УДК 621.9.01; 621.791.947.55

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСКРОЯ Биметаллического соединения «сталь стз + сталь 12х18н1от» при тонкоструйной плазменной резке*

А.Х. РАХИМЯНОВ, инженер Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, профессор (НГТУ, г. Новосибирск)

> Поступила 1 июля 2014 Рецензирование 4 августа 2014 Принята к печати 7 августа 2014

Рахимянов А.Х. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: centerfht@mail.ru

Определены перспективы использования тонкоструйной плазменной резки слоистых композиций «сталь Cr3 + сталь 12X18H10T», полученных сваркой взрывом. Дано обоснование выбора технологических схем с целью оптимизации режимных параметров по оценкам точности, качества реза и гратообразования. Экспериментально доказана нецелесообразность использования технологической схемы Hi–FocusF, реализуемой на максимальном токовом режиме (130 A), как необеспечивающей достаточное качество реза. Предложена схема проведения экспериментов по оптимизации обработки, заключающаяся в использовании технологической схемы Hi–Focus^{plus}, рекомендованной для раскроя углеродистых сталей, и схемы Hi–Focus – легированных сталей при раскрое как со стороны стальной составляющей, так и легированной. Выявлены особенности формирования геометрии реза при раскрое со стороны сталей в диапазоне скоростей обработки от 1,1 до 1,5 м/мин. Определено оптимальное значение скорости V = 1,2 м/мин, обеспечивающее наилучшее качество реза при минимальном количестве грата. Смена стороны реза с легированной стали на углеродистую привело к изменению характера геометрии реза. Отмечено наличие трех характерных участков в поперечном сечении реза и дана количественная оценка точности при изменении скорости обработки.

Использование для раскроя биметаллической композиции технологической схемы Hi–Focus^{plus} позволило определить оптимальные значения скорости обработки (V = 1,7 м/мин) при раскрое со стороны стали Ст3, обеспечивающие минимальное отклонение реза от перпендикулярности. Отмечено, что при использовании технологической схемы Hi–Focus^{plus} раскрой биметаллической композиции с любой стороны не сопровождается образованием грата на нижней кромке реза.

Исследование качества поверхности реза показало на низкое значение шероховатости ($R_a = 1, 2...1, 6$ мкм) и хорошую ее топографию.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, биметаллические композиции, точность и качество реза, технологические схемы, углеродистые и легированные стали.

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 257.

Введение

Из существующего многообразия методов соединения разнородных материалов, в том числе и листовых металлических композиций, можно выделить технологии, основанные на сварке разнородных материалов при помощи взрыва [1–4]. Как любой технологический метод, сварка взрывом имеет определенную область для ее реализации и обладает рядом ограничений, связанных со спецификой самого процесса. Специфика сварки взрывом, которую можно рассматривать как технологический метод получения слоистых композиций, заключается в следующем [2]:

• возможность высокопрочного соединения разнородных металлов, диффузионная сварка которых и сварка плавлением невозможны;

• сварка взрывом позволяет получать композиции соединений из металлов с резко различающимися температурами плавления;

• 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 методов пластического деформирования, например, прокатки [5];

• соединение пар металлов, таких как стальтитан, 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;

• 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.

Использование композиционных соединений, полученных сваркой взрывом, как конструкционных материалов требует поиска технологических методов их обработки, в том числе и раскроя на этапе заготовительного производства. Из существующего в настоящее время многообразия технологических методов раскроя листовых материалов наиболее привлекательным с позиций достигаемой точности и качества реза при обеспечении высокой производительности обработки является тонкоструйная плазменная резка [6]. Данная технология обеспечивает раскрой листовых металлических материалов в широком диапазоне толщин (до 160 мм) с производительностью процесса, характерной для плазменно-дугового метода [7], с точностью и качеством реза, присущих лазерной обработке [8].

Перспективы использования тонкоструйной плазменной резки для повышения эффективности раскроя листовых материалов в заготовительном производстве подробно изложены в работе [9], а изучению механизмов формообразования с оценкой точности и шероховатости реза посвящены исследования авторов [10, 11].

