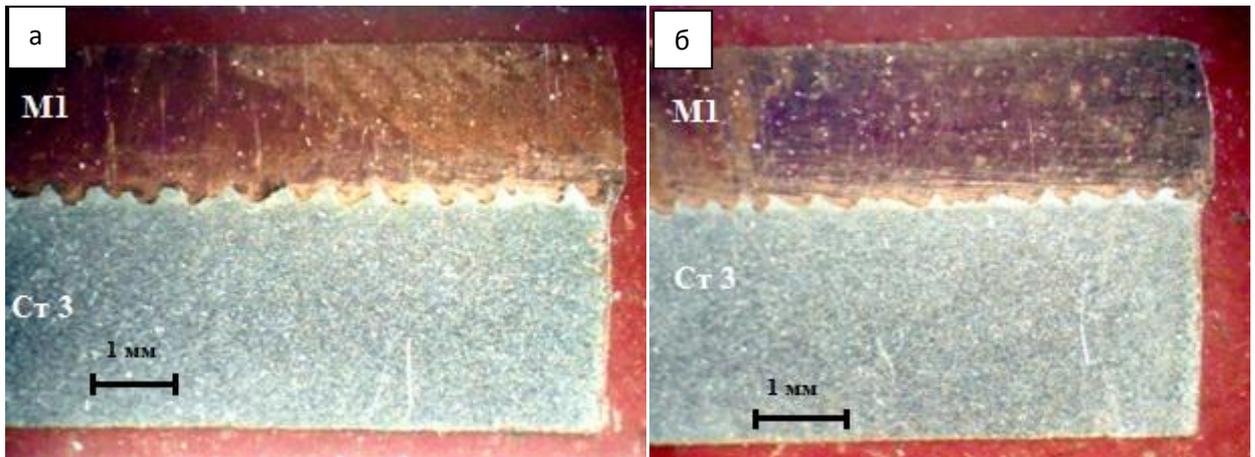


Рисунок 4.31 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскрое по технологической схеме Hi – Focus^{plus} ($I = 50 \text{ A}$);
рез со стороны меди М1: а – $V = 1,75 \text{ м/мин}$; б - $V = 1,5 \text{ м/мин}$

На нижнем (стальном) участке реза биметалла наблюдается расширение канала реза на $\sim 0,25 \text{ мм}$ на сторону, при этом отклонение реза от перпендикулярности практически отсутствует. Действительно, при одних и тех же технологических параметрах раскроя для углеродистых сталей характерно формирование канала реза большей ширины по сравнению с медью. При этом показатели точности для стали существенно выше. Последнее можно объяснить таким сочетанием технологических параметров процесса (в первую очередь, плотность мощности дуги) и теплофизических свойств углеродистых сталей (теплопроводность, температура плавления) при котором достигается более менее равномерная теплонапряженность процесса нагрева по всей длине канала реза.

Изучение состояния поверхности реза позволяет определить особенности формирования канала реза при раскрое композиции со стороны меди (рисунок 4.32). Если на верхнем участке (меди) четко просматриваются следы взаимодействия плазменной дуги с обрабатываемым металлом [88], то на участке стали топография поверхности иная. Последняя представляет собой чередование следов в виде волн с гораздо большим шагом, чем на верхнем участке. Вероятно, формирование подобного рельефа связано с тем, что на

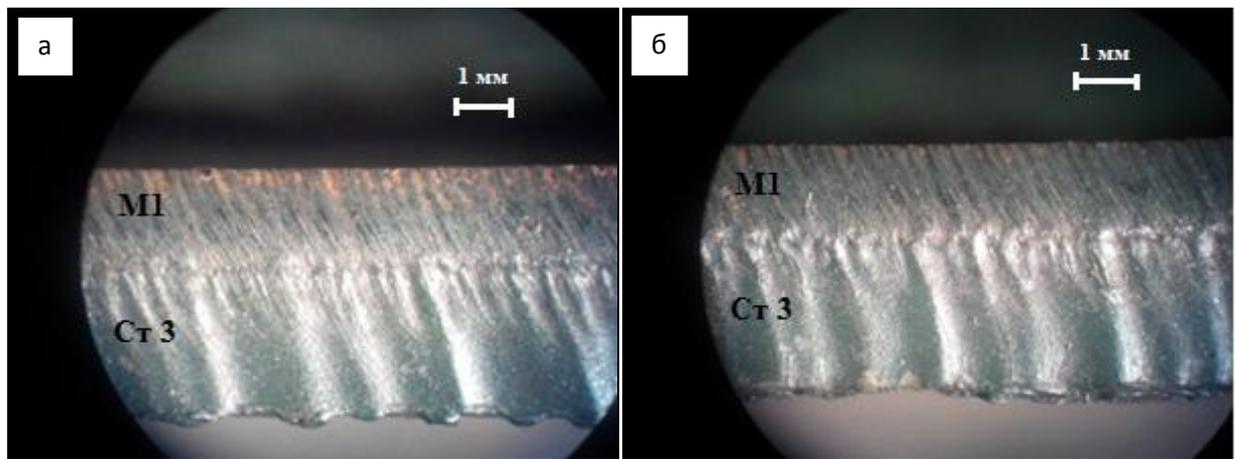


Рисунок 4.32 – Особенности формирования рельефа поверхности реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскрое со стороны меди на скоростях:
а – $V = 1,75$ м/мин; б - $V = 1,5$ м/мин

нижнем участке непосредственного взаимодействия плазменной дуги с обрабатываемым материалом не происходит, а процесс теплопередачи осуществляется через потоки расплава меди, стекающие с верхнего участка. В таком случае тепловой источник на участке стали представляет собой жидкую ванну медного расплава. Этим можно объяснить подобный рельеф в нижней части биметалла. Варьирование скоростью реза в целом не меняет картины формирования рельефа.

Образование волнообразного рельефа на поверхности реза приводит к ухудшению микрогеометрического его состояния и наличию определенной доли грата на нижних краях реза.

4.4 Выводы

1. При выборе для раскроя листовых материалов из возможных технологических схем следует назначать обработку на токовых режимах, обеспечивающих минимальную ширину реза. Использование высокопроизводительной схемы Hi-FocusF на максимальном токовом режиме ($I = 130$ А) при обработке незначительных толщин (до 10 мм) реза не обеспечивает дос-

таточного качества реза и требует введения дополнительной операции механической обработки.

2. Экспериментально установлено, что из возможных технологических схем раскроя композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» наиболее привлекательной является схема Ni – Focus^{plus} с токовым режимом $I = 50$ А для углеродистых сталей при обработке пакета со стороны стали Ст3. Это обеспечивает достижение максимальной точности реза, как на отдельных участках биметалла, так и для пакета в целом, высокое качество поверхности реза ($R_a = 1,5-2,0$ мкм), полное отсутствие грата на нижних кромках реза при высокой скорости раскроя ($V = 1,5$ м/мин).

Изменение лобовой стороны раскроя композиции (со стороны стали 12Х18Н10Т) приводит к ухудшению морфологии поверхности реза, что выражается в наличии следов осаждения части расплава нержавеющей составляющей на нижнем участке низкоуглеродистой стали.

Использование технологической схемы Ni – Focus с режимами раскроя легированных сталей приводит к снижению скорости обработки до 1,2 – 1,3 м/мин.

3. Наилучшие показатели точности и качества раскроя биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» достигнуты при обработке пакета со стороны стали Ст3 по технологии Ni – Focus^{plus} с режимами для углеродистых сталей ($I = 50$ А, $V = 1,5$ м/мин). Высокая точность реза (отклонение от перпендикулярности $\sim 1,5^\circ$) и низкая шероховатость ($R_a \sim 2,5$ мкм) наблюдаются на верхнем участке биметалла. На нижнем (алюминиевом) участке имеет место расширение канала реза до 0,1 – 0,2 мм на сторону, что является следствием существенной разницы в температурах плавления составляющих композиции. Осаждение расплава на нижнем участке вызвано ослаблением газодинамических потоков в зоне расширения канала реза.

Изменение схемы обработки на рез со стороны алюминия привело к ухудшению показателей точности и качества реза биметаллической композиции.

Попытка применения технологической схемы Ni – Focus с режимами для раскроя алюминиевых сплавов не изменила характера формирования канала реза в композиции, а привела к снижению скорости обработки, вплоть до появления непрореза пакета при раскрое со стороны алюминия.

4. Использование высокопроизводительной схемы Ni – Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей ($I = 50$ А, $V = 1,75$ м/мин) обеспечивает приемлемое качество реза композиции «сталь Ст3 + медь М1». Так, при раскрое пакета со стороны стали Ст3 минимальное отклонение реза от перпендикулярности ($\alpha = 3,3^\circ$) в исследованном диапазоне скоростей наблюдается при $V = 1,5$ м/мин. При этом в канале реза на участке меди формируется наплыв размером $0,15 - 0,17$ мм на сторону, появление которого можно объяснить тем, что часть расплава стали Ст3 с верхнего участка осаждается на нижнем. Исследование микрогеометрии поверхности реза показало на низкое значение шероховатости. Так на участке стали - $R_a = 1,5-2,5$ мкм, меди - $R_a = 3,0 - 6,0$ мкм, что является характерным для раскроя этих материалов, как модельных, с использованием тонкоструйной плазмы. Экспериментально установлено полное отсутствие грата на нижних краях реза даже при высоких (до $2,0$ м/мин) скоростях обработки.

Изменение схемы обработки на раскрое пакета со стороны меди привело к непрорезу биметалла при максимальном ($2,0$ м/мин) значении скорости, что можно объяснить интенсивным оттоком тела от плазменной дуги на верхнем участке с высокой теплопроводностью, и, как следствие, недостатком мощности для расплавления пакета в нижней его части, материал которого в композиции обладает максимальной температурой плавления.

ГЛАВА 5 СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

В разделе 1.1 представлен анализ возможных технологий создания биметаллических соединений. Показана перспектива использования сварки взрывом как технологического метода соединения разнородных металлических материалов, к которым не применимы традиционные методы - сварка плавлением и диффузионная сварка. Представлена расчетная схема исследуемого метода и рассмотрен механизм формирования высокопрочного соединения, в основе которого лежит схема волнообразования, получившая название Бахрани-Кроссланда (рисунок 1.4).

Металлографические исследования, представленные в настоящем разделе работы, направлены на экспериментальное подтверждение механизма образования сварного соединения применительно к рассматриваемым в работе биметаллическим композициям с целью выявления особенностей структурного состояния материалов, подвергаемых тонкоструйной плазменной резке. Для более полного представления о механизмах формирования точности и качества реза необходимо изучение влияния процессов тонкоструйной плазменной резки на структурное состояние биметаллического соединения.

5.1 Особенности структурного состояния сварного шва биметаллических композиций

Справедливость теоретической модели Бахрани-Кроссланда, объясняющей возникновение волнообразования при соединении металлических материалов при помощи взрыва, подтверждена рядом исследований [3, 4, 95-97].

Действительно, во всех исследуемых в настоящей работе биметаллических композициях присутствует волнообразный характер сварного соединения (рисунок 5.1). Режимы сварки взрывом, выраженные кинематическими

параметрами соударения метаемых пластин, ограниченные развитием соответствующих процессов (согласно диаграмме Уитмана), соответствовали области реализации сварки взрывом исследуемых биметаллических соединений.

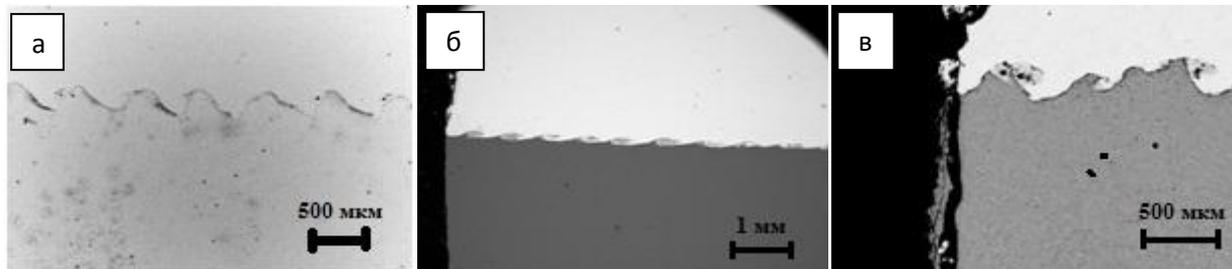


Рисунок 5.1 – Волнообразный характер соединений биметаллических композиций, полученных сваркой взрывом: а – «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; б – «сталь Ст3 + алюминий А5М»; в – «сталь Ст3 + медь М1»

Несмотря на то, что стык соединения имеет волнообразную форму во всех трех композициях, течение металлов имеет различный характер.

В работах [98, 99, 100] экспериментально установлено, что в зависимости от режимов соударения при сварке взрывом течение материалов может быть ламинарным, вихревым и турбулентным.

Так в биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» (рисунок 5.1, а) течение материалов в зоне стыка имеет скорее ламинарный характер (рисунок 5.2, а) при незначительной асимметрии волн. Последнее можно объяснить равными значениями плотностей свариваемых материалов. При этом встречаются отдельные гребни с элементами проявления действия вихревых (рисунок 5.2, б) и турбулентных потоков с образованием так называемых «вихревых мешков» (рисунок 5.2, в) согласно модели Бахрани-Кроссланда. Относительно «спокойный» ламинарный характер течения материалов на стыке не способствует интенсивному их механическому перемешиванию, а прочность соединения обеспечивается в основном за счет образования зон перемешивания из расплава на гребнях волн (рисунок 5.3).

Подтверждением факта образования зоны перемешивания из расплава является появление в части из них микротрещин и пор (рисунок 5.4).



