

На правах рукописи



**РАХИМЯНОВ АНДРЕЙ ХАРИСОВИЧ**

**ТОНКОСТРУЙНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА  
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск, 2014

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор,  
Красильников Борис Александрович

Официальные оппоненты: Янюшкин Александр Сергеевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Братский государственный университет»,  
заведующий кафедрой «Технология  
машиностроения»

Волгин Владимир Минович,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Тульский государственный университет»,  
профессор кафедры  
«Электро- и нанотехнологии»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Алтайский  
государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Защита диссертации состоится 24 декабря 2014 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.07 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20 (I- конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [http://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations/view?id=1921](http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=1921)

Автореферат разослан « 11 » ноября 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Никитин Юрий Вадимович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Совершенствование технологических процессов изготовления деталей машин предлагает использование современных методов обработки на всех стадиях производства: заготовительной, механообработки, термообработки, контроля, мойки, упаковки и т.п. Основным критерием выбора метода обработки является минимизация технологической себестоимости при обеспечении требуемого качества и необходимого объема выпуска продукции. Перспективным путем снижения технологической себестоимости изготовления деталей является использование таких методов обработки, которые позволили бы сократить объем или даже исключить определенные стадии в технологическом процессе. Так применение на этапе заготовительного производства традиционных газопламенных и плазменных технологий раскроя листовых материалов требует введения дополнительных обдирочных операций для удаления излишнего припуска и дефектов реза.

Внедрение современных технологических методов, таких как лазерная, тонкоструйная плазменная, струйная гидравлическая позволяет повысить качество и точность реза.

Появление новых классов материалов, например слоистых композиций разнородных материалов, полученных прокаткой или сваркой взрывом, требует проведения исследований, направленных на технологическую отработку, для внедрения того или иного метода резки листовых материалов.

### **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 цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Выбор метода получения слоистых материалов и анализ существующих технологий термической резки.
2. Назначение технологических схем и оптимизация режимных параметров тонкоструйной плазменной резки модельных материалов, состав-

ляющих исследуемые биметаллические композиции с оценкой точности и качества реза.

3. Проведение экспериментальных исследований по раскрою 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.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. 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.

2. Разработаны рекомендации по выбору технологических схем, определены режимные параметры тонкоструйной плазменной резки биметаллических композиций «низкоуглеродистая сталь Ст3 + нержавеющая сталь 12X18H10T», «низкоуглеродистая сталь Ст3 + алюминий А5М», «низкоуглеродистая сталь Ст3 + медь М1».

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

4. 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.

5. 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».

## **Методология и методы исследования**

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

Экспериментальные результаты получены с использованием 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 EVO 50XVP;
- 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.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в проведении аналитического обзора методов термической резки металлических материалов, постановке и проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов и разработке рекомендаций для использования тонкоструйной плазменной резки биметаллических материалов.

### **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<sup>ой</sup> Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Кемерово, 2011 г.), 3<sup>ей</sup> Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Барнаул, 2012 г.), 4<sup>ой</sup> Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, 2013 г.), 6<sup>ой</sup> Международной научно-технической конференции

«Инновации в машиностроении – основа технологического развития России (ТМ – 2014)» (г. Барнаул, 2014 г.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

### **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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена общая характеристика области исследования и обоснована актуальность диссертационной работы. Сформулирована цель и определены задачи исследования. Отмечены научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** приведен аналитический обзор по теме диссертации, в котором рассмотрены вопросы создания биметаллических композиций и современные методы резки металлических материалов. Показана перспектива использования современной модификации плазменно-дуговой резки – тонкоструйной плазменной для раскроя листовых металлических материалов в широкой номенклатуре как по классам, так и по типоразмеру. Обозначены проблемы в обработке биметаллических композиций, представляющих соединение разнородных материалов.

**Во второй главе** «Материалы, оборудование и методы экспериментальных исследований» изложены сведения об исходных материалах для получения сваркой взрывом биметаллических композиций. В качестве основного (плакируемого) материала для всех исследованных в работе биметаллических композиций был выбран листовой прокат низкоуглеродистой стали Ст3 (ГОСТ 380 – 2005) толщиной 3 мм. Плакирующими материалами служили листовой прокат нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5582 – 75) толщиной 2 мм, листовой прокат алюминия А5М (ГОСТ 21631 – 76) толщиной 3 мм и листовой прокат меди М1 (ГОСТ 495 – 92) толщиной 2 мм. Сварка взрывом биметаллических композиций производилась в Институте Гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск).

Экспериментальные исследования по тонкоструйной плазменной резке исследуемых материалов проводились на технологическом комплексе с ЧПУ BURNY PHANTOM ST1, укомплектованном источником тока Hi – Focus 130i с газовой консолью и плазмотроном PerCut 160.

Для получения трехмерного изображения топографии поверхности реза и количественной оценки параметров микрогеометрии использовался комплекс ZIGO New View 7300, реализующий современные технологии трехмерной сканирующей интерферометрии.

Структурные исследования материала в зоне реза проводились с применением методов оптической, растровой электронной микроскопии, рентге-

нофазового анализа. Микротвердость поверхностного слоя в зоне реза оценивалась в соответствии с ГОСТ 9450 – 76 на микротвердомере ПМТ – 3М.

**Третья глава** «Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки модельных материалов» ориентирована на выбор технологической схемы и оптимизацию режимов по критериям точности и качества реза модельных материалов, составляющих исследуемые биметаллические композиции. На рисунке 1 приведены технологические параметры раскроя углеродистых, легированных сталей и алюминиевых и медных сплавов в исследуемом диапазоне толщин реза.