Для изучения технологических возможностей тонкоструйной плазменной резки применительно к раскрою биметаллических композиций авторами проведены экспериментальные исследования по обработке отдельных составляющих биметаллов. Так, в работе [12] обоснован выбор технологических схем и оптимизация тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей на примере раскроя листового проката углеродистой стали Ст3. Оптимизации технологических режимов раскроя данной стали по критериям качества реза также посвящены исследования, результаты которых приведены в работе [13]. Изучение обрабатываемости другого представителя биметаллического соединения легированной стали 12Х18Н10Т с использованием данной технологии представлено авторами в работе [14].

Целью работы является обоснование выбора технологических схем, оптимизация режимов и изучение точности и качества реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» с использованием тонкоструйной плазменной резки.

1. Методики экспериментальных исследований

Описание технологического комплекса тонкоструйной плазменной резки на базе установки Hi-Focus 130i, методик оценки качества и точности реза, а также аналитическое оборудование представлено А.Х. Рахимяновым в статье [12].

В качестве материала исследований использовалось биметаллическое соединение «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т», полученное сваркой взрывом в лаборатории взрыва Института гидродинамики СО РАН. В качестве исходных ма-

ТЕХНОЛОГИЯ

териалов для биметаллического соединения использовался листовой прокат указанных сталей толщиной 3 и 2 мм соответственно. Таким образом, суммарная толщина сварного пакета составила 5 мм. Химический состав, теплофизические свойства сталей Ст3сп ГОСТ 380-2005 и 12Х18Н10Т ГОСТ 5582–75 приведены в табл. 1, 2 и 3, 4 соответственно.

Таблица 1

CM

Основные	Массовая доля химических элементов, %							
элементы	C Mn Si Fe III				Прочие			
ГОСТ 380-2005	0,140,22	0,400,65	0,150,30	Не регламентировано				
Фактически	0,15	0,49	0,24	98,64	0,48			

Химический состав стали Ст3сп

Таблица 2

Теплофизические свойства стали Ст3сп

		Tei	плопроводно	ость,		Удельная
Плотность,	Теплоемкость, кал/г×град	KI	кал/м×час×г	рад	Температура	теплота
г/см3		20° C	200° C	500° C	плавления, ° С	плавления,
				300 C		кДж/кг
7,80	0,1077	63	53	37	1539	277

Таблица 3

Химический состав стали 12Х18Н10Т

Основные	Массовая доля химических элементов, %									
элементы	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	Р	Fe	Прочие
ГОСТ 5582–75	He	He	He	17,019,0	9,011,0	5·c − 0,8	0,02	0,035	Не регламен- тировано	
	бо-	бо-	бо-							
	лее	лее	лее							
	0,12	0,8	2,0							
Фактически	0,05	0,55	1,22	17,30	9,19	0,32	-	0,02	70,61	0,74

Таблица 4

Теплофизические свойства стали 12Х18Н10Т

Плотность, г/см3	Теплоемкость, кал/г×град	Te	плопроводно ккал/м·ч·гра	ость, ад	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг
		20 °C	200 °C	500 °C		
7,80	0,1077	1213	1415	18	14601500	277

2. Результаты и обсуждения

Принимая во внимание биметаллический характер композиции «сталь Cт3 + сталь 12X18H10T», для ее раскроя возможен выбор технологических схем для обработки как конструкционных углеродистых сталей, подробно рассмотренных в работе [12], так и легированных (рис. 1), рекомендованных разработчиком оборудования тонкоструйной плазменной резки (фирма Kjellberg, Германия).

Так, для раскроя пакета толщиной 5 мм можно рекомендовать следующие технологические схемы обработки углеродистых сталей:

• Hi–Focus на токовых режимах 35 и 45 A [12, рис. 3];



Рис. 1. Технологические параметры раскроя легированных сталей для технологических схем Hi–Focus, Hi–FocusF

• Hi – Focus^{plus} на токовом режиме 50 A [12, рис. 4];

• Hi – FocusF на токовом режиме 130 A [12, рис. 5].