Рисунок 5.2 – Особенности волнового течения металлов на стыке соединения «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T»

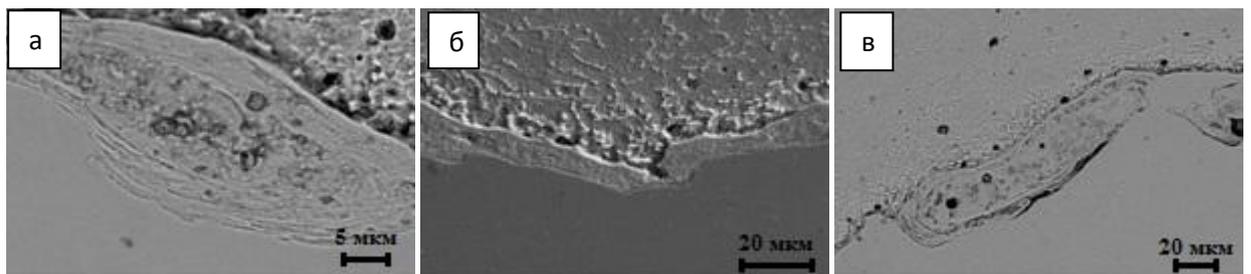


Рисунок 5.3 – Образование зон расплава на стыке соединения «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T»

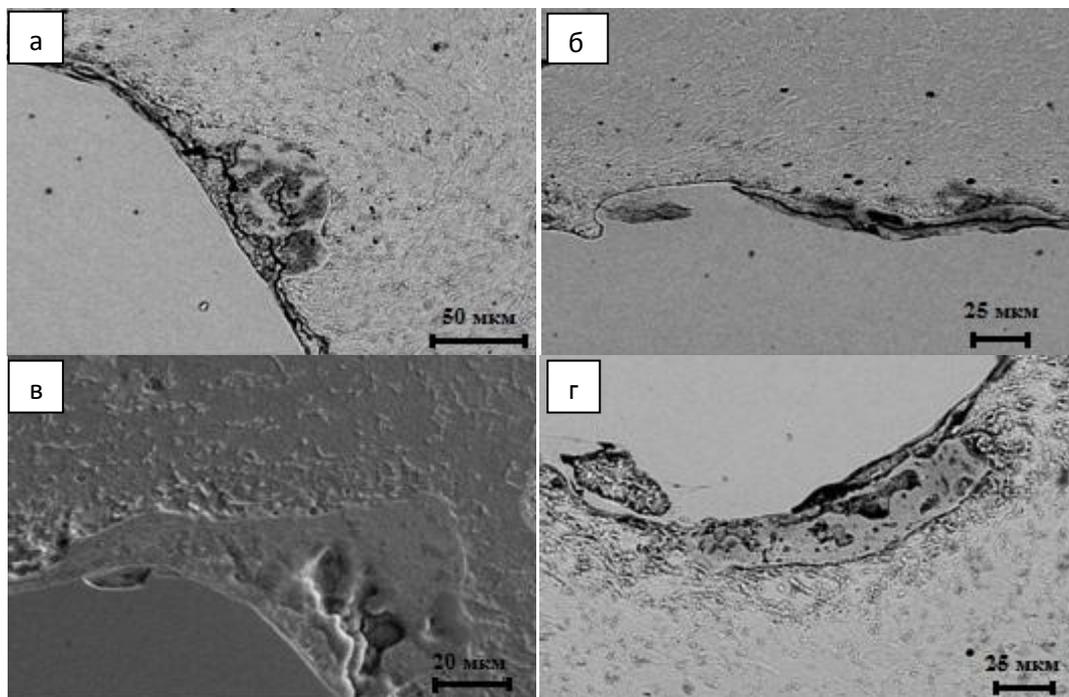


Рисунок 5.4 – Образование трещин (а, б) и пор (в, г) в местах расплава на стыке соединения «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T»

Количественная оценка распределения легирующих элементов в зоне перемешивания с помощью микрозонда выполнена в работе [3] для биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 1Х18Н9Т». Установлено, что в зонах расплава находится от 7 до 20% нержавеющей стали.

Совершенно иной характер волнового течения – турбулентный наблюдается на стыке композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» (рисунок 5.1, б). В данном случае существенная асимметрия волн определяется значительной разницей плотностей стали и алюминия. Каждый гребень волны сформирован в результате захлapyвания «вихревого мешка». Строение «вихревого мешка», представленное на рисунках 5.5, показывает на наличие зоны механического перемешивания металлов, которой является оболочка «вихревого мешка», образованная из расплава алюминия и элементов стали Ст3 и участки кристаллизации из расплава алюминия (рисунок 5.5, а). Образование последних, очевидно, происходило после завершения формирования «вихревых мешков» и завершения процессов интенсивного пластического деформирования. Наличие вихревых и турбулентных потоков привело к появлению дефектов внутри зон завихрения в виде пор и пустот, а образование в зоне перемешивания интерметаллидов (типа $FeAl_3$, $FeAl_5$) – появлению трещин. В зоне «вихревого мешка» возможно появление отдельных элементов в виде кусков соединяемых металлов (рисунок 5.5, б).



Рисунок 5.5 – Особенности строения «вихревого мешка» на стыке соединения «сталь Ст3 + алюминий А5М»

Факт образования жидкой фазы алюминия после завершения формирования «вихревого мешка» подтверждается отсутствием в ней дефектов в виде

пор и осколков (рисунок 5.5, в). Низкая температура кристаллизации алюминия способствует этому.

На границе раздела металлов вне «вихревых мешков» наблюдается зоны механического перемешивания, образованные при пластическом течении расплава на границе, различной величины (рисунок 5.6).

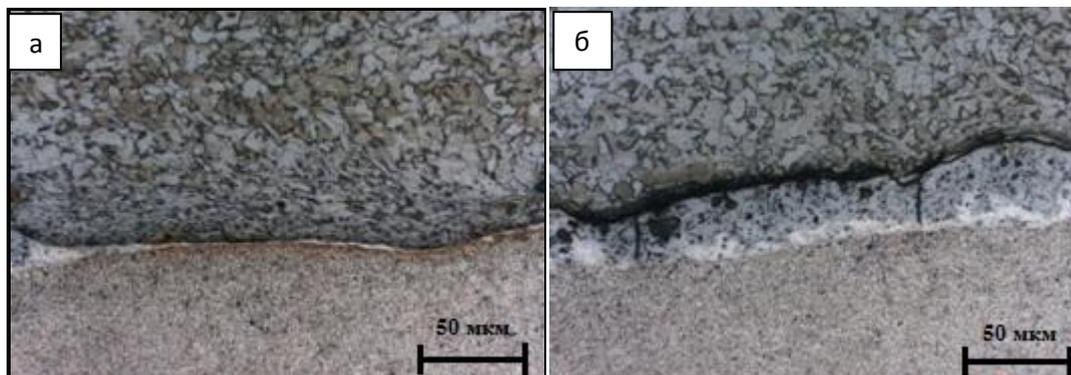


Рисунок 5.6 – Строение границы раздела металлов композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» между «вихревыми мешками»

Возможность образования интерметаллидов на границе стыка приводит к появлению в зонах расплава трещин, как продольных, так и поперечных (рисунок 5.7), что может ослабить прочность соединения биметаллической композиции.

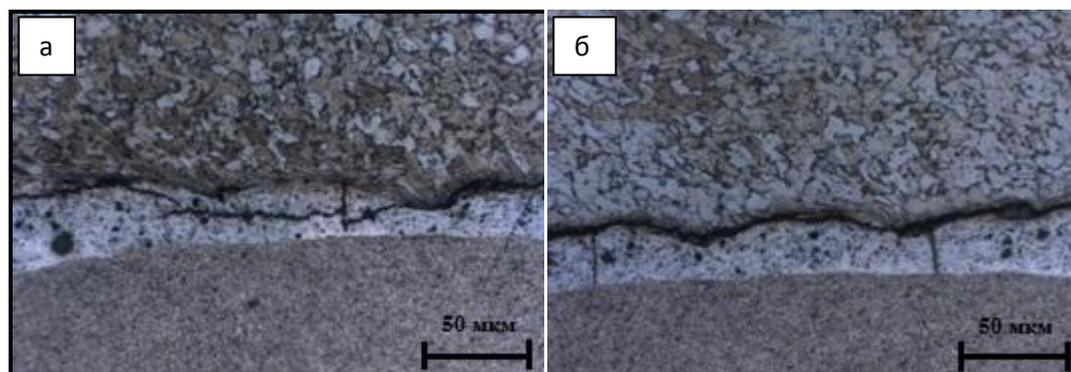


Рисунок 5.7 – Образование трещин на границе раздела металлов композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М»

Если характер течения металлов на границах «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» и «сталь Ст3 + алюминий А5М» можно определить как ламинарный и турбулентный, соответственно, то для композиции «сталь Ст3 + медь М1» его скорее можно отнести к вихревому типу (рисунок 5.1, в).

В обычных условиях данные металлы в твердом состоянии обладают ограниченной растворимостью, плохой взаимной смачиваемостью. Это наряду с существенно различающимися температурами кристаллизации стали и меди затрудняет их соединение при использовании традиционных технологий сварки. В условиях сварки взрывом процессы взаимного перемешивания металлов в вихревых зонах обеспечивают создание прочного соединения сталь + медь. Специфичность окраски меди позволяет обнаружить области перемешивания составляющих на металлографических шлифах даже без специального травления (рисунок 5.8).

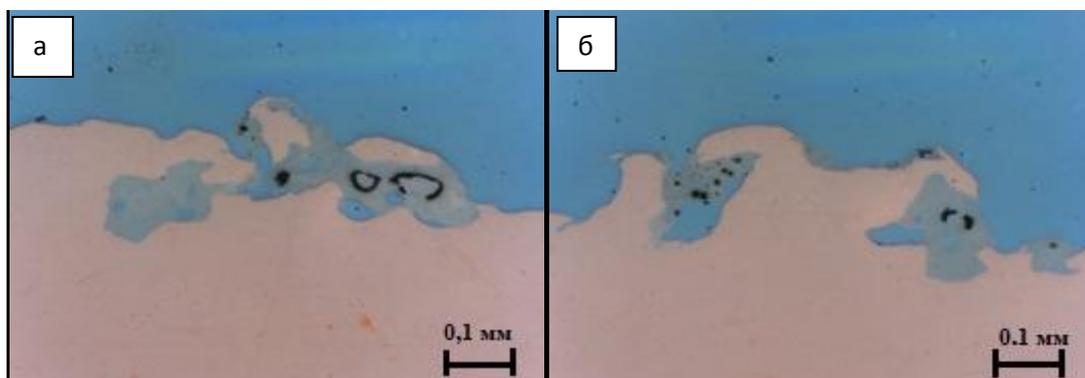


Рисунок 5.8 – Вихревые зоны на границе раздела металлов в соединении «сталь Ст3 + медь М1»

В вихревых зонах могут наблюдаться несплошности в виде пор, а также отдельные фрагменты соединяемых материалов. Вихревое течение металлов может образовывать как замкнутые «мешки» (рисунок 5.9, а), так и участки нерегулярных волн (рисунок 5.9, б).

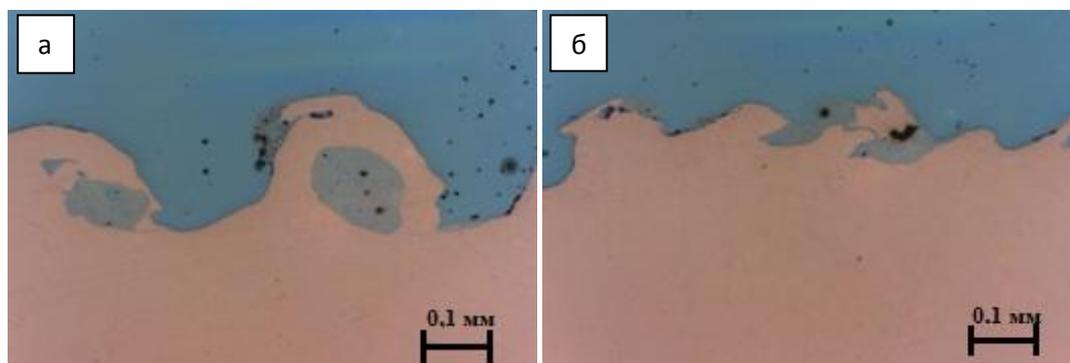


Рисунок 5.9 – Вихревые участки различной конфигурации на границе соединения «сталь Ст3 + медь М1»

Химическое травление шлифов позволило выявить структуру зоны сварки исследуемого биметалла. Так на рисунке 5.10 видны зоны перемешивания металлов в условиях их пластического течения, участки, образованные из расплава в местах максимальной локализации пластической деформации и тепловыделения, а также отделившиеся осколки составляющих биметалла – меди (рисунок 5.10, а) и стали (рисунок 5.10, б).

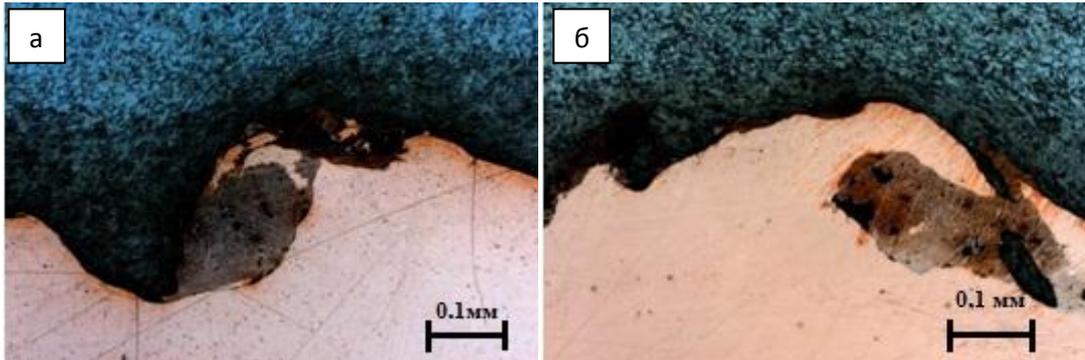


Рисунок 5.10 – Структура зоны сварки соединения «сталь Ст3 + медь М1»

Вихревой характер течения металлов на границе стыка определяет образование пор в зонах перемешивания (рисунок 5.11).

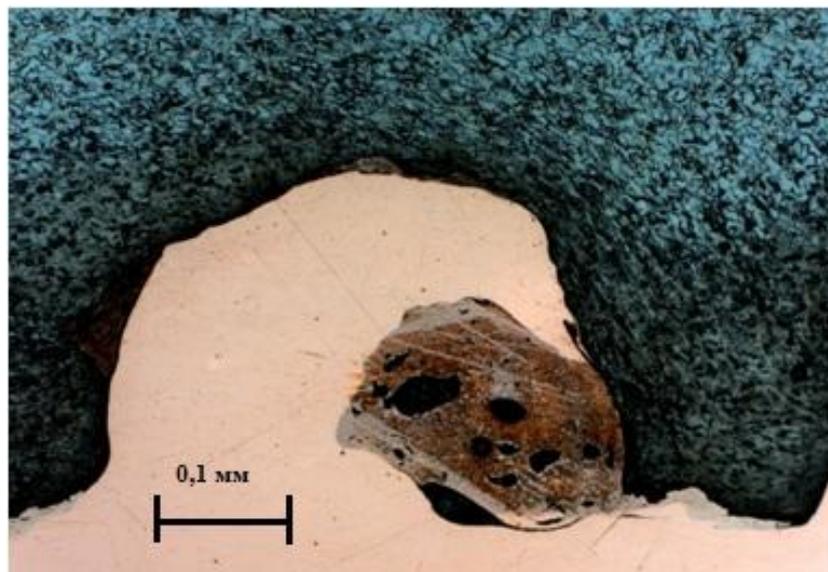


Рисунок 5.11 – Дефекты в вихревых зонах на границе соединения «сталь Ст3 + медь М1»

В отличие от предыдущей композиции, представляющей соединение стали с алюминием, в данном случае не обнаружено образования трещин в зоне сварки, что объясняется разной природой взаимодействия алюминия и меди со сталью.

Экспериментально установив факт, что для всех исследуемых композиций соединения сваркой взрывом имеют волновой характер, представляется возможным определить геометрические характеристики волн, в частности, их длину и амплитуду. Зависимость данных характеристик от параметров соударения при взрыве подробно исследована А.А. Дерibasом [3] со ссылкой на работу [101]:

$$\frac{\lambda}{\delta_1} = 16 \sin^2 \frac{\gamma}{2},$$

где λ - длина волны, возникающая на поверхности соударения;

δ_1 – толщина плакирующей (метаемой) пластины;

γ - угол соударения пластин (рисунок 1.2).