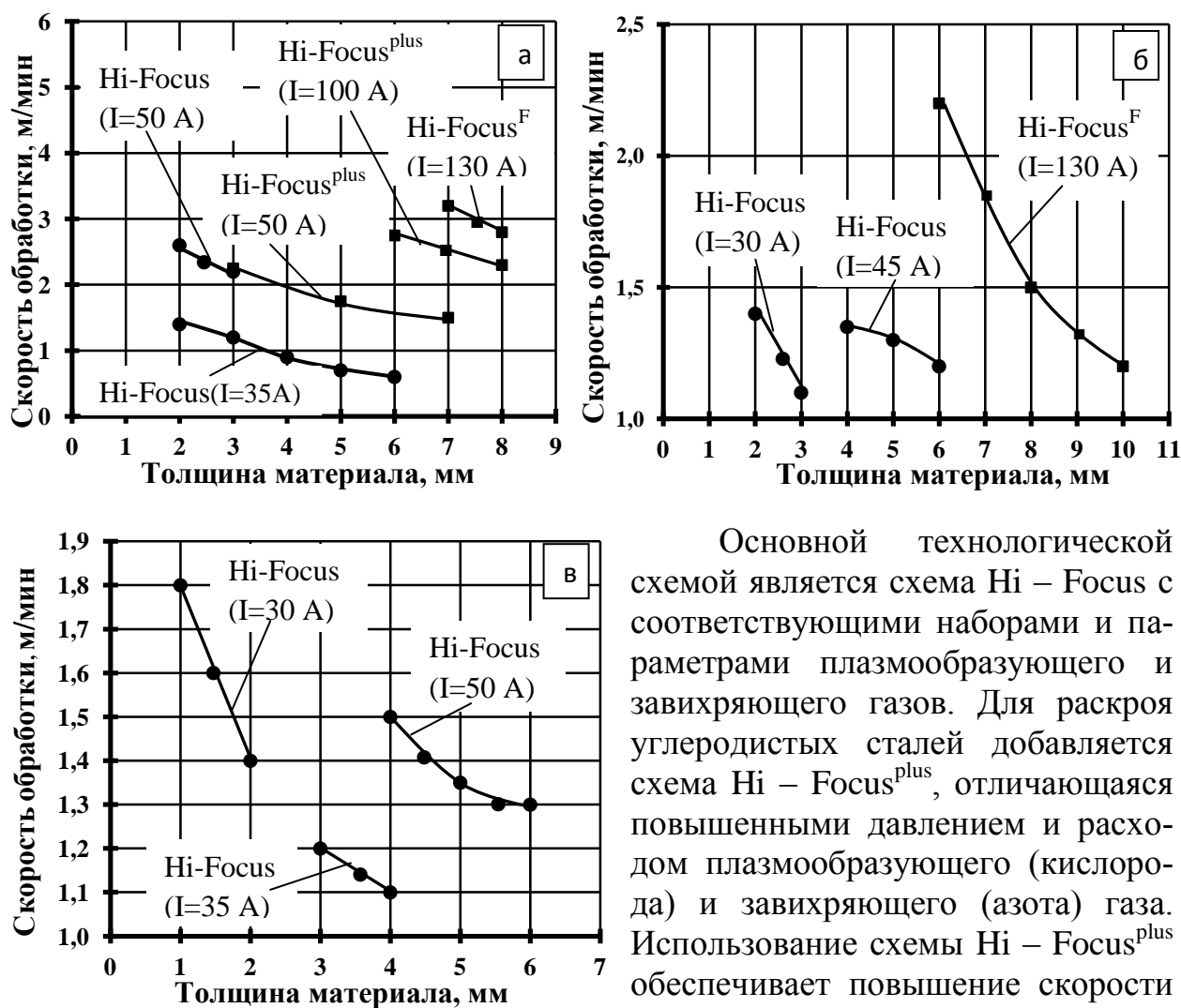


Рисунок 1 - Технологические параметры тонкоструйной плазменной резки различных классов материалов:  
 а – углеродистые стали и медные сплавы;  
 б – легированные стали; в – алюминиевые сплавы

Основной технологической схемой является схема Hi – Focus с соответствующими наборами и параметрами плазмообразующего и завихряющего газов. Для раскроя углеродистых сталей добавляется схема Hi – Focus<sup>plus</sup>, отличающаяся повышенными давлением и расходом плазмообразующего (кислорода) и завихряющего (азота) газа. Использование схемы Hi – Focus<sup>plus</sup> обеспечивает повышение скорости реза углеродистых сталей до 2-х раз за счет реализации в процессе механизмов кислородной резки. Третья схема - Hi – Focus<sup>F</sup> характеризуется назначением максимального (для данного источника тока) значения тока (130 А) во всем диапазоне толщин реза.

Как показали предварительные исследования для достижения минимальной ширины реза, максимальной точности и качества обработки из возможных вариантов технологи-

ческих схем предпочтение следует отдать схеме с минимальным значением токовой характеристики.

Оптимизация режимных параметров при тонкоструйной плазменной резке модельных материалов в рамках выбранных технологических схем позволила достичь определенных показателей точности и качества реза.

Так при раскрое стали Ст3 по технологической схеме Ni – Focus на токовом режиме  $I = 50$  А отклонение реза от перпендикулярности составило  $3,8^\circ$  при скорости  $V = 2,0$  м/мин, при этом шероховатость поверхности реза равнялась  $Ra = 1,75$  мкм. Увеличение скорости обработки приводит к снижению показателей точности и качества реза. В исследованном диапазоне скоростей (2,0 – 2,4 м/мин) отмечается отсутствие гратообразования на нижних кромках реза, что свидетельствует о хорошей газодинамике в канале реза. Если рельеф поверхности реза стали Ст3 является однородным с характерными следами взаимодействия плазменной дуги с обрабатываемым материалом (рисунок 2, а), то на поверхности реза нержавеющей стали 12Х18Н10Т отмечается наличие зоны осаждения расплава в верхней его части (рисунок 2, б). Это можно объяснить меньшей (по сравнению со сталью Ст3) теплопроводностью стали 12Х18Н10Т и, как следствие, сохранение высоких температур в зоне реза. Последнее способствует интенсификации химических реакций окисления металла неионизированной частью плазмообразующего газа с образованием тугоплавких соединений легирующих элементов. Образование оксидов хрома способствует повышению вязкости расплава и осаждению его части на поверхности реза. Повышение вязкости также приводит к образованию определенной доли грата на нижних кромках реза. Наличие элементов расплава на поверхности реза обуславливает ухудшение ее микрогеометрии.