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

Аналогично при выборе в качестве вариантов обработки из технологических схем раскроя легированных сталей возможны следующие (рис. 1):

• Hi–Focus на токовом режиме 45 A с рекомендуемой скоростью обработки V = 1,3 м/мин;

• Hi–FocusF на токовом режиме 130 A с *V* = 2,45 м/мин.

Несмотря на привлекательность технологических схем Hi–FocusF с токовым режимом I = 130 A, обеспечивающих раскрой на максимальных скоростях, от них следует отказаться. Так экспериментальные исследования подтвердили неудовлетворительное качество реза (рис. 2) при использовании данной технологической схемы как для углеродистых, 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 строения плазменного столба в канале реза [15], обеспечивающей создание достаточных газодинамических потоков, ответственных за полное удаление продуктов расплава, которые стекают и остаются на нижней кромке реза, свариваясь с основным металлом.

Таким образом, высокопроизводительная технологическая схема Hi – FocusF может быть рекомендована только для разделительной резки с необходимостью последующей механической обработки реза для обеспечения требуемой точности и качества.

В связи с этим для раскроя биметаллического соединения «сталь Ct3 + сталь 12X18H10T» использовались технологические схемы Hi–Focus^{plus} с токовым режимом I = 50 A и V = 1,75 м/мин, рекомендованная для обработки углеродистых сталей, и Hi–Focus с I = 45 A и V = 1,3 м/мин – для легированных сталей.



Рис. 2. Гратообразование на нижней кромке реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при обработке по технологической схеме Hi–FocusF для легированных сталей при раскрое:

а – со стороны стали 12Х18Н10Т; б – со стороны стали Ст3

CM

2.1. Обработка на режимах раскроя легированных сталей

Как отмечалось, каждая из отмеченных технологических схем применялась для раскроя биметаллической композиции как со стороны низкоуглеродистой стали Ст3, так и нержавеющей 12X18H10T. На рис. 3 представлено фото поперечного сечения реза при раскрое на различных скоростях биметаллической композиции со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Hi–Focus для легированных сталей.

Количественные показатели точности реза исследуемой композиции на отмеченных режимах представлены на рис. 4.



Рис. 3. Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Cr3 + сталь 12X18H10T» при раскрое со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Hi – Focus с *I* = 45 A для легированных сталей:

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



Рис. 4. Влияние скорости реза композиции «сталь Cт3 + сталь 12X18H10T» на точность реза при раскрое со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Hi–Focus с *I* = 45 A для легированных сталей:

α₁ – отклонение от перпендикулярности реза на участке стали Ст3; α₂ – отклонение от перпендикулярности реза на участке стали 12Х18Н10Т; α_{ср} – среднее отклонение реза биметаллической композиции

55

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

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 12Х18Н10Т ($\alpha_2 = +2,2^\circ$) на скорости обработки V = 1,1 м/мин (рис. 3, *a*) 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 продвижения канала реза. На нижнем участке композиции, представляющем низкоуглеродистую сталь (рис. 3, *a*), 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 участка нержавеющей стали к участку низкоуглеродистой вследствие 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 его ширины к низу (рис. 3, δ) 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 ско-

рости обработки до 1,5 м/мин сопровождается дальнейшим ухудшением точности реза на обоих участках композиции (рис. 3, *в*).

На рис. 4 представлена обобщенная характеристика точности реза композиции в целом как средний угол его наклона (α_{cp}). 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 12X18H10T 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 $\alpha_{cp} \sim 1^\circ$. На исследованных скоростях обработки при данной технологической схеме наблюдается минимальное количество грата с незначительным его увеличением при росте скорости раскроя.