Диапазон отношений амплитуды (a) к длине волны (λ), по мнению автора [3] может быть установлен как:

$$0,14 \leq \frac{a}{\lambda} \leq 0,3.$$

Если принять во внимание рекомендуемые углы соударения для сварки взрывом композиций «сталь низкоуглеродистая + сталь нержавеющая» [3, 102], «сталь низкоуглеродистая + алюминий» [3, 103], «сталь низкоуглеродистая + медь» [3, 104], которые находятся в одном диапазоне ($\gamma = 10 \div 20^\circ$), обеспечивающем сварку с формированием волн пластического течения отмеченных металлов, то расчетные значения длин волн будут находиться в пределах $\lambda = 0,243 - 0,965$ мм.

В таблице 5.1 представлены экспериментальные средние значения амплитуд, длин волн и их отношений для исследуемых биметаллических композиций.

Таблица 5.1 – Экспериментальные параметры волн пластического течения для биметаллических композиций

Наименование биметаллической композиции	a, мм	λ , мм	a/λ
«Сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»	250	600	0,42
«Сталь Ст3 + алюминий А5М»	110	850	0,13
«Сталь Ст3 + медь М1»	200	500	0,40

Экспериментальные значения длин волн пластического течения для всех трех композиций находятся в теоретически установленном диапазоне. Отношение высотных и шаговых параметров несколько отличается в большую сторону, что, вероятно, связано с режимными параметрами сварки взрывом исследуемых образцов.

Металлографические исследования рассматриваемых биметаллических композиций, предназначенных для последующего плазменного раскроя, следует рассматривать как беззачерное, вакуумно плотное соединение двух металлов, различающихся между собой по механическим и теплофизическим свойствам. Выявленные особенности в строении сварного шва, не смотря на его сложность в химическом составе, свойствах, не могут оказать заметного влияния на процессы, имеющие место при тонкоструйной плазменной резке.

5.2 Формирование структурного состояния в зоне реза биметаллических композиций

Как показали результаты экспериментальных исследований по оптимизации схем и режимов тонкоструйной плазменной резки биметаллических материалов, точность и качество раскроя определяется не только назначением оптимальных режимных параметров, таких как ток, состав, давление, расход плазмообразующего и завихряющего газов, но и выбором необходимой схемы раскроя, заключающимся в определении стороны биметаллического пакета, на которой будет зажигаться плазменная дуга. При определении то-

кового режима из всех возможных технологических схем следует назначать ту, которая обеспечивает раскрой требуемой толщины пакета при минимальной ширине реза, а оптимизацию его точности и качества для определенных материалов производить по скорости обработки. Данная рекомендация относится к раскрою как моно, так и биметаллических пакетов, и ее соблюдение обеспечит наиболее эффективные условия как для теплопередачи энергии от столба плазменной дуги к обрабатываемому материалу, так и для удаления продуктов расплава из канала реза. Минимальная ширина последнего способствует усилению газо и гидродинамических потоков, что реализует максимальное удаление продуктов расплава. Как показали результаты исследований, последнее во многом определяется свойствами самого расплава, в первую очередь, его изначальной кинематической вязкостью, а также возможностью ее увеличения в процессе обработки за счет протекающих химических реакций. Влияние этих процессов на точность и качество реза при тонкоструйной плазменной обработке исследуемых биметаллических композиций представлено в предшествующих разделах работы.

Данная глава работы направлена на изучение структурного состояния биметаллических материалов в зоне реза и на подтверждение средствами металлографического и рентгенофазового анализа справедливости вышеуказанных рекомендаций.

5.2.1 Композиция «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»

Как показали результаты исследований по выбору технологических схем раскроя данной композиции с оценкой точности и качества реза предпочтительней является схема Ni-Focus^{plus}, предназначенная для раскроя конструкционных углеродистых сталей с токовым режимом $I = 50$ А. Кроме лучших показателей по точности и качеству реза данная технологическая схема имеет в 1,5 раза большую производительность по сравнению со схемой Ni-Focus на режимных параметрах раскроя легированных сталей. В связи с этим дальнейшие исследования по анализу структурного состояния биметал-

ла в зоне реза будут рассматриваться в рамках схемы Hi-Focus^{plus}. Как отмечалось выше, при использовании данной схемы возможны 2 варианта раскроя биметаллического пакета, как со стороны одного металла, так и другого.

На рисунке 5.12 показано поперечное сечение зоны реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», когда рез осуществлялся со стороны нержавеющей стали.

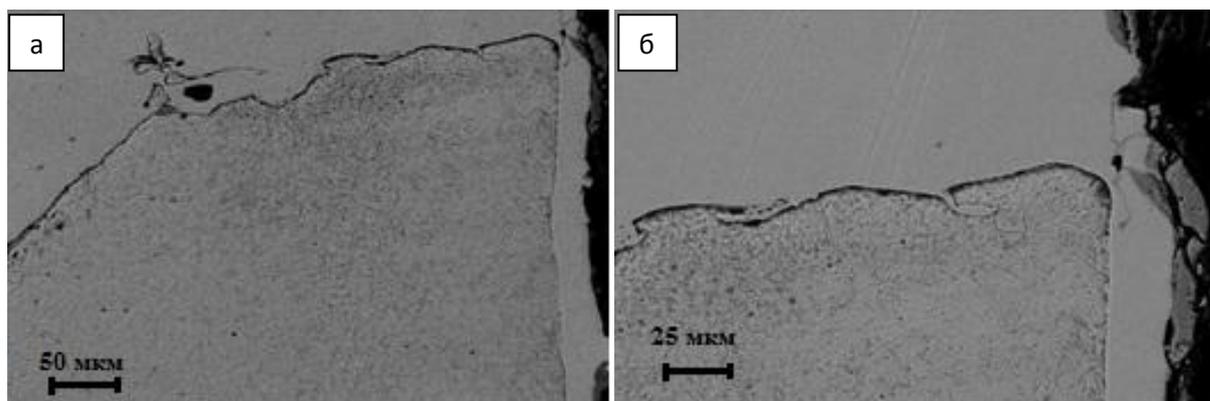


Рисунок 5.12 – Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое по технологической схеме Hi-Focus^{plus} ($I = 50 \text{ А}$, $V = 1,75 \text{ м/мин}$) со стороны стали 12Х18Н10Т

На фото поперечного сечения видно, что часть расплава с верхнего участка (сталь 12Х18Н10Т) биметалла перетекает на нижний участок низкоуглеродистой стали, осаждаясь на нем. Если в верхней части участка толщина осажденного расплава составляла $\sim 20 \text{ мкм}$ (рисунок 5.12, а), в дальнейшем она уменьшалась (рисунок 5.13, а), сходя на нет в нижней части пакета (рисунок 5.13, б).

Изучив состояние разницы осажденного расплава нержавеющей стали на нижнем участке, можно сделать предположение, что поверхность реза на участке низкоуглеродистой стали сформирована при непосредственном контакте плазменной дуги с материалом, и только после этого произошло натекание жидкой фазы с участка легированной стали. Об этом свидетельствует прямолинейность границы реза, отсутствие сплава биметаллических составляющих. Если прилегающий к границе реза слой расплава имеет однородное сплошное строение, характерное для нержавеющей стали в целом, то поверх

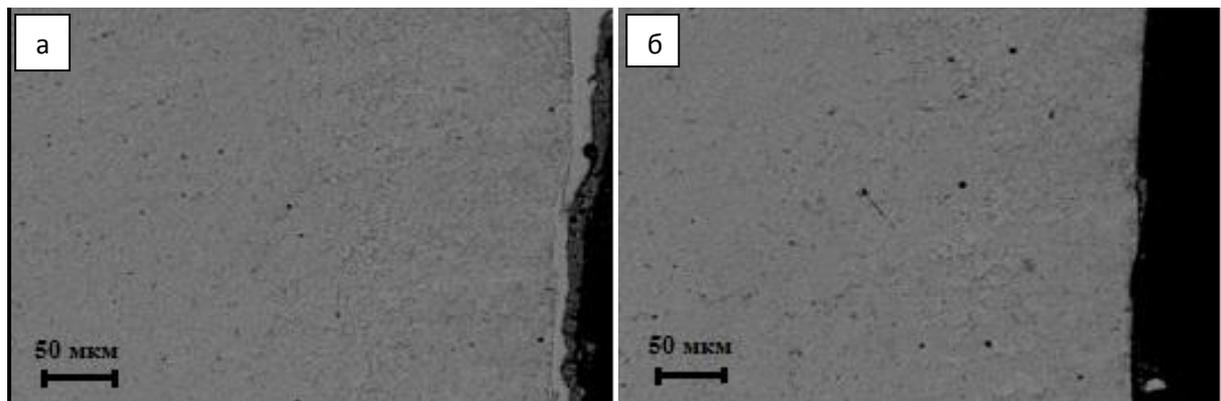


Рисунок 5.13 – Характер зоны осажденного расплава стали 12X18H10T на участке низкоуглеродистой стали

него присутствует еще один слой (рисунки 5.12, а; 5.13, а, б) с отличающейся морфологией и структурой. Толщины обоих слоев соизмеримы. В верхнем слое присутствуют поры, трещины, несплошности и отдельные фрагменты материала. Судя по структуре, данный слой является результатом взаимодействия продуктов расплава стали 12X18H10T с газовой средой в канале реза.

Так анализ результатов съемки дифракционных картин с продуктов расплава позволил выявить протекание сложных процессов взаимодействия химических элементов материалов, составляющих биметаллическую композицию, с кислородом плазмообразующего газа (рисунок 5.14).

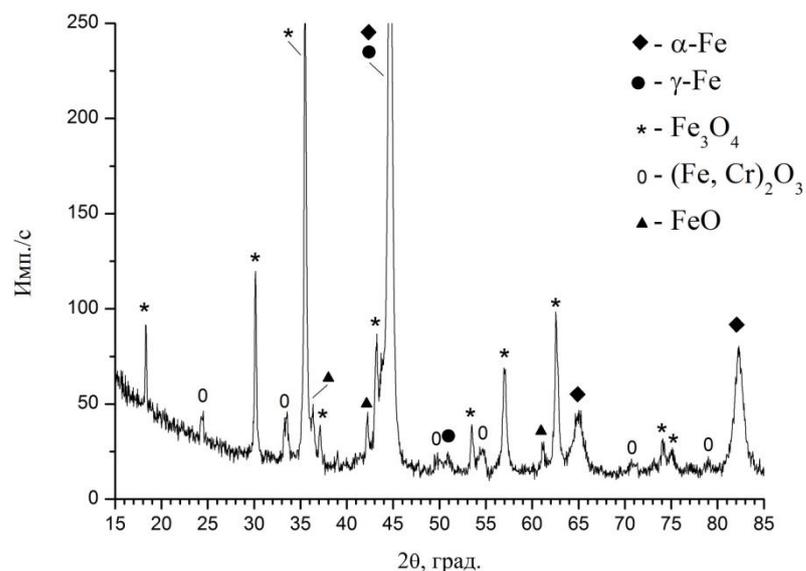


Рисунок 5.14 – Фазовый состав продуктов расплава с поверхности реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при раскрое по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны стали 12X18H10T

Установлено наличие в расплаве следующих фаз: α - железа, γ - железа, оксидов Fe_3O_4 , $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$, FeO . Образование оксидов железа и легирующего элемента нержавеющей стали – хрома свидетельствует об интенсивном их окислении в процессе реза.

Возможность протекания химических реакций элементов нержавеющей стали (таких как хром) с кислородом из состава плазмообразующего газа приводит к образованию оксидов в расплаве нержавеющей стали. Появление тугоплавких соединений в расплаве способствует повышению его вязкости и, как следствие, ухудшению выноса продуктов расплава из канала реза. Кроме этого, при стекании расплава нержавеющей стали по участку стали Ст3, в силу большей теплопроводности последней, происходит интенсивный отвод тепла от расплава, его охлаждение, еще большее повышение вязкости и, как результат, осаждение на нижнем участке.

Высококонцентрированный характер теплового воздействия, его локальность при плазменном нагреве способствуют созданию значительного градиента температур в зоне реза, что подтверждают данные математического моделирования процесса [84], а за счет скоростного отвода тепла из зоны термического воздействия в материал возможно образование закалочных структур (рисунок 5.15, а) [105, 106]. Толщина этой зоны достигает 100 -120 мкм, а структура представляет собой крупноигльчатый мартенсит, характерный для низкоуглеродистых сталей [107, 108]. Далее следует переходная зона примерно такого же размера, а затем – зона исходной структуры (рисунок 5.15, б).

Изучение микротвердости в зоне реза позволило выявить характер ее изменения в зонах термического влияния на обеих составляющих биметалла (рисунок 5.16).

Измерение микротвердости в зоне термического влияния на участке стали Ст3 подтвердило наличие зоны закалки общей толщиной до 300 мкм. Максимальное значение микротвердости (3500 – 4200 МПа) наблюдается на участке, прилегающем к поверхности реза и имеющим структуру мартенси-

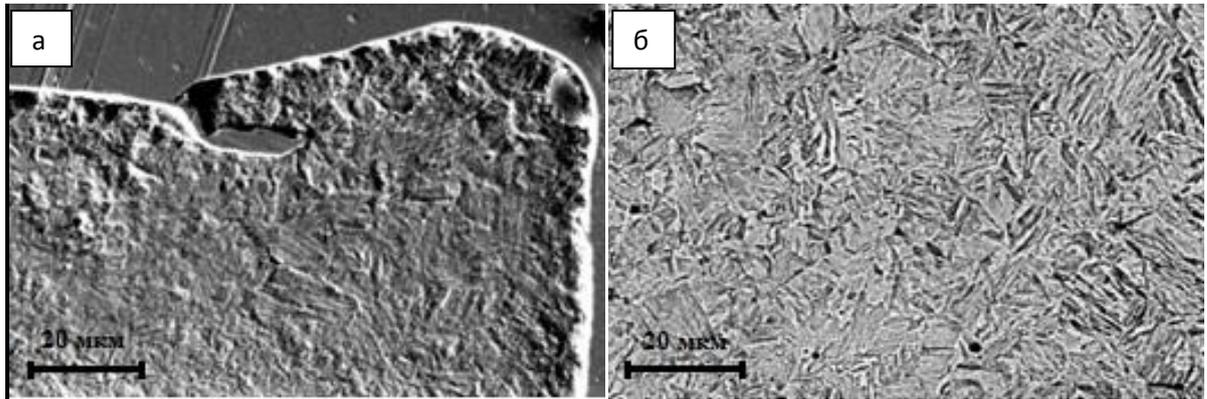


Рисунок 5.15 – Зона термического влияния на участке стали Ст3 при раскрое биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» со стороны стали 12Х18Н10Т