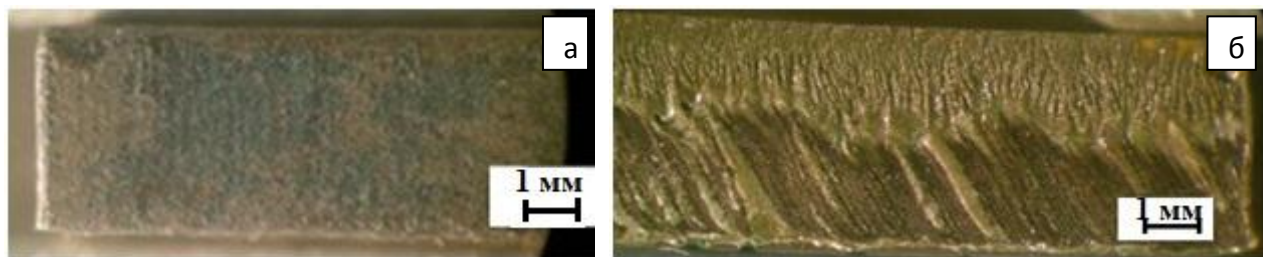


Рисунок 2 – Внешний вид поверхности реза стали Ст3 (а) и стали 12Х18Н10Т (б)

Тонкоструйная плазменная резка алюминия А5М с использованием технологической схемы Ni – Focus с токовым режимом  $I = 35$  А в исследованном диапазоне скоростей (1,0 – 1,4 м/мин) сопровождалась образованием грата (рисунок 3). Существенное гратообразование при резке алюминия можно объяснить высоким (по сравнению с остальными модельными материалами) значением кинематической вязкости расплава ( $1,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – для алюминия;  $(0,64 - 0,85) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – для сталей;  $0,35 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – для меди). Повышению вязкости расплава также способствует интенсивное окисление алюминия с образованием оксидов  $\kappa$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Микрогеометрия поверхности реза характеризуется высоким значением шероховатости ( $Ra \sim 12$  мкм). При этом отмечается значительное отклонение реза от перпендикулярности ( $9,1^\circ$  -



9,3°), выраженное в разнице ширины реза по верхним и нижним кромкам. Подобный характер формирования реза можно объяснить высокой теплопроводностью алюминия.

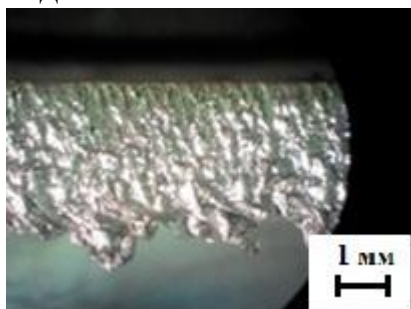


Рисунок 3 - Поверхность реза алюминия А5М с образованием грата на нижней кромке:  $V = 1,2$  м/мин

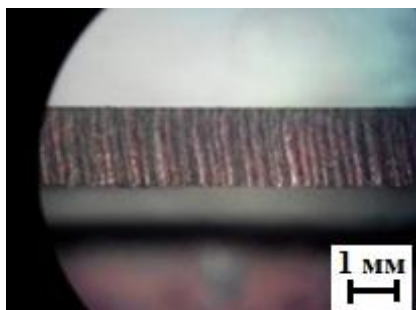


Рисунок 4 - Поверхность реза меди М1:  $V = 1,5$  м/мин

В отличие от алюминия раскрой меди М1 по технологической схеме Ni – Focus с токовым режимом  $I = 35$  А обеспечивает хорошее качество поверхности реза без следов осаждения элементов расплава во всем диапазоне исследованных скоростей обработки ( $V = 1,3 - 1,7$  м/мин) (рисунок 4). Это подтверждает топография поверхности реза и ее профилограмма (рисунок 5).

Высокая теплопроводность меди также способствует образованию значительного наклона реза ( $14,0^\circ - 15,4^\circ$ ).

В четвертой главе «Экспериментальные исследования тонкоструйной плазменной резки биметаллических композиций» представлены результаты по выбору приемлемых технологических схем для раскроя исследуемых соединений и установлению взаимосвязей режимных параметров с характеристиками точности и качества реза. При этом проводилась оптимизация лобовой стороны при раскрое биметаллического пакета в рамках исследуемой технологической

схемы. На рисунке 6 показано поперечное сечение реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое по технологической схеме Ni – Focus на режимах обработки легированных сталей как со стороны стали 12Х18Н10Т (рисунок 6, а), так и стали Ст3 (рисунок 6, б).

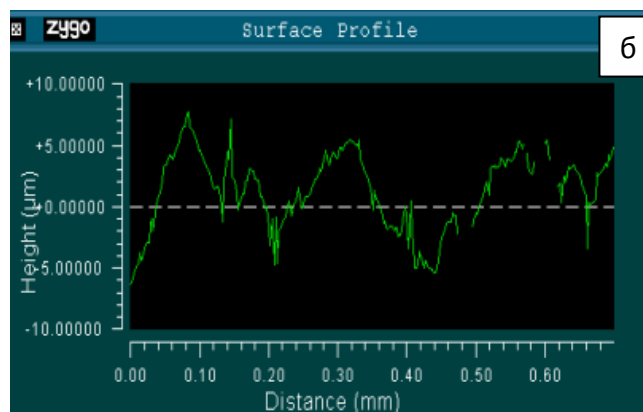
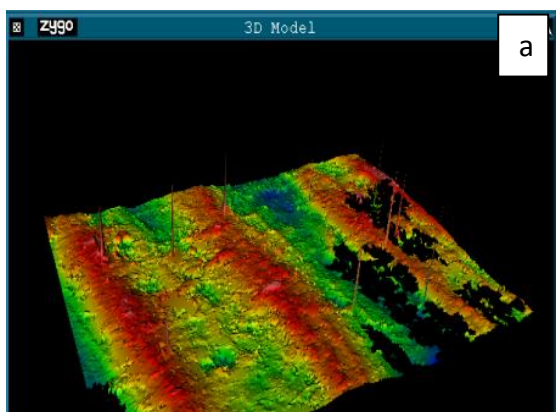


Рисунок 5 – Топография (а) и профилограмма (б) поверхности реза меди М1

Увеличение скорости обработки приводит к ухудшению точности реза. Так среднее отклонение реза от перпендикулярности, равное  $\alpha = -1,5^\circ$  при скорости  $V = 1,1$  м/мин, достигает  $\alpha = 4^\circ$  при  $V = 1,5$  м/мин при раскрое композиции со стороны стали 12Х18Н10Т.