Оценка качества поверхности реза по характеристике шероховатости представлена на рис. 5. В исследованном диапазоне скоростей



ности реза на участке стали CT3 *Рис.* 5. Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности $(\alpha_1 = 0.93^\circ)$, а с другой – снижение реза биметаллической композиции «сталь CT3 + сталь 12X18H10T» ее на участке нержавеющей со- при раскрое со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме ставляющей ($\alpha_2 = 6.68^\circ$). Ні–Focus с *I* = 45 А для легированных сталей

обработки прослеживаются незначительные колебания шероховатости (от $R_a = 5,78$ мкм при минимальной скорости, до $R_a = 8,74$ 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 рис. 6, а ее топография – на рис. 7.

Использование исследуемой технологической схемы для раскроя композиции при обработке со стороны низкоуглеродистой стали позволило выявить несколько иной характер геометрии реза (рис. 8).



Рис. 6. Профилограмма поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Hi–Focus (*I* = 45 A, *V* = 1,3 м/мин); рез со стороны стали 12Х18Н10Т; В.У. = 2000; Г.У. = 50



Рис. 7. Топография поверхности реза биметаллической композиции «сталь Cт3 + сталь 12X18H10T»; технологическая схема Hi–Focus (*I* = 45 A, *V* = 1,3 м/мин); рез со стороны стали 12X18H10T

Изучение геометрии реза позволило выявить три характерных участка, имеющих приблизительно одинаковые размеры. Так, первый участок в верхней части пакета занимает ~ 2/3 толщины участка низкоуглеродистой стали 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 12Х18Н10Т и имеет отрицательный угол



Рис. 8. Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Cт3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме Hi–Focus с *I* = 45 A для легированных сталей: *a* – *V* = 1,1 м/мин; *б* – *V* = 1,3 м/мин; *в* – *V* = 1,5 м/мин

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 рис. 9. 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



Рис. 9. Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме Hi – Focus с I = 45 А для легированных сталей:

 $[\]alpha_1$ – отклонение от перпендикулярности реза на первом участке; α_2 – отклонение от перпендикулярности реза на третьем участке; α_{cp} – среднее отклонение реза биметаллической композиции

данной схемы α_{cp} колеблется от $-3,72^{\circ}$ до $-1,46^{\circ}$, т. е. рез всегда имеет расширение к низу.

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

Качество поверхности реза является вполне удовлетворительным, что иллюстрируется результатами профилографирования (рис. 10, 11).

Результаты по исследованию морфологии поверхности реза на комплексе для оценки топографии представлены на рис. 12.

2.2. Обработка на режимах раскроя углеродистых сталей

Передтемкак приступить канализу и обсуждению экспериментальных результатов по оптимизации реза биметаллической композиции «сталь Ct3 + ctaль 12X18H10T» 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



Рис. 10. Профилограмма поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Hi–Focus (*I* = 45 A, *V* = 1,3 м/мин); рез со стороны стали Ст3; В.У. = 2000; Г.У. = 50



Рис. 11. Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое со стороны стали Ст3 по схеме Hi–Focus с *I* = 45 А для легированных сталей

59



Рис. 12. Топография реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; схема Hi – Focus (*I* = 45 A, *V* = 1,3 м/мин); рез со стороны стали Ст3

(V = 1,3 м/мин) – для схемы обработки легированных сталей. При этом токовый режим для обеих схем сопоставим и равнялся 50 А и 45 А соответственно. Возможность обработки конструкционных углеродистых сталей на повышенных скоростях и характеризует технологическую схему Hi-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. Для реализации схемы Hi-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 Hi-Focus), обеспечивающих достаточные по динамике газовые потоки для удаления увеличенных объемов расплавленного металла из зоны реза [12, рис. 4].

Изучение технологической схемы Hi – 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 рис. 13. Рез производился с использованием технологической схемы Hi–Focus^{plus} со стороны нержавеющей составляющей.