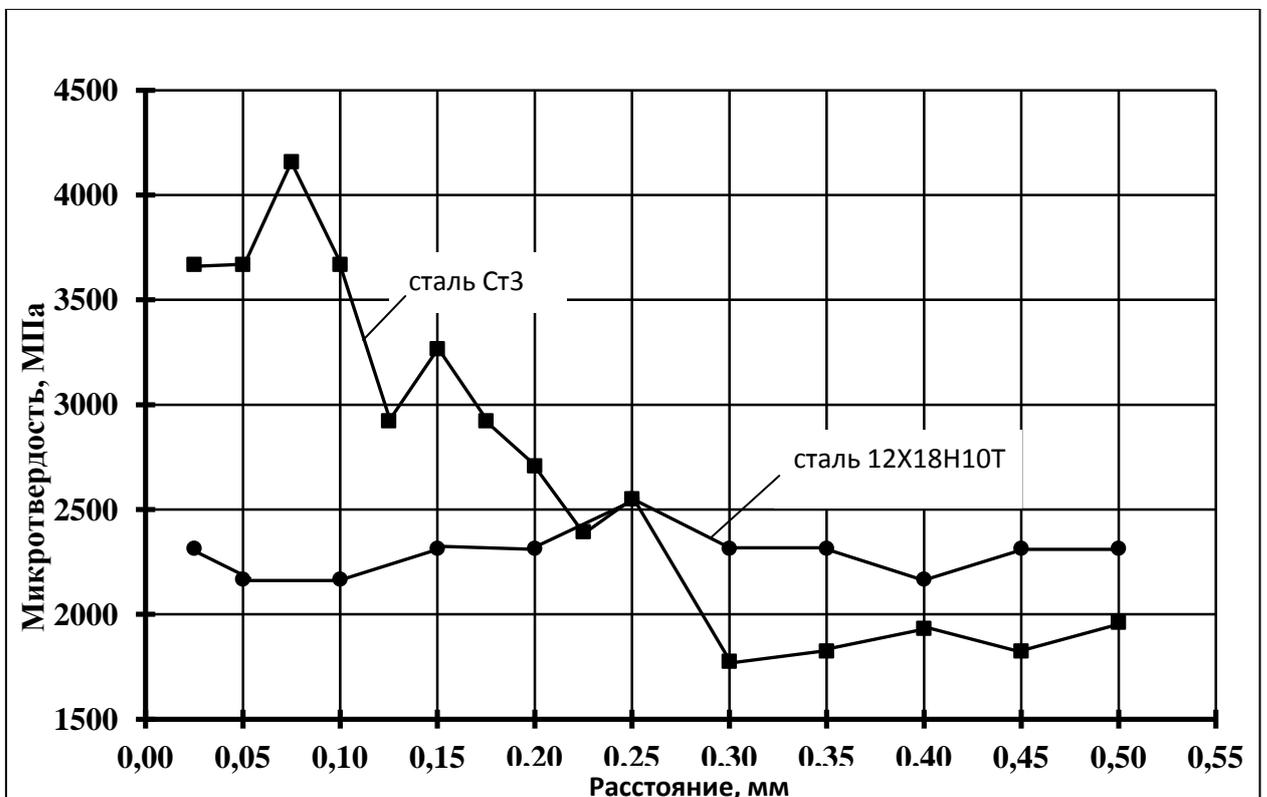


Рисунок 5.16 – Характер распределения микротвердости в зонах термического влияния при раскрое композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» со стороны стали 12Х18Н10Т

та. Величина микротвердости соответствует низкоуглеродистому мартенситу. В переходной зоне наблюдается снижение микротвердости от 3000 до 1800 МПа, соответствующей твердости исходной структуры стали Ст3.

Структура переходной зоны представляет собой сочетание участков структурно-свободного феррита и мартенсита в областях бывших перлитных колоний [109].

Исследование микротвердости в зоне термического влияния на участке нержавеющей стали 12Х18Н10Т не установило ее отличия от микротвердости исходной структуры, что полностью соответствует поведению сталей аустенитного класса в условиях скоростного нагрева и охлаждения без образования закалочных структур.

Использование второго варианта раскроя биметаллической композиции – со стороны низкоуглеродистой стали позволило получить наилучшие показатели реза по точности и качеству. Действительно, при четкой геометрии реза на всем его протяжении отсутствуют следы осажденного расплава (рисунок 5.17).

Рез на границе стыка металлов не имеет каких либо уступов, поднутрений, что объясняется весьма близкими температурами плавления обеих составляющих биметалла. Отсутствие следов осаждения расплава стали Ст3 на обоих участках свидетельствует о полном его удалении из канала реза благодаря низкой кинематической вязкости расплава низкоуглеродистой стали и отсутствию в ее составе химических элементов, способных образовывать тугоплавкие соединения при взаимодействии с газовой средой. Высокие давления и расходы газов, используемых в технологии Hi-Focus^{plus}, также способствуют созданию развитых газодинамических потоков для удаления продуктов расплава из канала реза.

На нижнем участке (нержавеющая сталь) также отсутствуют следы осаждения расплава стали 12Х18Н10Т, что можно объяснить малым расстоянием для выноса расплава из канала реза.

Если сравнивать рассматриваемую схему раскроя композиции с предыдущей, когда рез осуществлялся со стороны стали 12Х18Н10Т, то следует иметь в виду, что в данном случае верхний участок (сталь Ст3) находится в более теплонапряженном состоянии, что объясняется физикой строения плаз-

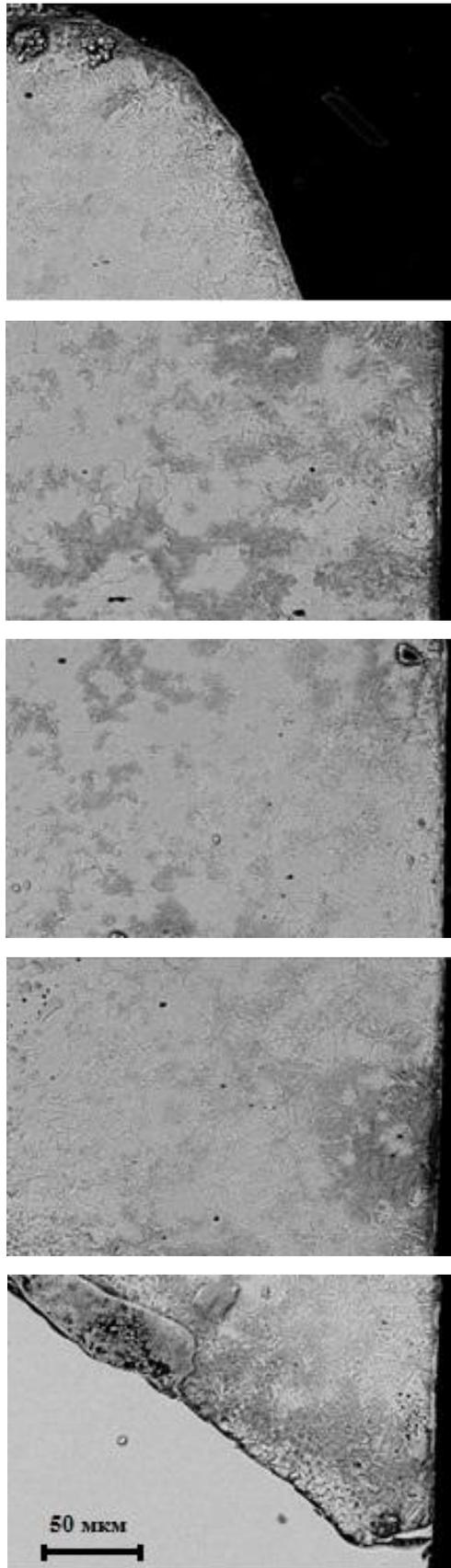


Рисунок 5.17 – Панорама реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

менной дуги и процессами теплопередачи к обрабатываемому материалу (рисунок 1.7). Действительно, в случае, когда лобовой поверхностью реза пакета является сталь Ст3, зона термического влияния увеличена и достигает 350 мкм, а участок мартенситных превращений – 150 – 170 мкм (рисунок 5.18).

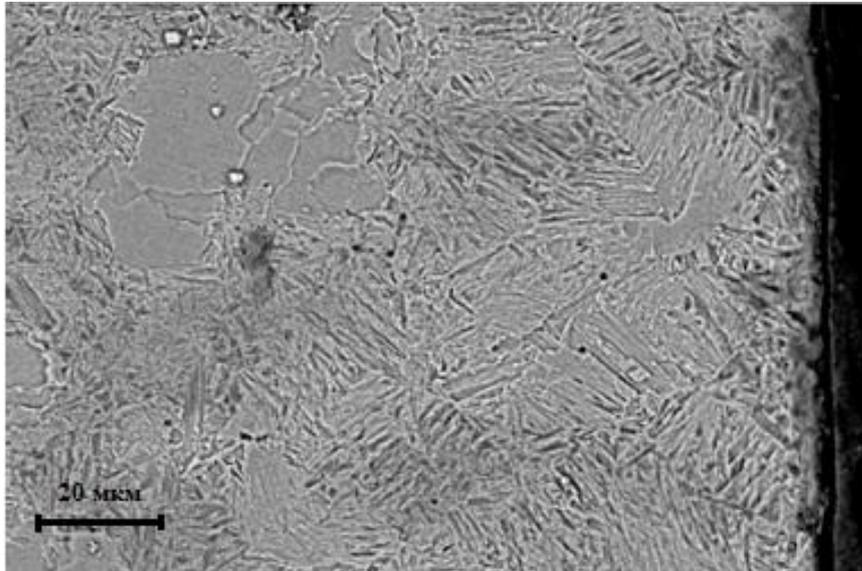


Рисунок 5.18 – Зона термического влияния на участке стали Ст3 при раскросе биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» со стороны стали Ст3

Характер распределения микротвердости в зонах термического влияния представлен на рисунке 5.19.

Характер микротвердости на участке стали 12Х18Н10Т соответствует микротвердости исходной структуры, что соответствует результатам исследований по предыдущей схеме.

Таким образом, металлографические исследования зоны реза рассматриваемой композиции и рентгенофазовый анализ продуктов расплава подтвердили справедливость высказанных предположений о процессах, протекающих в канале реза при тонкоструйной плазменной резке, и позволили количественно определить еще один показатель качества раскроя – размер зоны термического влияния, установить характер распределения микротвердости в них и выявить особенности структурного состояния материалов.

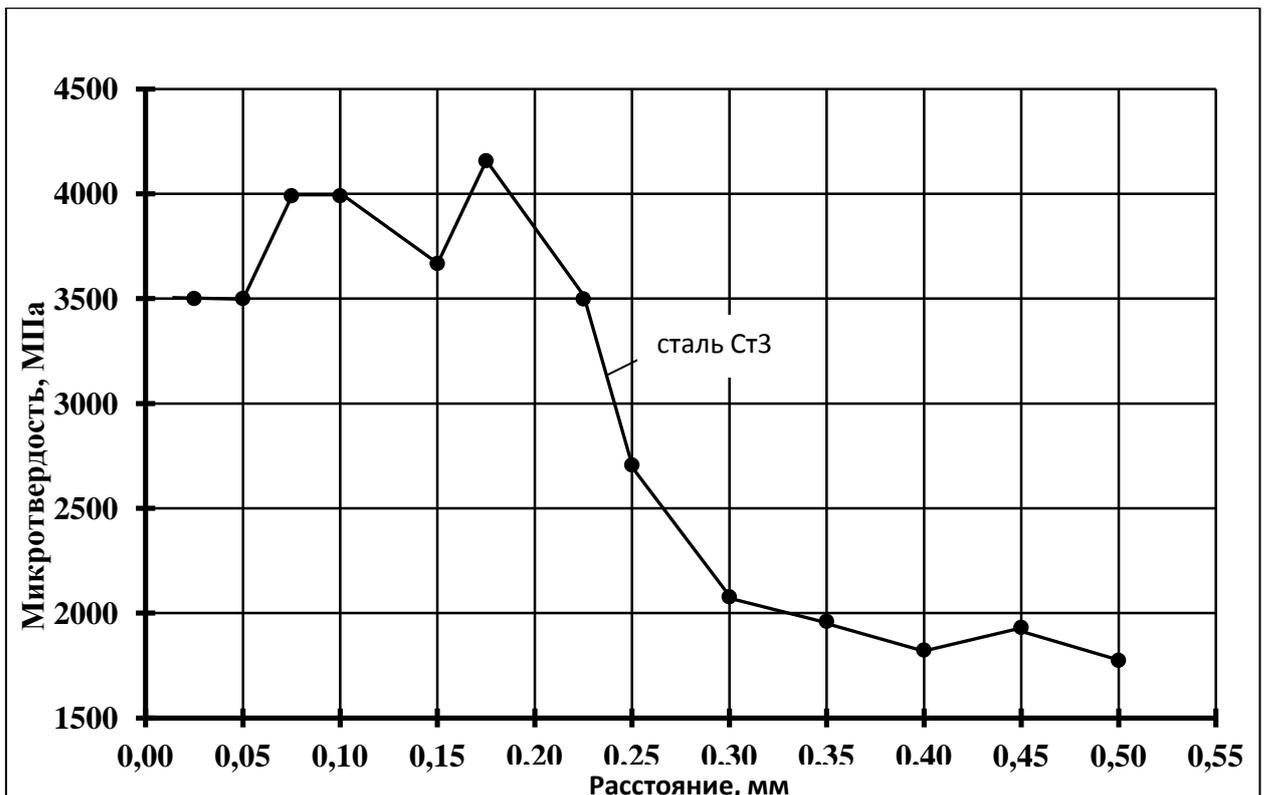


Рисунок 5.19 – Характер распределения микротвердости в зонах термического влияния при раскroe композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» со стороны стали Ст3

5.2.2 Композиция «сталь Ст3 + алюминий А5М»

Как отмечалось ранее, данная композиция представляет собой соединение металлов с резко отличающимися теплофизическими свойствами – температурой плавления, теплопроводностью, кинематической вязкостью их расплавов. Это различие и определяет основные трудности в подборе технологических схем и режимов для раскроя биметаллических пакетов данной композиции.

При использовании технологической схемы Ni-Focus^{plus} для раскроя пакета со стороны стали и с учетом строения плазменной дуги в канале реза (рисунок 1.7) предполагалось, что максимальная теплопередача от участков плазменного столба дугового разряда и анодного пятна будет происходить в верхней половине биметаллического пакета – на участке стали Ст3, темпера-

тура плавления которой превышает $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с учетом задействования механизма кислородной резки температура плавления окиси железа снижается до $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$). Менее теплонапряженная часть дугового разряда – факельная распространяется на участке алюминия с низкой температурой плавления ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$). Даже такое, казалось бы, благоприятное распределение теплонапряженности процесса резки не обеспечивает благоприятной формы реза (рисунок 5.20).

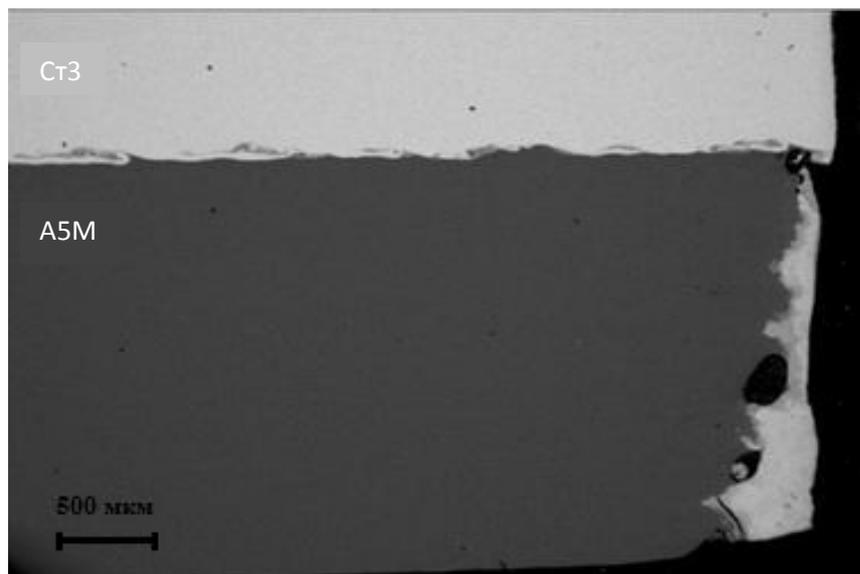


Рисунок 5.20 – Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Hi-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

На верхнем участке стали геометрия реза по точности и качеству традиционно для данной технологической схемы хорошая без осаждения элементов расплава (рисунок 5.21).