Незначительное изменение шероховатости (от  $Ra = 5,78$  мкм до  $Ra = 8,74$  мкм) сопровождается рост скорости реза.

Изменение лобовой стороны реза со стали 12X18H10T на сталь Ст3 (рисунок 6, б) обеспечивает точность реза в пределах от  $\alpha = -3,8^\circ$  до  $\alpha = -1,5^\circ$  в исследованном диапазоне скоростей. При этом наблюдается улучшение микрогеометрии поверхности реза ( $Ra = 1,8 \div 2,65$  мкм).

Использование технологической схемы Ni – Focus<sup>plus</sup>, предназначенной для обработки углеродистых сталей, для раскроя исследуемой биметаллической композиции низкоуглеродистой и нержавеющей сталей позволило дос-

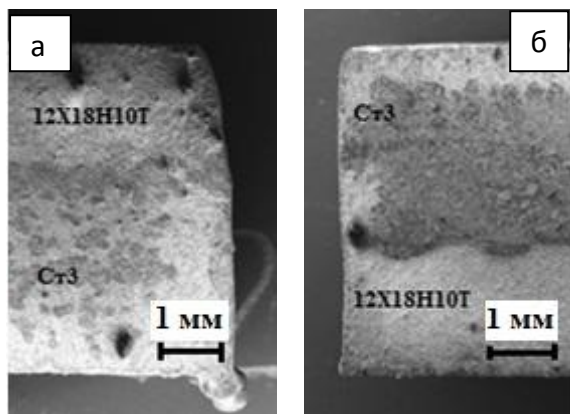


Рисунок 6 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» на режимах обработки легированных сталей (схема Ni – Focus)

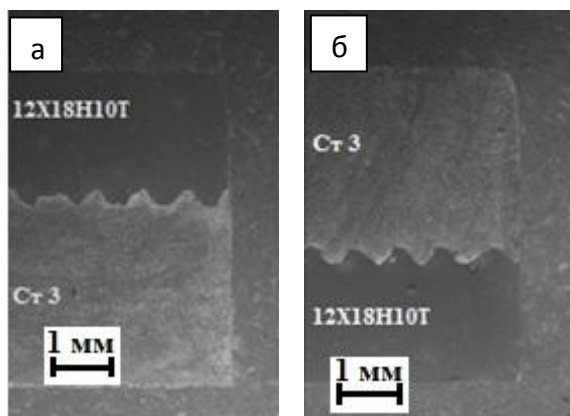


Рисунок 7 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» на режимах обработки углеродистых сталей (схема Ni – Focus<sup>plus</sup>):  
а – рез со стороны стали 12X18H10T;  
б – рез со стороны стали Ст3

тичь максимальной точности ( $\alpha_{ср} = \sim 0^\circ$ ) при раскрое пакета как с одной, так и с другой стороны пакета (рисунок 7).

Изучение качества поверхности реза показало на низкое значение ее шероховатости ( $Ra = 1,3 \div 2,5$  мкм) и хорошую топографию на обоих участках биметалла при раскрое со стороны стали Ст3. При раскрое пакета со стороны стали 12X18H10T на участке стали Ст3 наблюдаются элементы расплава нержавеющей стали, что ухудшает микрогеометрию поверхности реза.

Биметаллическая композиция «сталь Ст3 + алюминий А5М» как объект термической резки существенно отличается от предшествующей. Так значительная разница в температурах плавления стали и алюминия и их теплопроводностях предопределяет специфику их поведения при термической резке.

Следуя общему подходу в выборе технологических схем для раскроя биметаллических композиций в данном случае были приняты схемы Ni – Focus<sup>plus</sup> с режимными параметрами для обработки углеродистых сталей и

Ni – Focus – для обработки алюминиевых сплавов. Анализ геометрии реза исследуемой композиции при раскрое пакета по схеме Ni – Focus<sup>plus</sup> со стороны стали Ст3 позволил выявить различия в ее формировании в верхней (стальной) и нижней (алюминиевой) части композиции (рисунок 8).

Верхний участок характеризуется высокой точностью (отклонение реза от перпендикулярности не превышает  $1,5^\circ$ ), а шероховатость его поверхности составляет  $Ra = 2,5$  мкм.

На участке алюминиевой составляющей в верхней его части наблюдается расширение канала реза (до 0,1 – 0,2 мм на сторону), что приводит к образованию ниши, заполненной элементами расплава стали. Расширение реза на участке алюминия связано с низкой температурой его плавления, а осаждение расплава стали – ослаблением газодинамических потоков, ответственных за удаление продуктов расплава из канала реза. Это объясняет ухудше-

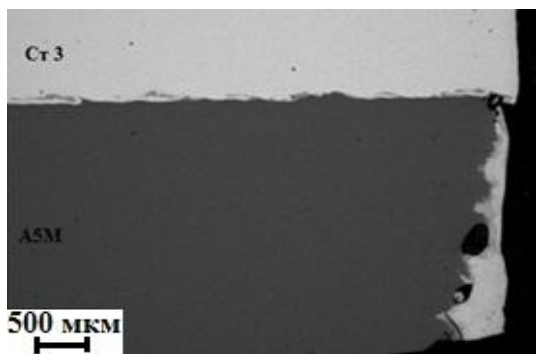


Рисунок 8 – Формирование канала реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» (схема Hi – Focus<sup>plus</sup>, рез со стороны стали Ст3)

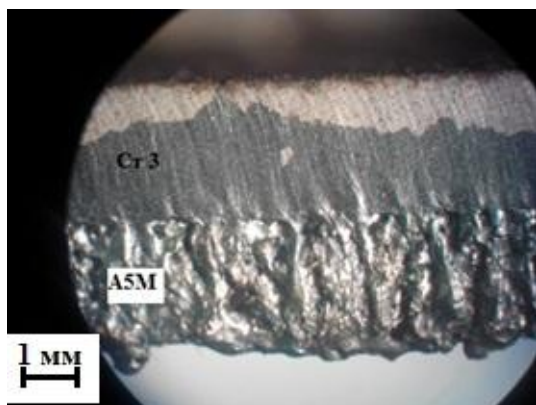


Рисунок 9 - Внешний вид поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» (схема Hi – Focus<sup>plus</sup>, рез со стороны стали Ст3)

ние микрогеометрии на участке алюминия (рисунок 9).