На рис. 14 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

CM



Рис. 13. Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое со стороны стали 12Х18Н10Т по технологической схеме Hi–Focus^{plus} с *I* = 50 A для конструкционных углеродистых сталей:

a - V = 1,5 м/мин; 6 - V = 1,75 м/мин; e - V = 2,0 м/мин



Рис. 14. Влияние скорости реза композиции «сталь Cr3 + сталь 12X18H10T» на точность реза при раскрое со стороны стали 12X18H10T по технологической схеме Hi–Focus^{plus} с *I* = 50 A для углеродистых сталей:

α₁ – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь СтЗ»; α₂ – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь 12Х18Н10Т»; α_{ср} – среднее отклонение реза от перпендикулярности биметалла

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 (рис. 15) позволил выявить следы стоков расплава нержавеющей стали на нижнем участке углеродистой стали. Это можно объяснить повышенной вязкостью расплава нержавеющей стали вследствие образования оксидов и нитридов ее легирующих элементов за счет наличия в составах плазмоОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ



Рис. 15. Морфология поверхности реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при раскрое со стороны стали 12Х18Н10Т по технологической схеме Hi–Focus^{plus} для углеродистых сталей

образующего газа кислорода, а завихряющего – азота. Расплав с верхнего участка, попадая на стальную составляющую, обладающую большей теплопроводностью, охлаждается, тем самым еще повышает свою вязкость. В результате этого имеющих место газовых потоков оказывается недостаточно для эффективного (полного) удаления расплава из канала реза, что приводит к формированию на его поверхности чередующихся гребней и бороздок, характерных для традиционных технологий плазменной резки.

Реализация схемы Hi – Focus^{plus} для раскроя биметаллической композиции со стороны составляющей «сталь Cт3» в установленном диапазоне скоростей позволило выявить особенности в обеспечении точности реза (рис. 16, 17).



Рис. 16. Геометрия реза биметаллической композиции «сталь Cт3 + сталь 12X18H10T» при раскрое со стороны стали Cт3 по технологической схеме Hi – Focus^{plus} для углеродистых сталей:

a - V = 1,5 м/мин; 6 - V = 1,75 м/мин; e - V = 2,0 м/мин

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 мощность факела значительно ниже, чем на участках столба и анодного пятна [15]. 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.

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 (рис. 18, 19).



Рис. 17. Влияние скорости реза композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» на точность реза при раскрое со стороны стали Ст3 по технологической схеме Hi–Focus^{plus} с *I* = 50 А для углеродистых сталей:

α₁ – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь Cr3»; α₂ – отклонение от перпендикулярности реза на участке «сталь 12Х18Н10Т»; α_{ср} – среднее отклонение реза от перпендикулярности биметалла



Рис. 18. Профилограмма поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Hi – Focus^{plus} (I = 50 A, V = 1,75 м/мин); рез со стороны стали 12Х18Н10Т; В.У. = 2000; Г.У. = 50:

а – на участке стали Ст3; б – на участке стали 12Х18Н10Т



Рис. 19. Топография поверхности реза биметаллической композиции «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т»; технологическая схема Hi – Focus^{plus} (*I* = 50 A, *V* = 1,75 м/мин); рез со стороны стали 12Х18Н10Т

Выводы

При выборе из существующего ряда возможных технологических схем плазменного раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» следует ориентироваться на схемы с минимальным токовым режимом для обработки соответствующей толщины пакета. Так, для раскроя исследуемой биметаллической композиции толщиной 5 мм возможно назначить технологические схемы Hi – Focus^{plus} на токовом режиме 50 A, рекомендуемую для обработки углеродистых сталей, и Hi – Focus на токовом режиме 45 A – для обработки легированных сталей.

Экспериментально установлено, что при раскрое биметаллического пакета со стороны стали 12Х18Н10Т на режимах обработки легированных сталей минимальное отклонение реза от перпендикулярности отмечено на скорости обработки V = 1,2 м/мин. Увеличение скорости приводит к ухудшению точности реза и в большей степени на участке легированной стали. Наименьшая шероховатость ($R_a = 5,78$ мкм) поверхности реза и незначительное гратообразование также имеет место при обработке на скорости V = 1,2 м/мин. Снижение скорости приводит

к перегреву расплава в канале реза, его расширению и ухудшению точности.