Ширина зоны термического влияния ($\sim 250 - 300\text{ мкм}$) и ее структура на этом участке является традиционной для раскроя углеродистых сталей по данной технологической схеме.

Геометрия реза и его качество на нижнем участке биметаллической композиции имеют существенные отличия (рисунок 5.19). Во-первых, на границе стыка металлов сформирован уступ размером $\sim 200\text{ мкм}$ на сторону

реза, что свидетельствует о расширении канала реза на данном участке до 0,4 мм. Во-вторых, канал реза меняет свои размеры на участке алюминия, внизу пакета отклонение составляет уже 0,8 мм на сторону. В-третьих, рез не имеет правильной геометрии, а представляет собой волнообразную кривую, не имеющую регулярность характера. В-четвертых, на рассматриваемом участке имеют место остатки расплава стали переменной толщины с наличием дефектов в виде пор, пустот, трещин, отдельных фрагментов материала.

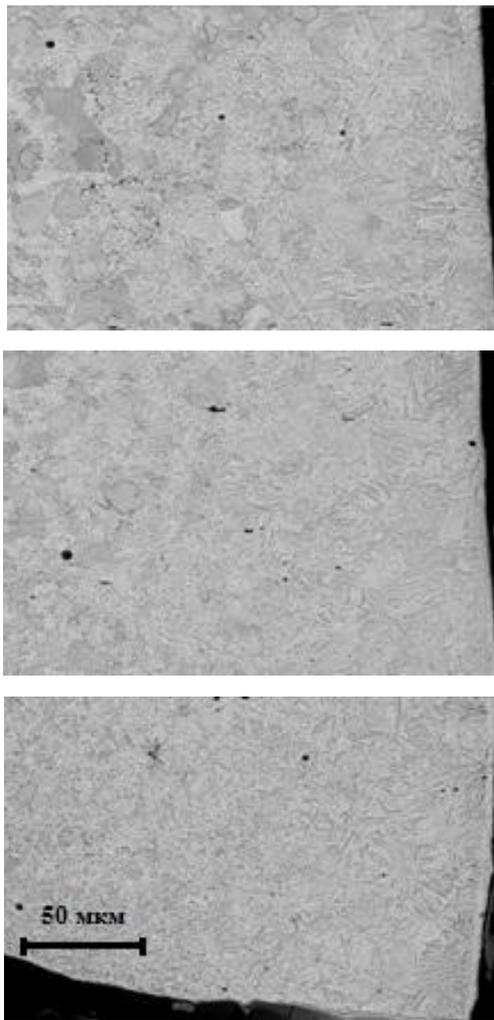


Рисунок 5.21 – Панорама реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» на участке стали Ст3 при раскросе пакета по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

Подобный характер формирования реза данной композиции можно объяснить следующим образом. В силу значительной разницы в температурах плавления железа и алюминия даже с учетом меньшей теплонапряженно-

сти процесса в зоне действия факела плазменной дуги на участке алюминия, расплавление последнего происходит в больших объемах, чем у стали, что и приводит к формированию разной ширины канала реза на участках составляющих с образованием уступа на их границе. Этому способствует также существенная разница в теплопроводностях стали и алюминия, что обеспечивает дополнительный приток тепла в нижнюю часть биметаллической композиции. Если бы формирование канала реза ограничивалось бы действием рассмотренных процессов, то на участке алюминия он был бы геометрически ровным с сужением к низу. Однако, образование уступа на границе сталь – алюминий, представляющего собой своеобразную нишу, приводит к искажению и ослаблению газодинамических потоков и способствует попаданию туда части расплава стали с верхнего участка. Медленное (относительно скорости гидродинамических потоков выноса основной массы расплава из канала реза газовыми потоками) стекание высокотемпературного расплава стали по каналу реза на участке алюминия за счет высокой теплопроводности последнего, приводит к появлению жидкой фазы и расширению канала. Таким образом, жидкая ванна расплава стали является источником тепла в этот момент времени для дальнейшего расплавления алюминия. Поскольку стекание расплава не может быть равномерным на всем протяжении канала, расплавление материала по объему также неравномерно. Это приводит к формированию подобной геометрии канала реза на участке алюминиевой составляющей биметалла. Постепенное охлаждение расплава по мере стекания по каналу реза приводят к его кристаллизации и осаждению.

Характер распределения микротвердости в зоне термического влияния подтверждает представленные соображения о процессах формирования канала реза в исследуемой биметаллической композиции (рисунок 5.22).

Изменение микротвердости на участке низкоуглеродистой стали имеет традиционный характер – постепенного снижения от максимума (~ 4000 МПа) у поверхности до исходного значения (~ 1800 МПа) на границе зоны термического влияния.

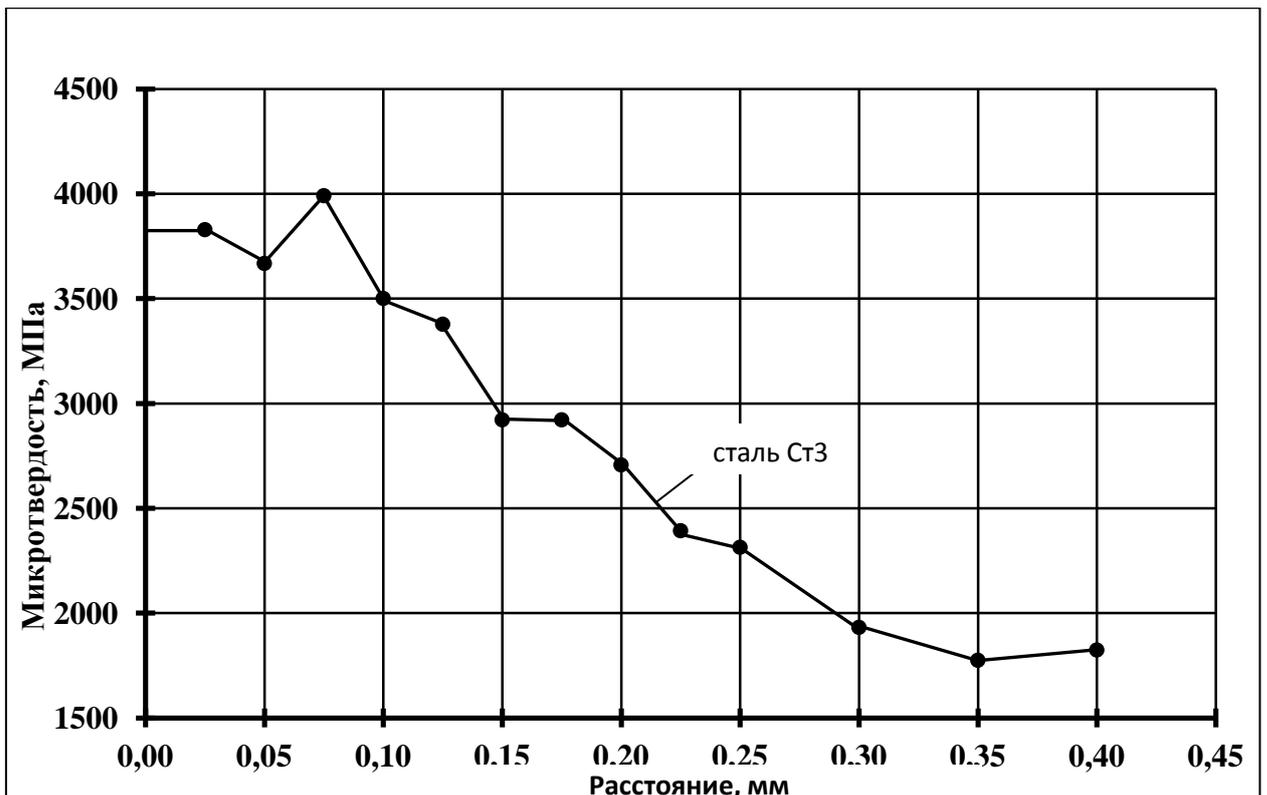


Рисунок 5.22 – Характер распределения микротвердости в зонах термического влияния при раскросе композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» со стороны стали Ст3

Микротвердость на участке алюминия не претерпела изменений в результате воздействия низкотемпературной плазмы и соответствовала микротвердости исходного материала.

Смена лобовой стороны реза со стали на алюминий в рамках технологической схемы Ni-Focus^{plus} также не обеспечивает улучшения геометрии и качества реза (рисунок 5.23). Если геометрия реза на верхнем (алюминиевом) участке биметалла, характерная для раскроса металлов с высокой теплопроводностью, сформирована действием непосредственно плазменной дуги, то на нижнем (стальном) участке в окончательном формировании канала реза участвует расплав алюминия. Если в предыдущем случае натекание расплава стали на участке алюминия было вызвано образованием ниши на пути движения расплава и ослаблением газодинамических условий в расширенном канале реза, то в данной схеме осаждение расплава алюминия, главным образом, обусловлено его высокой кинематической вязкостью.

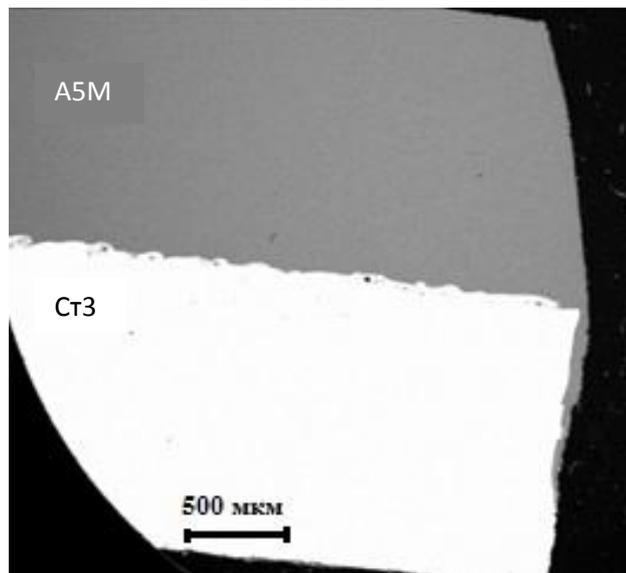


Рисунок 5.23 – Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое пакета по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

Характер геометрии канала на участке стали свидетельствует о том, что его окончательное формирование определяется не действием плазменной дуги, а его подплавлением от стекающих по нему элементов расплава алюминия (рисунок 5.24).

Уменьшение зоны термического влияния на участке стали по оценкам структурного состояния до 150 – 180 мкм свидетельствует о снижении температурного градиента в случае, когда источником тепла является стекающий расплав по сравнению с прямым действием на обрабатываемый материал плазменной дуги.

Осажденный в канале реза расплав представляет собой продукты кристаллизации из расплава, как алюминия, так и стали и оксида алюминия, что подтверждают результаты рентгенофазового анализа (рисунок 5.25).

При этом в расплаве имеют место поры, трещины и отдельные частицы стали Ст3 (рисунок 5.26).

Использование менее энергоемкой технологической схемы Ni-Focus на режимах раскроя алюминиевых сплавов в целом не изменило в лучшую сторону картину формирования канала реза, структурного состояния при раскрое с любой стороны биметаллического пакета.

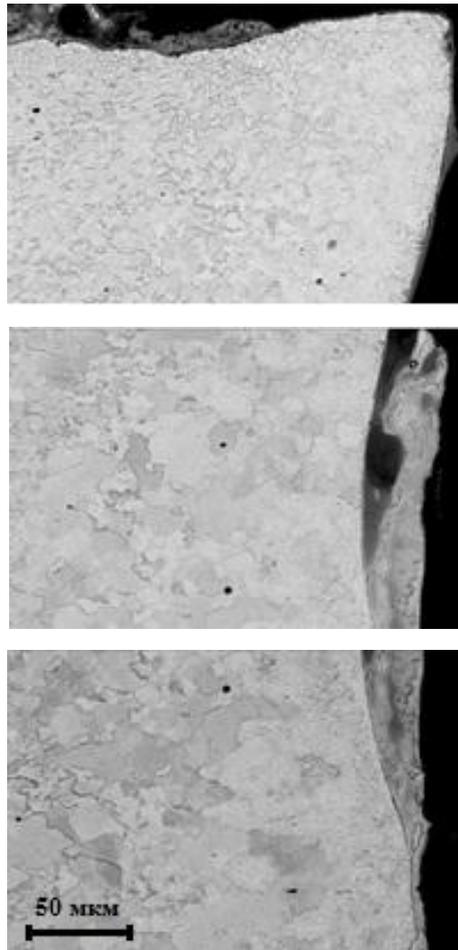


Рисунок 5.24 – Формирование канала реза на участке стали Ст3 при раскрое композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

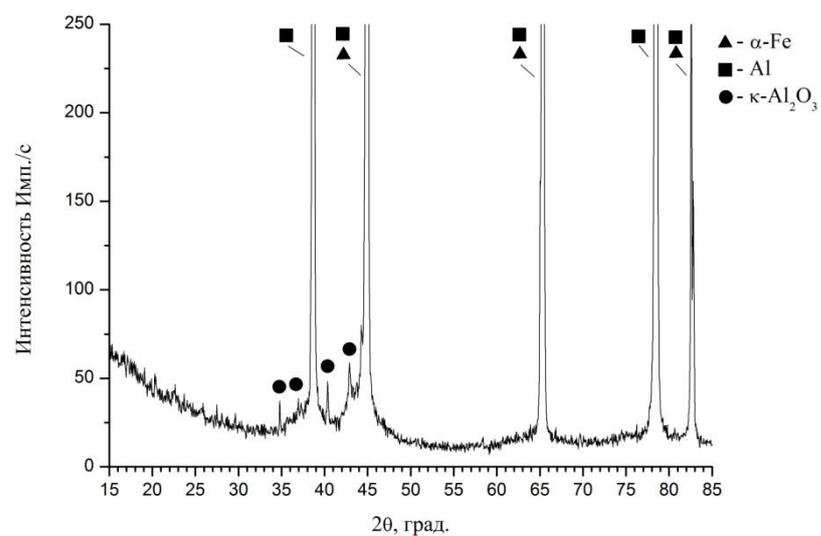


Рисунок 5.25 – Фазовый состав продуктов расплава с поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» при раскрое по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