Смена стороны раскрыя пакета со стали на алюминий приводит к изменению как геометрии реза (рисунок 10, а), так и морфологии его поверхности (рисунок 10, б). На верхнем (алюминиевом) участке реза отмечается значительный наклон реза (до 12°), характерный для раскрыя материалов с высокой теплопроводностью. На нижнем участке композиции наблюдается осаждение расплава алюминия.

Применение технологической схемы Hi – Focus с режимными параметрами для обработки алюминиевых сплавов показало худшие результаты с позиций точности и качества реза. Это объясняется более слабыми газодинамическими потоками в канале реза вследствие меньших давлений плазмообразующего газа.

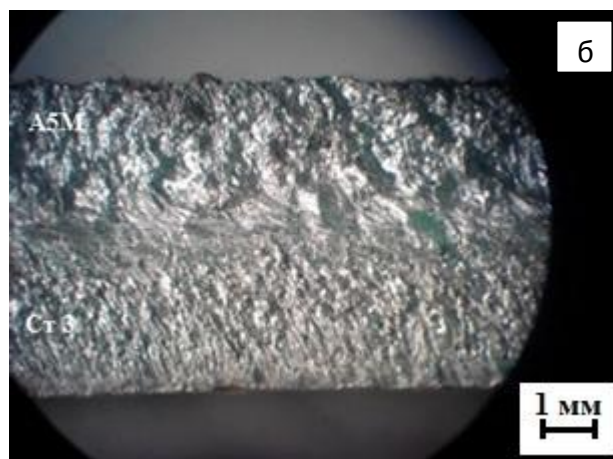
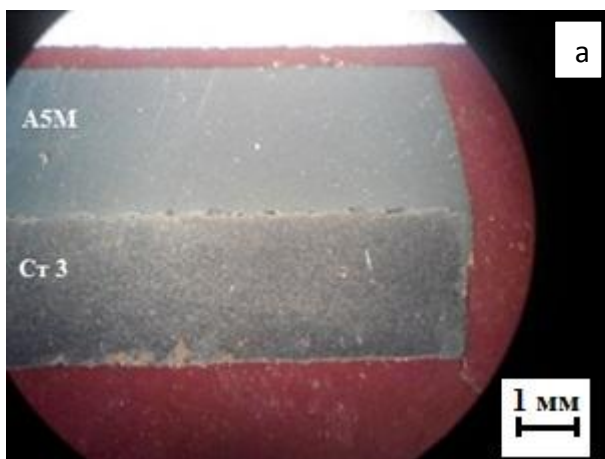


Рисунок 10 – Геометрия реза (а) и морфология поверхности реза (б) композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» (схема Hi – Focus<sup>plus</sup>, рез со стороны алюминия)



Еще одним представителем сварного соединения материалов с резко различающимися теплофизическими свойствами является биметаллическая композиция «сталь Ст3 + медь М1». Исследование плазменной резки меди как модельного материала показали на эффективность использования технологических схем Ni – Focus и Ni – Focus<sup>plus</sup> с режимными параметрами, предназначенными для раскроя углеродистых сталей (рисунок 1, а). Учитывая то, что в исследуемой композиции толщиной 5 мм преобладает стальной участок (3 мм), представилось целесообразным использование для раскроя высокопроизводительной схемы Ni – Focus<sup>plus</sup>. На рисунке 11 представлена геометрия реза композиции при разных лобовых сторонах раскроя.

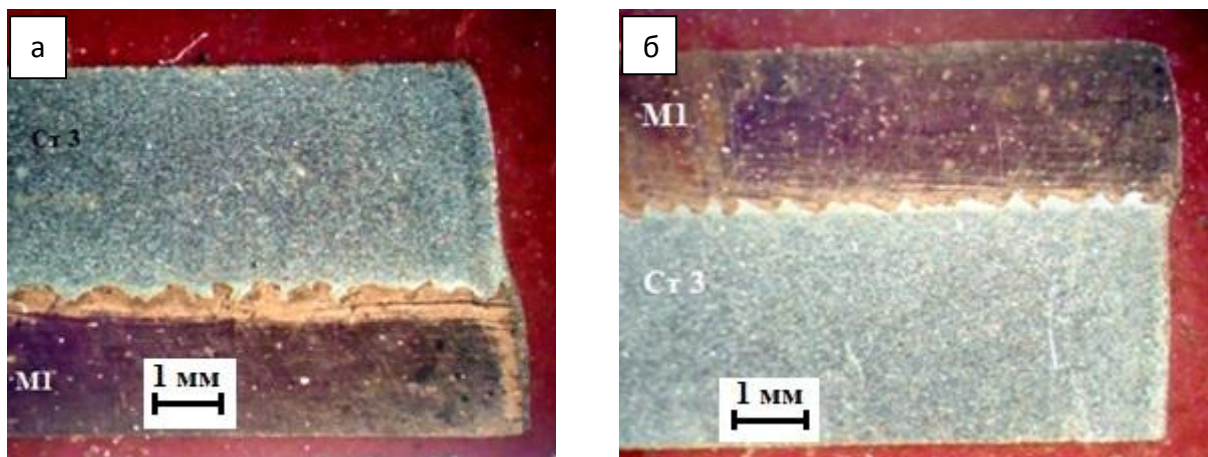


Рисунок 11 – Геометрия реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» на режимах обработки конструкционных сталей (схема Ni-Focus<sup>plus</sup>): а – рез со стороны стали Ст3; б – рез со стороны меди М1

При раскрое композиции со стороны стали Ст3 (рисунок 11, а) наблюдается образование наплыва размером 0,15 – 0,17 мм на участке меди. Данный дефект можно объяснить тем, что часть расплава стали с верхнего участка, попадая на поверхность реза меди, вследствие высокой ее теплопроводности, резко охлаждается, осаждаясь в виде наплыва. Внешний вид поверхности реза для данной схемы раскроя представлен на рисунке 12, а.