Использование данной технологической схемы при раскрое биметаллической композиции со стороны стали СтЗ приводит к изменению геометрии реза. Выявлено, что во всем исследованном диапазоне скоростей наблюдается расширение канала реза к низу. При этом наблюдается высокое качество поверхности реза ($R_a = 1,8 - 2,6$ мкм) при минимальном количестве грата на нижней кромке.

Применение технологической схемы Hi–Focus^{plus}, предназначенной для раскроя углеродистых сталей, при обработке биметаллической композиции со стороны стали 12X18H10T позволило обеспечить высокую точность реза на скоростях 1,6...1,75 м/мин. При этом на поверхности реза наблюдается осаждение элементов расплава легированной стали в верхней части реза и следы его стоков на участке стали Ст3. Это явление не обеспечивает хорошей микрогеометрии поверхности реза.

Раскрой биметаллической композиции со стороны стали Ст3 по технологической схеме Hi–Focus^{plus} на скорости V = 1,5 м/мин обеспечивает максимальную точность реза. Высокое качество поверхности реза ($R_a = 1,2...1,6$ мкм)

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

CM

ТЕХНОЛОГИЯ

и отсутствие грата наблюдается во всем исследованном диапазоне скоростей.

Таким образом, наиболее приемлемым вариантом обработки композиции «сталь Cт3 + сталь 12X18H10T» является раскрой с использованием технологической схемы Hi – Focus^{plus}, предназначенной для обработки углеродистых сталей. Раскрой композиции следует производить со стороны стали Cт3, что обеспечивает максимальную точность реза, минимальную шероховатость его поверхности, отсутствие грата при высокой производительности обработки.

Список литературы

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом / отв. ред. С.С. Григорян. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.

2. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом / АН БССР, Витеб. отд-ние Ин-та физики твердого тела и полупроводников. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.

3. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – 128 с.

4. Злобин Б.С. Сварка взрывом стали с алюминием // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 137–140.

5. *Суханов Д.А.* Повышение конструктивной прочности сталей формированием тонкодисперсной слоистой структуры: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2002. – 198 с.

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

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

8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки:

учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд. стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.

9. Локтионов А.А., Захаров В.В. Тонкоструйная плазменная резка как эффективная технология в заготовительном производстве // 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.

10. Рахимянов Х.М., Локтионов А.А. Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости поверхности реза // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7 Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 11–13 нояб. 2013 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 349–353.

11. Рахимянов Х.М., Локтионов А.А. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. Муханова И.И.: сб. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 151–153.

12. Рахимянов А.Х. Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 46–55.

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

14. 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.

15. Полевой Г.В., Сухинин Г.К. Газопламенная обработка металлов: учебник для сред. проф. образования. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-1604-6.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE) N 3(64), July – September 2014, Pages 51–67

Technological features of the bimetallic joints «steel CT3 + steel 12X18H10T» layout by high-precision plasma cutting

Rakhimyanov A.Kh., Engineer, e-mail: centerfht@mail.ru Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru Krasilnikov B.A., Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail:_167bak@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The prospects of using high-precision plasma cutting of the layered compositions "steel Cr3 + steel 12X18H10T" received by explosion welding are identified. The rationale for the selection of technological schemes to optimize the mode parameters for accuracy, cut quality and burr formation is given. The inadvisability of using technological scheme Hi-FocusF, realizable at a maximum current mode (130 A) as not providing sufficient quality cut is demonstrated experimentally. The scheme of experiments to optimize the processing, which suggests of using the technological scheme Hi-Focus^{plus}, recommended for carbon steel cutting, and scheme Hi-Focus for alloyed steels when cutting both the steel component and alloy is proposed. Peculiarities of cut geometry formation when cutting steel 12X18H10T side by technological scheme Hi-Focus with current mode I = 45 A for alloyed steels in processing speed range of 1,1 to 1,5 m / min are identified. The optimal value of the speed V = 1,2 m / min, providing optimum cutting quality with minimum burr are identified. Start cutting from the carbon steel side leads to the change in the character of the cut geometry. The presence of 3 specific areas in the cross section of cut is observed and quantitative estimation of the accuracy when the processing speed changed is given.