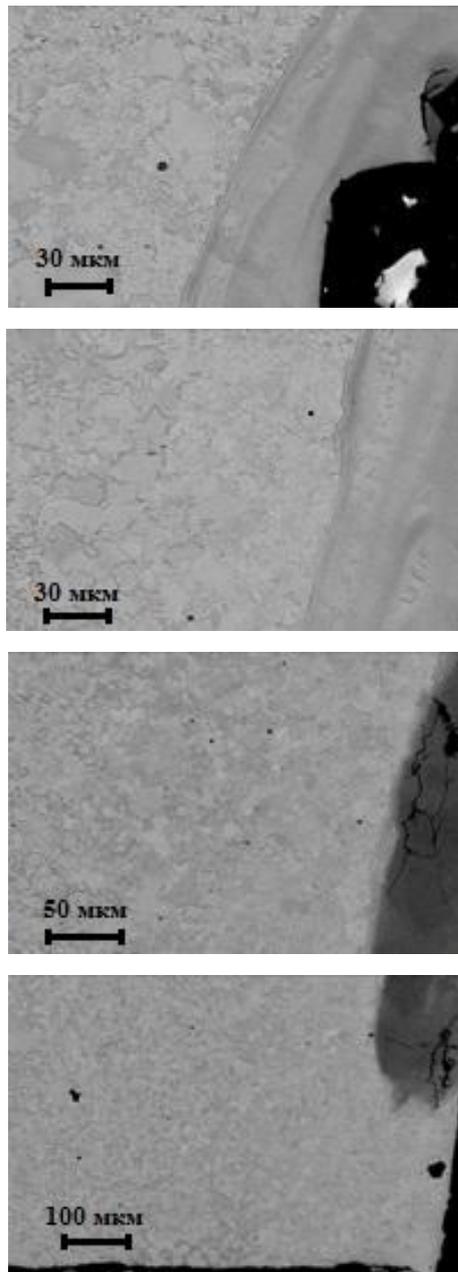


Рисунок 5.26 – Структура осажденного расплава в канале реза на участке стали Ст3 при раскрое композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны алюминия А5М

5.2.3 Композиция «сталь Ст3 + медь М1»

Как отмечалось (раздел 3.2.2), разработчик технологий Ni-Focus не устанавливает определенных рекомендаций по режимным параметрам в рамках какой-либо технологической схемы для тонкоструйного плазменного раскроя меди и ее сплавов. Принимая во внимание теплофизические свойства меди

M1, ее химический состав, наиболее предпочтительной для раскроя меди и композиции «сталь Ст3 + медь M1» представляются технологические схемы Ni-Focus^{plus}, Ni-Focus на режимных параметрах, рекомендованных для раскроя углеродистых сталей. Результаты оптимизации режимов применительно к раскрою используемой марки меди и ее композиции со сталью Ст3 представлены в разделах 3.2.2 и 4.3. В связи с этим изучение структурного состояния поверхности реза композиции «сталь Ст3 + медь M1» проводилось при раскroe по технологической схеме Ni-Focus^{plus} как со стороны стали Ст3, так и меди M1.

На рисунке 5.27 показано поперечное сечение реза исследуемой композиции при раскroe со стороны стали Ст3.

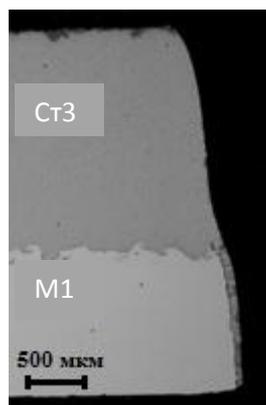


Рисунок 5.27 – Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + медь M1» при раскroe по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

При относительно благоприятной геометрии реза на протяжении верхнего участка стали (рисунок 5.28, а, б) по мере приближения к границе стыка металлов наблюдается отклонение реза от перпендикулярности с сужением канала реза (рисунки 5.28, в, г; 4.27). Далее отмечается натекание расплава стали на поверхность реза на участке меди.

Такой характер формирования геометрии реза исследуемой композиции можно объяснить существенной разницей (до 10 раз при $T = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$) в теплопроводности составляющих биметалла, что приводит к оттоку тепла от стали к меди и тем интенсивнее, чем ближе граница раздела металлов. Такое

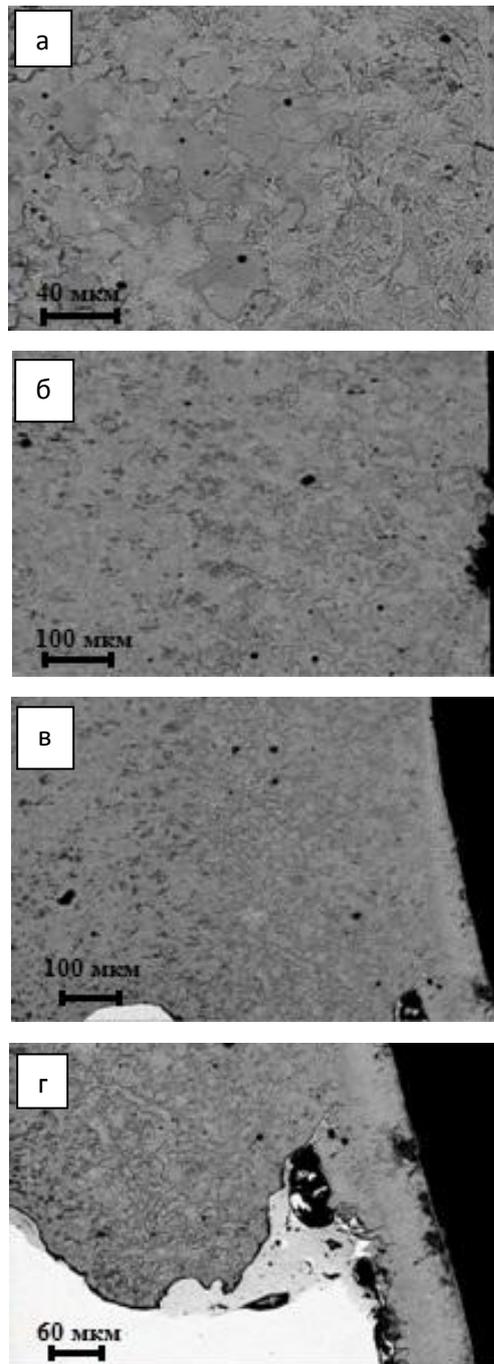


Рисунок 5.28 – Панорама реза на участке стали Ст3 при раскросе композиции «сталь Ст3 + медь М1» по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

перераспределение тепла искажает тепловое поле, что объясняет искривление реза на границе биметаллического стыка. Как отмечено, при этом имеет место натекание расплава стали на участке меди, чего не наблюдалось в аналогичных схемах раскроса композиций «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», «сталь Ст3 + алюминий А5М». Причины подобного дефекта в исследуемом

случае объясняются тем, что при сужении канала реза на границе стыка металлов потоки расплава стали при своем движении неизбежно контактируют с медью, и в силу ее высокой теплопроводности происходит резкое охлаждение расплава стали и его кристаллизация на поверхности реза.

Исследование структуры расплава стали свидетельствует о ее формировании в условиях скоростного отвода тепла с наличием завихрений, обусловленных действующими газодинамическими потоками, а также дефектов в виде пор и трещин (рисунок 5.29, а, б).

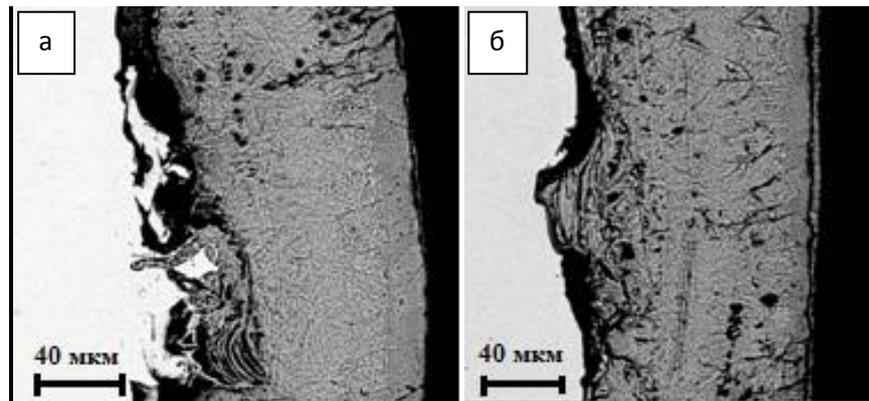


Рисунок 5.29 – Структура расплава стали, осажденного на участке меди при раскросе композиции «сталь Ст3 + медь М1» по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны стали Ст3

Структура стали Ст3 в зоне термического влияния является традиционной в условиях высокоскоростного нагрева и охлаждения низкоуглеродистой стали (рисунок 5.28, а), а характер распределения микротвердости и ее уровень аналогичен результатам, полученным при обработке предшествующих композиций.

Смена лобовой стороны реза со стали на медь изменяет как геометрию реза пакета в целом, так и термодинамические условия удаления расплава из канала реза (рисунок 5.30).

Формирование геометрии на участке меди, характерное для термических методов резки металлических материалов с высокой теплопроводностью, имеет определенную конусность реза, точность и качество которого подробно исследовано при тонкоструйной плазменной резки модельного ма-

териала – меди (раздел 3.2.2). Геометрия реза на участке стали также соответствует выявленным ранее закономерностям ее формирования при раскросе модельного материала – стали Ст3, которая характеризуется максимальной точностью ($\alpha_{cp} \rightarrow 0$) и хорошей микрогеометрией поверхности реза. Особенности геометрии реза в зоне сварки (рисунок 5.31) определяются резким изменением теплопроводности на границе стыка медь – сталь.

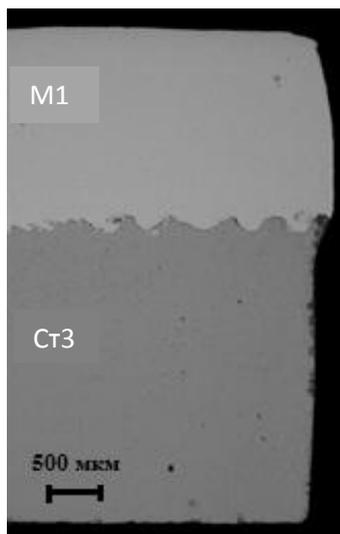


Рисунок 5.30 – Поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскросе по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны меди М1

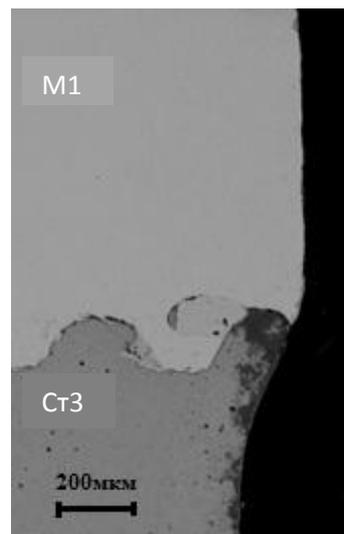


Рисунок 5.31 – Особенности геометрии реза в зоне сварки композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскросе по технологической схеме Ni-Focus^{plus} со стороны меди М1

Следует отметить, что исследуемая схема тонкоструйной плазменной резки данной композиции со стороны меди обеспечивает формирование поверхности реза на обоих участках без видимых следов осаждения расплава меди и стали (рисунок 5.30). Это свидетельствует об оптимальности термодинамических условий раскроса композиции и эффективности газодинамических потоков в зоне реза, обеспечивающих полное удаление продуктов расплава.

5.3 Технологические рекомендации по раскрою биметаллических композиций с использованием тонкоструйной плазменной резки

Проведенные технологические эксперименты, направленные на выбор технологических схем, назначение режимных параметров раскроя листовых металлических материалов, а в случае обработки биметаллических композиций и установление лобовой стороны реза основаны на оптимизации процесса по критериям точности и качества обработки. Металлографические и рентгенофазовые исследования позволили выявить особенности формирования канала реза при тонкоструйном плазменном раскросе исследуемых биметаллических композиций. Совокупность полученных результатов позволяет сформулировать обобщенные технологические рекомендации по раскрою биметаллических композиций с использованием тонкоструйной плазменной резки:

1. Набор приемлемых технологических схем по раскрою конкретной биметаллической композиции из существующей композиции должен определяться классами материалов, представленных в композиции.
2. Назначение режимных параметров (вид плазмообразующего и завихряющего газов, их давление и расход, токовый режим, ориентировочный диапазон скоростей обработки) следует осуществлять исходя из толщины пакета биметаллической композиции.
3. При наличии в выборе нескольких технологических схем, что является характерным для обработки в диапазоне малых и средних толщин реза, предпочтение следует отдать схеме с наименьшим значением токового режима, обеспечивающей формирование наименьшей ширины реза, а следовательно, реализующей наилучшие условия для удаления продуктов расплава, обеспечивая благоприятную морфологию поверхности реза и минимизируя графообразование на его кромках.
4. Если в биметаллической композиции имеет место преобладание одного из материалов по толщине, то выбор технологической схемы должен

быть ориентирован на этот материал и раскрой композиции необходимо проводить с его стороны.

5. При сопоставимости толщин материалов, составляющих биметаллическую композицию, технологическая схема раскроя должна соответствовать материалу с наименьшей кинематической вязкостью расплава и наименьшей склонностью к образованию тугоплавких химических соединений элементов расплава с газовой средой в канале реза.

6. При выборе лобовой стороны раскроя биметаллической композиции необходимо иметь в виду, то, что материал с повышенной вязкостью расплава должен находиться в нижней части пакета.

7. Для биметаллических композиций материалов, обладающих существенной разницей в температурах плавления характерно расширение канала реза, если материал с минимальной температурой плавления находится в нижней части пакета.

8. Выбор в качестве лобовой стороны материала с высокой теплопроводностью приведет к формированию реза со значительным отклонением от перпендикулярности на его участке. Смена лобовой стороны позволит повысить точность реза на участке материала с высокой теплопроводностью, но возможно осаждение на нем элементов расплава с верхнего участка.

9. При назначении режимных параметров раскроя биметаллической композиции с материалом с высокой теплопроводностью в верхней части пакета скорость раскроя следует назначать ближе к нижней границе рекомендованного диапазона. В противном случае возникает опасность непрореза пакета на всю толщину.

10. Для исключения образования дефектов на поверхности реза и графообразования на его нижних кромках при раскрое биметаллических композиций, в состав которых входят материалы, склонные к образованию нитридов и оксидов в процессе резки, следует выбирать технологические схемы с инертными газами в качестве плазмообразующих и завихряющих.

11. Для эффективного удаления продуктов расплава из канала реза для обработки композиций, составляющими которой являются материалы с повышенной кинематической вязкостью, следует рекомендовать технологические схемы с максимальными значениями давлений и расходов плазмообразующего и завихряющего газов.

12. Улучшение газодинамических потоков в канале реза возможно при дальнейшем совершенствовании как конструкции элементов плазмотрона, так и при создании новых технологических схем (введение дополнительного обдува).

5.4 Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что исследуемые композиции металлических материалов, полученные сваркой взрывом, имеют волнообразный характер сварного соединения с проявлением в различной степени ламинарного, вихревого и турбулентного течения материала на границе стыка металлов. Выявлены зоны механического перемешивания свариваемых материалов, участки, сформированные из расплавов с наличием дефектов в виде пор и микротрещин, а также отдельных фрагментов металлов. Теоретически рассчитаны и экспериментально подтверждены значения геометрических параметров волн пластического течения материалов. Так длины волн пластического течения для исследованных биметаллических композиций находятся в диапазоне от 500 до 850 мкм, а их амплитудные значения – от 110 до 250 мкм. Не смотря на волнообразный характер сварного шва в исследуемых биметаллических композициях, последние в условиях тонкоструйной плазменной резки можно рассматривать как плоское, безззорное, вакуумно плотное соединение двух металлов, различающихся между собой по механическим и теплофизическим свойствам.