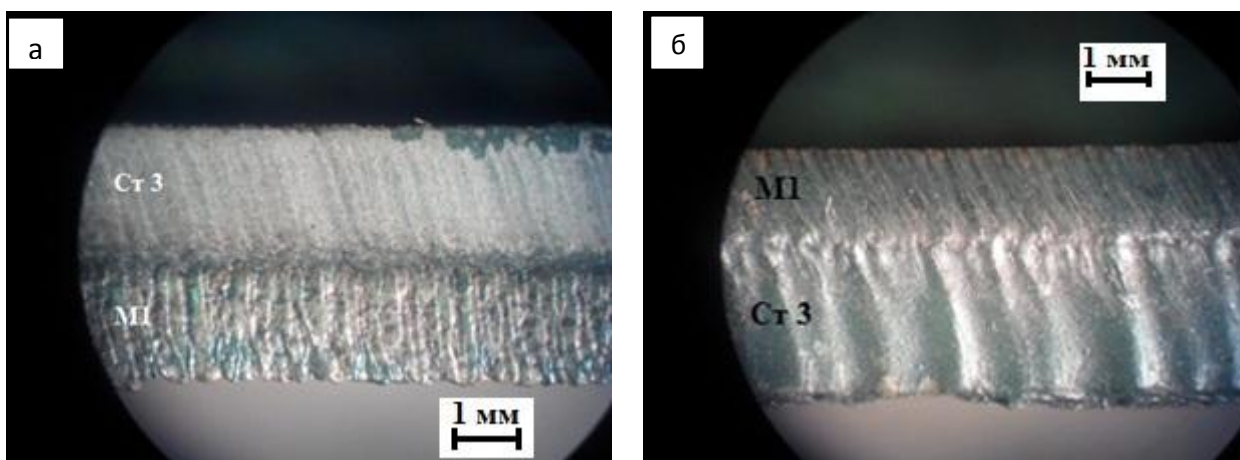


Рисунок 12 – Морфология поверхности реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» (схема Ni-Focus<sup>plus</sup>): а – рез со стороны стали Ст3; б – рез со стороны меди М1

Исследование микрогеометрии поверхности реза на участках биметалла показало, что шероховатость на стальном участке составляет  $Ra = 1,5 - 2,5$  мкм, а на медном -  $Ra = 3,0 - 6,0$  мкм, что является характерным при раскрое данных модельных материалов. Отклонение реза от перпендикулярности находилось в пределах  $\alpha_{cp} = 3,3 - 5,7^\circ$  в исследованном диапазоне скоростей обработки ( $V = 1,5 - 2,0$  м/мин). При этом отмечено полное отсутствие грата на нижних кромках реза, чему способствуют как низкие значения кинематической вязкости стали и меди, так и усиленные газодинамические потоки в канале реза, характерные для исследованной технологической схемы.

Смена лобовой стороны раскроя биметаллического пакета привело к значительному изменению как геометрии реза (рисунок 11, б), так и состояния его поверхности (рисунок 12, б). Изучение геометрии реза свидетельствует о значительном отклонении от перпендикулярности на верхнем участке, что является характерным для термической резки медных сплавов. На нижнем (стальном) участке биметалла имеет место расширение канала реза ( $\sim 0,25$  мм на сторону), при этом отклонение реза от перпендикулярности практически отсутствует.

Морфология поверхности реза свидетельствует о формировании волнообразного рельефа на участке стали, что, вероятно, обусловлено воздействием плазменной дуги на обрабатываемый материал через расплав меди, стекающей с верхнего участка (рисунок 12, б).

**Пятая глава** «Структурные исследования биметаллических композиций» посвящена изучению особенностей структурного состояния материалов в зоне реза исследуемых композиций. Если исследования в предшествующих главах работы были ориентированы на оценку точности, качества и графообразования при плазменном раскрое обозначенных композиций, то структурные исследования направлены на изучение зоны термического влияния, как одной из характеристик качества при термической резке материалов.

Структурные исследования после раскроя композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» подтвердили предположение о механизмах формирования канала реза при разных лобовых сторонах раскроя биметаллического пакета. Установлено, что при раскрое композиции со стороны нержавеющей стали на нижнем участке реза наблюдается натекание расплава стали 12X18H10T толщиной до 20 мкм, состоящего из 2-х слоев (рисунок 13, а, б).

Если прилегающий к границе реза слой расплава имеет однородное сплошное строение, характерное для нержавеющей стали, то поверх него присутствует еще один слой с отличающейся морфологией и структурой. В последнем присутствуют поры, трещины, несплошности и отдельные фрагменты материала, что позволяет предположить, что данный слой является результатом взаимодействия продуктов расплава с газовой средой канала реза. Возможность протекания химических реакций элементов расплава нержавеющей стали с кислородом плазмообразующего газа приводит к образованию оксидов  $Fe_3O_4$ ,  $(Fe, Cr)_2O_3$ ,  $FeO$  (рисунок 14), что способствует увеличению вязкости расплава и его осаждению на поверхности реза.

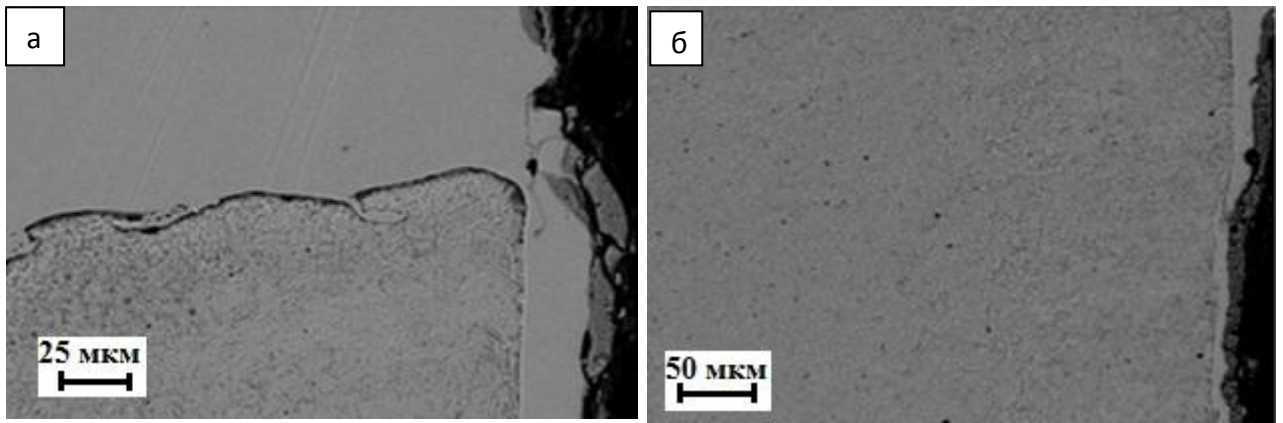


Рисунок 13 – Характер осаждения расплава стали 12X18H10T на участке низкоуглеродистой стали. Рез со стороны стали 12X18H10T

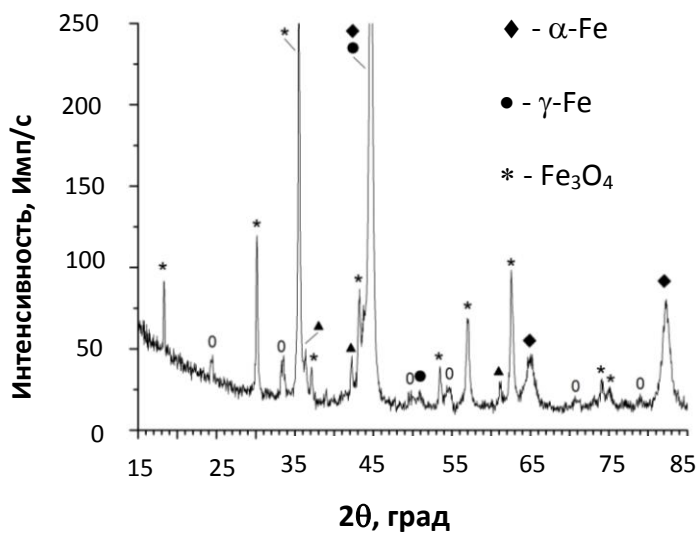


Рисунок 14 – Фазовый состав продуктов расплава с поверхности реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T»

Высококонцентрированный и локальный характер теплового воздействия при раскрое приводит к созданию значительного градиента температур в зоне реза и, как следствие, образованию закалочных структур (рисунок 15, а). Характер распределения микротвердости в зоне термического влияния на участках сталей Ст3 и 12X18H10T представлен на рисунке 15, б.

При смене лобовой стороны раскроя пакета со стали 12X18H10T на сталь Ст3 не обнаружено следов осаждения расплава на поверхности реза, что объясняет достижение лучших показателей точности и качества обработки. Зона терми-

При смене лобовой стороны раскроя пакета со стали 12X18H10T на сталь Ст3 не обнаружено следов осаждения расплава на поверхности реза, что объясняет достижение лучших показателей точности и качества обработки. Зона терми-

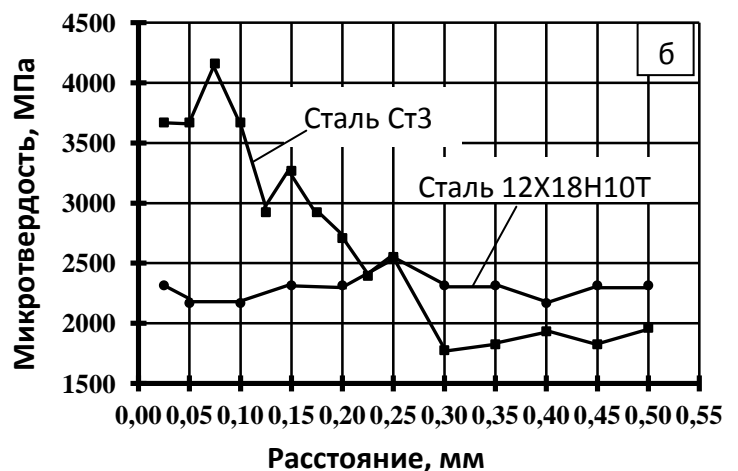
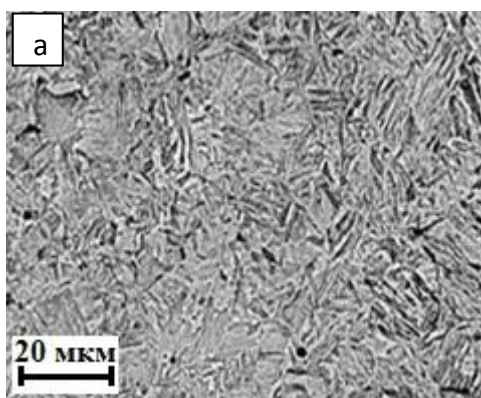


Рисунок 15 – Структура зоны термического влияния (а) и распределение микротвердости (б) композиции «сталь Ст3 + сталь 12X18H10T» при раскрое со стороны стали 12X18H10T

ческого влияния по размеру, распределению микротвердости, структурному состоянию имеет аналогичный предшествующей схеме характер.

Самой сложной из исследуемых биметаллических композиций с позиций достижения высокой точности и качества реза оказалось соединение «сталь Ст3 + алюминий А5М». Структурные исследования зоны реза выявили характерную по размерам и строению для стали Ст3 зону термического влияния при раскрое пакета со стороны низкоуглеродистой стали. Неблагоприятная геометрия реза и скопление расплава стали на участке алюминия (рисунки 8, 9), обусловленные значительной разницей в температурах плавления составляющих биметалла, являются результатом ослабления газодинамических потоков, ответственных за удаление расплава из канала реза.

Смена лобовой стороны раскроя со стали на алюминий не приводит к улучшению геометрии реза как на участке алюминия, так и стали. Если значительное отклонение реза от перпендикулярности на участке алюминия характерно для металлов с высокой теплопроводностью, то неблагоприятная геометрия реза на участке стали (рисунок 16) целиком определяется механизмами теплопередачи от плазменной дуги обрабатываемому материалу. Так низкая кинематическая вязкость алюминиевого расплава, усугубленная образованием его окислов, не обеспечивает полного удаления продуктов расплава из канала реза, приводя к осаждению его части на поверхности реза стали. Следовательно, окончательное формирование геометрии реза на дан-