2. Средствами металлографического и рентгенофазового анализа подтверждена правомерность решений по выбору технологических схем тон-

коструйной плазменной резки, назначению режимных параметров и установлению лобовой стороны раскроя исследуемых биметаллических композиций, принятых по оценкам геометрической точности и качества реза.

3. Установлено, что ухудшение точности и качества реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое со стороны нержавеющей стали связано с натеканием и осаждением ее расплава на участке низкоуглеродистой стали. Выявлено, что зона осажденного расплава состоит из 2-х слоев, различающихся как морфологически, так и структурно. Если слой расплава, прилегающий к границе реза на участке стали Ст3 имеет однородное сплошное строение, то в верхнем слое присутствуют поры, трещины, несплошности и отдельные фрагменты металла. Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о наличии в составе осажденного материала продуктов взаимодействия химических элементов нержавеющей стали с газовой средой в канале реза – оксидов Fe_3O_4 , $(Fe, Cr)_2O_3$, FeO . Образование оксидов железа и хрома в канале реза приводит к повышению вязкости расплава и, как следствие, ухудшению процессов удаления продуктов обработки из канала реза. Замедление скорости выноса расплава приводит к увеличению времени его контактирования с поверхностью реза на участке стали Ст3, что в сочетании с повышенной теплопроводностью последней, сопровождается интенсивным отводом тепла от расплава, его охлаждением, дальнейшим повышением вязкости и, как результат, осаждением на поверхности канала реза.

Изменение лобовой стороны раскроя с нержавеющей стали на низкоуглеродистую устранило возникновение подобного дефекта на поверхности реза, что связано с меньшим временем пребывания расплава нержавеющей стали в канале реза, более коротким расстоянием для удаления продуктов ее расплава, а также более низкой вязкостью расплава низкоуглеродистой стали в виду отсутствия в ее составе химических элементов, способных образовывать тугоплавкие оксиды, повышающие вязкость расплава.

4. Наиболее сложной с позиций обеспечения точности и качества при тонкоструйной плазменной резке является композиция «сталь Ст3 +

алюминий А5М». Раскрой биметаллического пакета со стороны алюминия приводит к интенсивному осаждению продуктов его расплава на участке низкоуглеродистой стали, что объясняется высокой кинематической вязкостью расплава алюминия, вследствие низкой его плотности. Металлографические и рентгенофазовые исследования показали, что в составе осажденного материала присутствуют элементы продуктов расплава алюминия, стали, оксидов алюминия (Al_2O_3) с наличием пор и трещин. Высокая кинематическая вязкость расплава алюминия изменяет механизм взаимодействия плазменной дуги и обрабатываемого материала на участке низкоуглеродистой стали, когда теплопередача осуществляется через слой стекающего расплава алюминия.

Выбор в качестве лобовой стороны раскроя данной композиции стали Ст3 при удовлетворительном значении среднего отклонения реза от перпендикулярности сопровождается образованием поднутрения на участке алюминия, заполненного продуктами расплава низкоуглеродистой стали с верхнего участка. Последнее подтверждается данными структурного и рентгенофазового анализа. Факт образования подобной геометрии реза связан со значительной разницей в температурах плавления составляющих биметалла, а условия осаждения расплава стали связаны с ослаблением газодинамических потоков при расширении канала реза.

5. Тонкоструйная плазменная резка биметаллического пакета «сталь Ст3 + медь М1» при раскрое со стороны меди не сопровождается осаждением продуктов расплава на поверхности реза, что свидетельствует об оптимальности термодинамических условий раскроя композиции и эффективности газодинамических потоков, обеспечивающих полное удаление продуктов расплава из канала реза.

При смене лобовой стороны раскроя с меди на сталь отмечено натекание расплава стали на нижнем участке меди, что связано со значительной разницей в теплопроводностях металлов, составляющих композицию, что приводит к резкому охлаждению расплава стали и его осаждению на поверх-

ности реза. Металлографические исследования позволили выявить наличие дефектов в продуктах расплава в виде пор и трещин.

6. Выявлено наличие зон термического влияния на участке низкоуглеродистой стали, обусловленной высокоскоростным локальным характером теплового воздействия при тонкоструйной плазменной резке. Размер зоны термического влияния составляет 250 – 300 мкм при раскрое со стороны стали Ст3 и 150 – 180 мкм – при раскрое с обратной стороны композиции. Структура зоны термического влияния представляет собой крупноигольчатый мартенсит, характерный при закалке низкоуглеродистых сталей. Установлен характер распределения микротвердости в пределах зоны термического влияния с максимальным значением 3500 – 4200 МПа у поверхности реза.

7. Разработаны технологические рекомендации по раскрою биметаллических композиций с использованием тонкоструйной плазменной резки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе изложены результаты исследований процессов тонкоструйной плазменной резки, расширяющие ее технологические возможности в раскрое биметаллических композиций, полученных сваркой взрывом разнородных материалов.

1. На основании аналитического обзора существующих технологий резки материалов наиболее перспективной для раскроя биметаллических композиций представляется современная модификация плазменно-дуговой резки – тонкоструйная плазменная резка, обеспечивающая точность и качество реза металлических материалов в диапазоне толщин до 80 мм на уровне лазерных технологий при высоких показателях производительности и экономичности процесса.

2. Выбор приемлемой технологической схемы и оптимизация режимных параметров раскроя модельных материалов, составляющих биметаллические композиции, позволили достичь следующих показателей точности и качества реза при раскрое:

- низкоуглеродистой стали Ст3: отклонение реза от перпендикулярности составляет $\alpha = 3,5^\circ - 4,0^\circ$, шероховатость поверхности реза $Ra = 1,5 - 2,0$ мкм, минимальное количество легкоотделимого грата на кромках реза;
- нержавеющей стали 12Х18Н10Т: отклонение реза от перпендикулярности на уровне показателей реза низкоуглеродистой стали; шероховатость поверхности реза $Ra = 2,5 - 5,8$ мкм, наличие зоны осаждения расплава и незначительное количество грата;
- алюминия А5М: отклонение реза от перпендикулярности составляет $\alpha = 9,1^\circ - 9,3^\circ$, шероховатость поверхности реза $Ra = \sim 12$ мкм, наличие следов расплава на поверхности реза и значительное количество грата на нижней его кромке;

- меди М1: существенное отклонение реза от перпендикулярности $\alpha = 12,7^\circ - 15,5^\circ$, шероховатость поверхности реза $Ra = 3,0 - 6,0$ мкм, при отсутствии следов расплава на поверхности реза и грата.

3. Экспериментально установлено, что из возможных технологических схем раскроя композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» наиболее привлекательной является схема Ni-Focus^{plus} с токовым режимом $I = 50$ А для углеродистых сталей при обработке пакета со стороны стали Ст3. Это обеспечивает достижение максимальной точности реза ($\alpha \rightarrow 0$), как на отдельных участках биметалла, так и для пакета в целом, высокое качество поверхности реза ($Ra = 1,5 - 2,0$ мкм), полное отсутствие грата на нижних кромках реза при высокой скорости раскроя ($V = 1,5$ м/мин).

4. Наилучшие показатели точности и качества раскроя биметаллической композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» достигнуты при обработке пакета со стороны стали Ст3 по технологии Ni-Focus^{plus} с режимами для углеродистых сталей ($I = 50$ А, $V = 1,5$ м/мин). Высокая точность реза (отклонение от перпендикулярности $\alpha \sim 1,5^\circ$) и низкая шероховатость ($Ra = \sim 2,5$ мкм) наблюдается на верхнем (стальном) участке биметалла. На нижнем (алюминиевом) участке имеет место расширение канала реза до $0,1 - 0,2$ мм на сторону с осаждением расплава стали.

5. Использование технологической схемы Ni-Focus^{plus} на режимах раскроя углеродистых сталей ($I = 50$ А, $V = 1,75$ м/мин) обеспечивает приемлемое качество реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» при раскрое пакета с любой стороны. Так при раскрое со стороны стали Ст3 минимальное отклонение реза от перпендикулярности ($\alpha = 3,3^\circ$) в исследованном диапазоне скоростей наблюдается при $V = 1,5$ м/мин. При этом в канале реза на участке меди формируется наплыв размером $0,15 - 0,17$ мм. Шероховатость на участке стали составляет $Ra = 1,5 - 2,0$ мкм, меди - $Ra = 3,0 - 6,0$ мкм. Отмечается полное отсутствие грата на нижних кромках реза даже при максимальных ($2,0$ м/мин) скоростях обработки. Изменение лобовой стороны раскроя со

стали на медь привело к непрорезу биметаллического пакета на максимальной (2,0 м/мин) скорости.

6. Экспериментально подтверждено, что исследуемые композиции металлических материалов, полученные сваркой взрывом, имеют волнообразный характер сварного соединения с проявлением в различной степени ламинарного, вихревого и турбулентного течения материалов. Теоретически рассчитаны и экспериментально определены параметры волн, длины которых находятся в диапазоне от 500 до 800 мкм, а их амплитудные значения – от 110 до 250 мкм. Несмотря на волнообразный характер сварного шва и сложное структурно-фазовое строение материала биметаллическую композицию в условиях тонкоструйной плазменной резки можно рассматривать как плоское беззачерное, вакуумно плотное соединение двух металлов, различающихся между собой по механическим и теплофизическим свойствам.

7. Средствами металлографического и рентгенофазового анализа подтверждена правомерность решений по выбору технологических схем обработки, назначению режимных параметров и установлению лобовой стороны раскроя исследуемых биметаллических композиций, принятых по оценкам геометрической точности, качества реза и графообразования.

Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о наличии в составе осажденного материала на поверхности реза продуктов взаимодействия химических элементов нержавеющей стали с газовой средой в канале реза – оксидов Fe_3O_4 , $(Fe, Cr)_2O_3$, FeO при раскрое композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т». Образование оксидов железа и хрома в расплаве приводит к повышению его вязкости и ухудшению процессов удаления продуктов расплава из канала реза.

Осаждение расплава алюминия на поверхности реза при раскрое композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» со стороны алюминия вызвано высокой кинематической вязкостью его расплава и наличием в нем продуктов химического взаимодействия алюминия с кислородом плазмообразующего газа – оксидов Al_2O_3 .

Установлено, что условием, благоприятствующим осаждению стали на участке меди при раскросе композиции «сталь Ст3 + медь М1» со стороны стали, является значительная (до 10 раз при 500 °С) разница в теплопроводностях металлов, составляющих биметаллическое соединение.

Металлографические исследования выявили во всех расплавах дефекты в виде пор, трещин, отдельных фрагментов материалов соединения.

8. Выявлено наличие зон термического влияния на участках низкоуглеродистой стали, обусловленное высокоскоростным локальным характером теплового воздействия при тонкоструйной плазменной резке. Размер зоны термического влияния составляет 250 – 300 мкм при раскросе композиций со стороны стали Ст3 и 150 – 180 мкм при раскросе с обратной стороны пакета. Структура зоны термического влияния представляет собой крупноиглочатый мартенсит, характерный при закалке низкоуглеродистых сталей. Установлен характер распределения микротвердости в пределах зоны термического влияния с максимальным значением 3500 – 4200 МПа у поверхности реза.

9. Разработаны технологические рекомендации по тонкоструйному плазменному раскросу как отдельных материалов, так и биметаллических композиций с позиций выбора технологических схем, назначения режимных параметров и установлению лобовой стороны раскроса пакета.

10. Результаты работы используются в учебно-научно-производственной лаборатории «Лазерные и плазменные технологии» ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» при выполнении заказов предприятий региона по тонкоструйной плазменной резке металлических материалов. Результаты исследований используются в учебном процессе подготовки магистров по направлению 15.04.05 – «Конструкторско - технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1982. - 400 с.
2. Суханов Д.А. Повышение конструктивной прочности сталей формированием тонкодисперсной слоистой структуры: дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Суханов. – Новосибирск, 2002. – 198 с.
3. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А.А. Дерибас; отв. ред. С.С. Григорян. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
4. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом / И.Д. Захаренко; АН БССР, Витеб. отд-ние Ин-та физики твердого тела и полупроводников. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.
5. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. – М.: Металлургия, 1971. – 197с.
6. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межв. сб. науч. тр. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – 128 с.
7. Волнообразование при высокоскоростном симметричном соударении металлических пластин / В.В. Пай [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т.42, №5. – С. 132-137.
8. Хант Дж. Н. Образование волн при сварке взрывом / Дж.Н. Хант // Механика – 1969. - №1. – С. 140-150.
9. Crossland B. Explosive welding of metals and its application / B. Crossland. – Oxford: Clarendon Press, 1982. – 233 p. – (Oxford series on advanced manufacturing; vol 2).
10. Процессы обработки металлов взрывом: учеб. пособие для вузов / А.В. Крупин [и др.]. – М.: Металлургия, 1996. – 335 с.
11. Bahrani A.S., Black T., Crossland B. The Mechanics of Wate Formation in Explosive Welding // Proc. Roy.Soe; 1967. Vol. A296, № 1445, P. 123-136.

12. Шморгун В.Г. Расчетное определение оптимальных параметров сварки взрывом / В.Г. Шморгун // *Металловедение и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. тр.* – Волгоград: ВолгГТУ, 1997. – С. 26 - 28.
13. Злобин Б.С. Сварка взрывом стали с алюминием / Б.С. Злобин // *Физика горения и взрыва.* – 2002. – Т.38, №3. – С. 137 - 140.
14. Оценка параметров соударения при сварке взрывом / В.Г. Шморгун, А.П. Соннов, Ю.П. Трыков, И.А. Ковалев // *Металловедение и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. тр.* – Волгоград: ВолгГТУ, 1997. – С. 20-25.
15. Конон Ю.А. Сварка взрывом / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский; под ред. В.М. Кудинова. – М.: Машиностроение, 1987. – 214 с.
16. Айнбиндер С.Б. Холодная сварка металлов / С.Б. Айнбиндер. – Рига: АН ЛатвССР, 1957. – 163 с.
17. Исследование влияния опоры в процессе сварки взрывом / Б.Д. Цемахович [и др.] // *Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами: Матер. 5-го Междун. симпоз. Готвальдов, 1982.* - С. 45 - 49.
18. Wittman R.H. The Influence of Collision Parameters on the Strength and Microstructure of an Explosion Welded Aluminium Alloy // *Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties: Mater. 2nd Int. Simpos. Marianske Lasne, 1973.* P. 153 - 158.
19. Захаренко И.Д. Определяющие процессы при сварке взрывом. – *Физика горения и взрыва, 1979.* - № 3.
20. Абрахамсон Г.Р. Остаточные периодические деформации поверхности под действием перемещающейся струи. – *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Сер. Е. Прикладная механика, 1961, Т.28, № 4.* С. 45 - 55.
21. Stil.P. Optoelectronics Report. V.10. № 3, Febr. 2003 г.
22. INFO BORSE LASER. 1993. № 5, August.
23. Фролов В.В. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа, 1988. - 539 с.