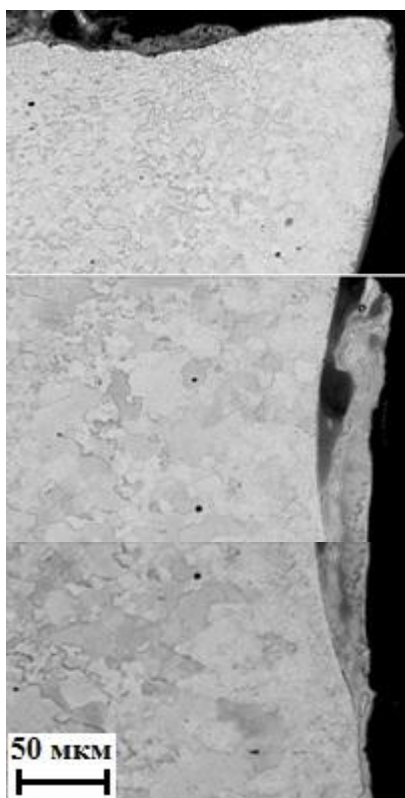


Рисунок 16 – Формирование канала реза на участке стали Ст3 при раскрое композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М» со стороны алюминия

ном участке будет определяться не прямым действием столба плазменной дуги, а подплавлением стали через слой стекающего расплава алюминия. Осажденный в канале реза расплав представляет собой продукты кристаллизации из расплава как алюминия, так и стали и оксидов алюминия (рисунок 17) с наличием пор и трещин (рисунок 16).

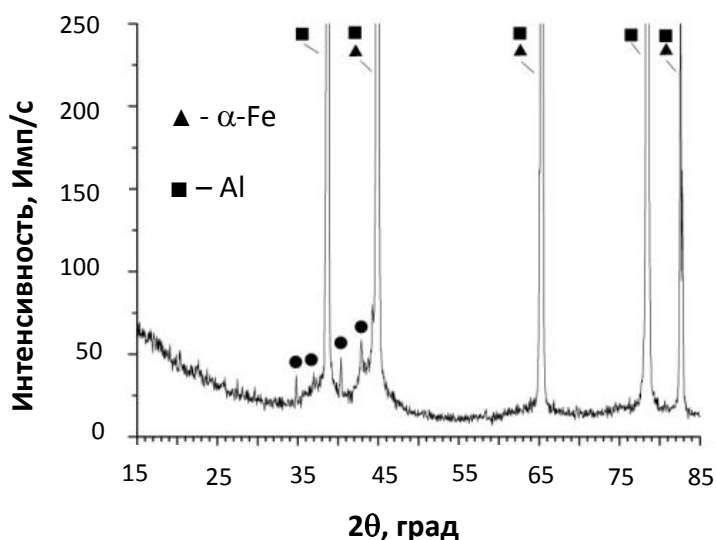


Рисунок 17 – Фазовый состав продуктов расплава с поверхности реза композиции «сталь Ст3 + алюминий А5М». Рез со стороны алюминия



Структурные исследования зоны реза композиции «сталь Ст3 + медь М1» показали, что при раскрое пакета со стороны стали происходит осаждение части ее расплава на участке меди (рисунок 18). Высокая теплопроводность меди обусловила резкое охлаждение расплава стали и ее кристаллизацию на поверхности реза. Структура зоны термического влияния на участке стали Ст3 и характер распределения микротвердости являются традиционными для условий высокоскоростного нагрева и охлаждения низкоуглеродистых сталей. Смена лобовой стороны раскроя композиции со стали на медь обеспечивает формирование реза без видимых следов осаждения расплава,

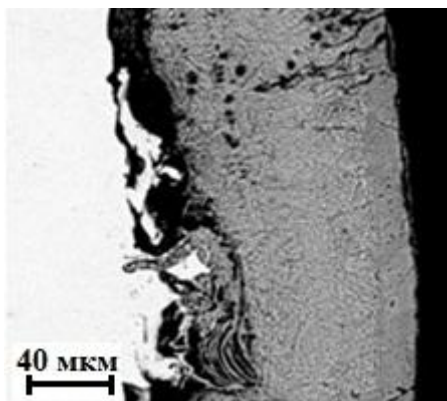


Рисунок 18 – Структура расплава стали, осажденного на участке меди композиции «сталь Ст3 + медь М1»

что объясняется низкой кинематической вязкостью расплава биметалла и свидетельствует о благоприятном характере газодинамических потоков в канале реза.

Совокупность полученных результатов по тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций из разнородных материалов позволила сформулировать обобщенные рекомендации по выбору технологических схем, режимных параметров, лобовой стороны раскроя.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Дальнейшее развитие темы исследований предполагает проведение математического моделирования процесса, что позволит выявить существующие ограничения в формировании канала реза и определить пути совершенствования технологических схем, режимных параметров и конструктивных решений источника нагрева, а также создать предпосылки для развития систем автоматизированного проектирования технологических процессов тонкоструйного плазменного раскроя.

## 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 биметалли-



ческие 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 Hi-Focus<sup>plus</sup> 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 Hi-Focus<sup>plus</sup> 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 Hi-Focus<sup>plus</sup> 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 раскрое композиции «сталь Ст3 + медь М1» со стороны стали, является значительная (до 10 раз при  $500^\circ C$ ) 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 раскрое композиций со стороны стали Ст3 и 150 – 180 мкм при раскрое с обратной стороны пакета. 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.

9. Разработаны технологические рекомендации по тонкоструйному плазменному раскрою как отдельных материалов, так и биметаллических композиций с позиций выбора технологических схем, назначения режимных параметров и установлению лобовой стороны раскроя 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

*В изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук*

1. Рахимьянов, А. Х. Технологические особенности раскроя 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.

2. 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.

3. Рахимьянов, А. Х. 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.

*В прочих изданиях*

4. 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.

5. 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.

6. Рахимьянов, А. Х. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов / А. Х. Рахимьянов // Инновации в машиностроении – основа технического раз-

вития 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.

7. Рахимянов, Х. М. Исследование обрабатываемости стали 12Х18Н10Т методом тонкоструйной плазменной резки / Х. М. Рахимянов, К. Х. Рахимянов, А. Х. Рахимянов, 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.

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

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

10. Рахимянов, Х. М. Моделирование тепловых процессов тонкоструйной плазменной резки / Х. М. Рахимянов, А. Х. Рахимянов, 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.

11. Рахимянов, Х. М. Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов при тонкоструйной плазменной резке листовых материалов / Х. М. Рахимянов, А. Х. Рахимянов, 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.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс: (383)346-08-57  
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № 1204 подписано в печать 22.10.2014 г.