24. Тауфер Г.Ш. Лазерная гибридная сварка. Междунар. конф. «Сварка и соединение 2000». Израиль, 18-20 июля 2000. - С. 52 -61.
25. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная сварка металлов. М.: Высшая школа, 1988. - 207 с.
26. Забелин А.М., Оришич А.М., Чирков А.М. Лазерные технологии машиностроения: Учеб. пособие (Новосиб. гос. ун-т). Новосибирск, 2004. - 142с.
27. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981. - 638 с.
28. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. М.: Высшая школа, 1988. - 127 с.
29. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М., Наука, 1979.
30. Технологические лазеры. В 2 т. М.: Машиностроение, 1991. Т 1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Под ред. Г.А. Абильсиитова. - 432 с.
31. Малов А.Н., Малов Н.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б., Печурин В.А., Филев В.Ф. Резка толстых металлических пластин излучением СО₂-лазера с самофильтрующим резонатором // Тр. 4-ой Междунар. конф. «Лазерные технологии и средства их реализации». С-Петербург, 23 - 28 сент. 2003. - С. 39 - 47.
32. Афонин Ю.В., Ермолаев Г.В., Малов А.Н., Малов Н.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б., Печурин В.А., Филев В.Ф. Экспериментальное исследование газолазерной резки малоуглеродистой стали // Тр. 4-ой Междунар. конф. «Лазерные технологии и средства их реализации». С-Петербург, 23 - 28 сент. 2003.
33. Steel William M. Laser material processing. Springer – Verlag, 1991.
34. Powell J., Mensis I.A. Industrions Laser 3rd International Cjference in Lasers in Manufacturing (LTM). P, 1986. P. 276 - 277.
35. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Гри-

горьянца.- 2-е изд. стереотип. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 664с.

36. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов.- М.: Машиностроение,1989. - 304 с.

37. Терегулов Н.Г., Соколов Б.К., Вартанов Г., Малышев Б.С., Негапов М.И., Ерофеев Е.Ю.. Лазерные технологии на машиностроительном заводе. Уфа. 1993. - 263 с.

38. Коваленко В.С., Романенко В.В. Технологические характеристики резки металлических материалов лазерным излучением. Технология и организация производства. 1980. - 263 с.

39. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов.- М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 336 с.

40. Гузов С.Г. Исследование влияния чистоты кислорода на производительность и качество разделительной кислородной резки / С.Г. Гузов // Кислородная резка. Сварка. Напыление пластмасс. ВНИИАВТОГЕНМАШ, 1954. - № 4. – С.34 – 39.

41. Сухинин Г.К. Резка металлов большой толщины. – М.: Машиностроение, 1983.

42. Никифоров Н.И., Антонов И.А., Нешумова С.П. Газопламенная обработка металлов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1993.

43. Шустик А.Г. и др. – Справочник по газовой резке, сварке и пайке, 1989.

44. Спектер О.Ш., Сухинин Г.К. Кислородная резка высокопрочных сталей. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1980.

45. Головченко В.С., Доброленский В.П., Мисюров И.П. Тепловая резка металлов в судостроении. – Л.: Судостроение, 1975.

46. Антонов И.А. Газопламенная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1976.

47. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Пламенная и газотермическая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1993.

48. Сварка. Резка. Контроль: Справочник / Под общей ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. М.: Машиностроение, 2004. Т1/ Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков и др., 624 с.
49. ГОСТ 14792-80 Детали и заготовки, вырезаемые кислородной и плазменно-дуговой резкой. Точность, качество поверхности реза
50. Быховский Д.Г. Плазменная резка. – М.: Машиностроение, 1972. – 348 с.
51. Медведев А.Я. Установки плазменной резки nvertex РС 40, 60, 100 / А.Я. Медведев // Сварочное производство. – 1994. - № 4. – С. 39 – 41.
52. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка перспективный способ термической резки / К.В. Васильев // Сварочное производство. – 2002. - № 9. – С. 26 – 28.
53. Severance W. How plazma Arc Cutting cases / W. Severance, D. Adeerson // Schweisstechnik. – 1972. - № 12. – S. 555 – 558.
54. Васильев К.В. Воздушно-плазменная резка. М.: Машиностроение, 1976. – 482 с.
55. Васильев К.В. Промышленное применение высокоэффективного процесса супервоздушно-плазменной резки / К.В. Васильев, В.И. Кожевников, Л.О. Кохлянин // Сварочное производство, 1982. - № 6. – С. 13 – 14.
56. Васильев К.В. Современные задачи и перспективы развития плазменно-дуговой резки / К.В. Васильев // Тр. Междунар. конф. ЭЛТЕХ 2001, С. Петербург. – 2001. – С. 27 – 29.
57. // Физическая природа низкотемпературной плазмы: [сайт]. URL: // www.stroitelstvo-new.ru/plasma/dugovogo-razryada.shtml
58. Рахимьянов Х.М. Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости реза / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7 Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 11 – 13 нояб. 2013 г. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – С. 349 – 353.

59. Рахимьянов Х.М. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов, Ю.В. Никитин // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты, материаловедение. – 2013. № 3 (60). – С. 25 – 30.

60. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке / А.А. Локтионов // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты, материаловедение. – 2013. - № 4 (61). – С. 86 – 91.

61. Рахимьянов Х.М. Повышение эффективности листового раскроя в заготовительном производстве / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Ползуновский альманах. – 2012. - № 1. – С. 158 – 159.

62. Рахимьянов Х.М. Особенности формирования кромок при тонкоструйной плазменной резке листового материала / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Инновации в машиностроении: тр. 2 Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6 – 8 окт. 2011 г. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2011. – С. 416 – 419.

63. Локтионов А.А. Тонкоструйная плазменная резка как эффективная технология в заготовительном производстве / А.А. Локтионов, В.В. Захаров // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 2 – 4 дек. 2011 г.: в 6 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 29 – 30.

64. Рахимьянов Х.М. Особенности формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Инновации в машиностроении: труды 1 Междунар. науч.-практ. конф. г. Бийск, 7 – 9 окт. 2010. – С. 90 – 91.

65. Рахимьянов Х.М. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всерос. науч.-практ. конф., посвященная 100-летию со дня рождения

профессора Муханова Ивана Ивановича: сб. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 151 – 153.

66. Рахимьянов Х.М. Моделирование процессов тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формирования криволинейных контуров / Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // Научный вестник НГТУ, 2009. - № 4 (37). – С. 123 – 134.

67. Рахимьянов Х.М. Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Обработка металлов. 2009. - № 4 (45). – С. 31 – 32.

68. Рахимьянов Х.М. Повышение точности реза при тонкоструйной плазменной обработке / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Механики XXI века: сб. докладов VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Братск, 18 – 20 марта 2008 г. – Братск: Изд-во ГОУ ВПО БРГУ, 2008. – С. 200 – 202.

69. Рахимьянов Х.М. Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // Высокие, критичные электро – и нанотехнологии: труды Всероссийской научно-технической конференции – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 37 – 41.

70. Локтионов А.А. Износ расходных элементов плазматрона при термической резке листового материала / А.А. Локтионов, Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов II Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. (Иркутск, 25- 27 апреля 2012 г.) / под ред. Профессора С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 61 – 65.

71. Рахимьянов Х.М. Разновидности катодов, применяемых для плазменной резки, и влияние степени их износа на точность формообразования / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10

Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта 2012 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 68 – 71.

72. Kirkpatrick, Ian. "High definition plasma-an alternative to laser technology." Aircraft engineering and Aerospace technology 70.3 (1998): 215 - 217.

73. Солоненко О.П. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, В.В. Марусин, Х.М. Рахимьянов [и др.]; ред.: М.Ф. Жуков, В.М. Фомин; Сиб. отд-ние Рос. акад. наук, Ин-т теорет. и прикладной механики. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с.: ил., табл. – (Низкотемпературная плазма. Т. 18).

74. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. Л: Машиностроение, 1987. - 192 с.

75. Instruction manual of the plasma cutting machine HiFocus 130 + PGE-NM for the CNC-controlled cutting with Plasma Torch PerCut 160/170 (HiFocus^{plus}-technology). – www.kjellberg.de

76. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [eine elektronische Ressource] / Werkstatt Ausrüstung Leitner jomet. – Salzweg, 2002. – 66 s. – Zugriffsmodus: http://www.wal-austria.at/pdf/wissenswertes/handbuch_plasmaschneiden.pdf. – Der Titel Bildschirm.

77. www.hypertherm.com

78. ГОСТ 380 – 2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки

79. ГОСТ 5582 – 75 Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия

80. ГОСТ 21631 – 76 Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия

81. ГОСТ 495 – 92 Листы и полосы медные. Технические условия

82. ISO 9013: 2002. Резка тепловая. Классификация резов, полученных тепловым способом. Геометрические характеристики изделий и допуски на характеристики

83. ГОСТ 9450 – 76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников

84. Рахимьянов Х.М. Моделирование тепловых процессов тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Лунин // Инновации в машиностроении: тр. 2 Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 6 – 8 окт. 2011 г. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2011. – С. 161 – 165.

85. Рахимьянов А.Х. Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей / А.Х. Рахимьянов // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. – 2014. - № 2 (63). – С. 46 – 55.

86. Рахимьянов А.Х. Влияние режимов тонкоструйной плазменной резки на качество обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т / А.Х. Рахимьянов, Х.М. Рахимьянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 78 – 85.

87. Рахимьянов А.Х. Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов / А.Х. Рахимьянов, Б.А. Красильников // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 71 – 77.

88. Рахимьянов А.Х. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов / А.Х. Рахимьянов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.: Часть 2 / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 66 – 70.

89. Рахимьянов Х.М. Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов при тонкоструйной плазменной резке листовых материалов / Х.М. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, А.А. Локтионов, С.В. Лунин // Высокие, критические электро – и нанотехнологии [Электронный

ресурс]: Всерос. науч.-техн. конф.: программа конф.: сб. трудов конф. – Тула: ТулГУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD – ROM). – Загл. с этикетки контейнера.

90. Рахимьянов К.Х. Исследование обрабатываемости стали Ст3 методом тонкоструйной плазменной резки / К.Х. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Шопф // Ползуновский альманах. – 2012. - № 1. – С. 121 – 124.

91. Рахимьянов Х.М. Исследование обрабатываемости стали 12Х18Н10Т методом тонкоструйной плазменной резки / Х.М. Рахимьянов, К.Х. Рахимьянов, А.Х. Рахимьянов, С.В. Шопф, В.В. Захаров // Инновации в машиностроении: тр. 4 Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск 2 – 4 окт. 2013 г. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 38 – 44.

92. Чиеу Куанг Фи. Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: Автореф. дис...канд. техн. наук 05.08.04, Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2008. - 20 с.

93. Урвачев В.П., Кочетков В.В., Горина Н.Б. Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди. - Челябинск: Металлургия, 1991. - 166 с.

94. Рахимьянов А.Х. Технологические особенности раскрытия биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке / А.Х. Рахимьянов, Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение. – 2014 - № 3 (64). – С. 51 – 67.

95. Батаев И.А. Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: Автореф. дис...канд. техн. наук 05.16.09, Новосибирск, НГТУ, 2010. – 19 с.

96. The increase of structural strength of multilayered materials produced by explosive welding of dissimilar steels thin plates / E.A. Prikhodko, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esikov // The 8 international forum on strategic technol-

ogies (IFOST 2013): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 1. – P. 37 – 40.

97. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multilayered composites welded by explosion / E.A. Prikhodko, I. A. Bataev, A.A. Bataev, V.S. Lozhkin, V.I. Mali, M.A. Esicov // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 535 – 537. – P. 231 – 234.

98. Захаренко И.Д., Мали В.И. Вязкость металлов при сварке взрывом. – В. кн.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972. – С. 575 – 578.

99. Захаренко И.Д., Соболенко Т.М. Тепловые эффекты в зоне соединения при сварке взрывом. – *Физика горения и взрыва*. – 1971, т.7, № 3. – С. 433 – 435.

100. Ложкин В.С. Структура и механические свойства многослойного композита, сформированного сваркой взрывом тонколистовых сталей 12X18H10T и H18K9M5T / В.С. Ложкин, Е.А. Ложкина, В.И. Мали, М.А. Есиков // *Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. Материаловедение*. – 2014. - № 3 (64). – С. 28 – 36.

101. Гордополов Ю.А., Дремин А.Н., Михайлов А.Н. Экспериментальное определение зависимости длины волны от угла соударения в процессе сварки металлов взрывом. – *Физика горения и взрыва*, 1976, т.12, № 4. – С. 601 – 605.

102. Babul W. Warunki uzyskania polaczenia metali metoda wybuchowa // *J. Dabrowskiego*. 1970. - № 5. P. 213.

103. Wittman R.H. The influence of collision parameters on the strength and microstructure of the explosion welded aluminum alloy. – In: *Explosive working of metals (2-й Международный симпозиум по использованию энергии взрыва. Марианские Лазни. Окт. 1973) Praha, 1974. - P. 153 – 158.*

104. Wylie H.K., Williams P.E., Crossland B. Further experimental investigation of explosive welding. – In: *Proc. 3d Intern. Conf. of the Center for High Energy Forming. Denver, Colorado, 1971. - P. 1.3.1 – 1.3.43.*

105. Рахимьянов Х.М. Моделирование теплофизических процессов при высокоскоростном нагреве материала / Х.М. Рахимьянов, В.П. Захаров // Сборник научных трудов НГТУ. – 1996. – Вып.1. – С. 61 – 68.
106. Iskhakova G.A. Determination of the mechanical characteristics of a heat-treated case using a new hardness number / G.A. Iskhakova, Kh.M. Rakhimyanov // Industrial Laboratory. – 1988. – Vol. 53. - № 8. – P. 762 – 764.
107. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка материалов. – М.: Металлургия, 1997. – 408 с.
108. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 648 с.
109. Iskhakova G.A. Investigation of the microstructure and mechanical properties of steel 45 after plasma hardening / G.A. Iskhakova, Kh.M. Rakhimyanov // Soviet surface engineering and applied electrochemistry. – 1987. - № 5. – P. 28 – 32.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВПО

«Новосибирский государственный
технический университет»

по учебной работе

д.т.н., профессор

А.А. Батаев

«2» сентября 2014 г.



АКТ

использования результатов

диссертационной работы в учебном процессе

В ходе выполнения диссертационной работы «Тонкоструйная плазменная резка биметаллических композиций» Рахимяновым А.Х. получены научные и практические результаты, направленные на расширение технологических возможностей современной технологии раскроя листовых металлических материалов, в том числе и биметаллических композиций. Полученные результаты используются в учебном процессе для подготовки магистров по направлению 15.04.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» в цикле лекций по дисциплинам «Специальные главы технологии машиностроения», «Плазменная обработка металлов», лабораторных работах и при выполнении магистерских диссертаций.

Декан механико-технологического
факультета, д.т.н., профессор

В.Г. Буров

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВПО

«Новосибирский государственный
технический университет»

по научной работе

д.т.н., профессор

 А.Г. Вострецов

« 11 » сентября 2014 г.



АКТ

использования результатов

диссертационной работы в хоздоговорной деятельности

Результаты диссертационной работы Рахимянова А.Х. «Тонкоструйная плазменная резка биметаллических материалов», представленные в виде технологических рекомендаций по применению высокоэффективной технологии Ni-Focus для раскроя различных металлических материалов, в том числе и их композиций, использованы при выполнении хоздоговорных работ по оказанию услуг предприятиям г. Новосибирска и региона в лаборатории «Лазерные и плазменные технологии» кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет». Общий объем выполненных работ за период 2009 – 2014 г.г. составил 2531 тыс. руб.

Декан механико-технологического
факультета, д.т.н., профессор



В.Г. Буров