Using technological scheme Hi-Focus^{plus} for cutting bimetallic composition allows to determine the optimal values of the processing speed (V = 1,7 m / min) during cutting steel Cr 3 ensure minimal deviation from perpendicularity of the cut. It is noted that using the technological scheme Hi-Focus^{plus} for bimetallic composition cutting on both side is not accompanied by burr forming on the bottom edge of the cut.

The study of the cut surface quality showed of the low surface roughness (Ra = 1,2 - 1,6 mm) and its good topography.

Keywords:

high-precision plasma cutting, bimetallic connections, accuracy and cutting quality, technological schemes, carbon and alloyed steels.

References

1. Deribas A.A., Grigoryan S.S. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom.* 2-e izd. [Physics of hardening and explosion welding]. 2nd ed. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 221 p.

2. Zakharenko I.D. Svarka metallov vzryvom [Metal welding explosion]. Minsk, Navuka i tjehnika Publ., 1990. 205 p.

3. *Svarka vzryvom i svoistva svarnykh soedinenii. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov.* [Explosion welding and properties of welded joints. Interuniversity collection teach works]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2000. 128 p.

4. Zlobin B.S. Svarka vzryvom stali s alyuminiem [Explosion Welding of Steel with Aluminum]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Wave*, 2002, vol. 38, no. 3, pp. 137-140 (in Russian).

5. Sukhanov D.A. *Povyshenie konstruktivnoi prochnosti stalei formirovaniem tonkodispersnoi sloistoi struktury*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increase the structural strength steels forming fine layered structure. Dr. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2002. 198 p.

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

7. Shirshov I.G., Kotikov V.N. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 192 p.

8. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser machining]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 664 p.

9. Loktionov A.A., Zakharov V.V. [Trickle plasma cutting as an effective technology in the blank production]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh, 2-4 dekabria 2011 g. v 6 chastiakh* [Proceedings of All-Russian scientific conference of young scientists "Science. Technologies. Innovations", 2-4 December 2011 in 6 parts]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pt. 2, pp. 29-30 (in Russian).

10. Rakhimianov Kh.M., Loktionov A.A. [Impact of technology trickle plasma cutting on the formation of the surface roughness of the cut]. *Sbornik nauchnykh trudov 7 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* "Sovremennye problemy mashinostroeniia" [Collection of Scientific Papers 7th International Scientific-Technical Conference "Modern Problems of Engineering", Tomsk, 11-13 November 2013]. Tomsk, TPU Publ., 2013, pp. 349-353 (in Russian).

11. Rakhimianov Kh.M., Loktionov A.A. [Analysis of errors in forming trickle plasma cutting metal materials]. Sbornik trudov Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia "Sovremennye problemy v tekhnologii mashinostroeniia", posviashchennaia 100-letiiu so dnia rozhdeniia professora Mukhanova I.I. [Proceedings of

ТЕХНОЛОГИЯ

CM

the International Scientific and Practical Conference "Modern Problems in Mechanical Engineering Technology", dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor I.I. Mukhanova]. Novosibirsk, 2009, pp. 151-153 (in Russian).

12. Rakhimyanov A.Kh. Vybor tekhnologicheskikh skhem i optimizatsiya rezhimov tonkostruinoi plazmennoi rezki konstruktsionnykh stalei [Selection of technological schemes and high-precision plasma cutting mode optimization for structural steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 46-55.

13. Rakhimianov A.Kh., Rakhimianov K.Kh., Shopf S.V. Issledovanie obrabatyvaemosti stali St3 metodom tonkostruinoi plazmennoi rezki [Study workability of the steel St3 trickle method for plasma cutting]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2012, no. 1, pp.121-124.

14. Rakhimianov Kh.M., Rakhimianov K.Kh., Rakhimianov A.Kh., Shopf S.V., Zakharov V.V. [Study workability of the steel 12X18H10T trickle method for plasma cutting]. *Trudy 4 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii"* [Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference "Innovations in Machine building"]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013, pp. 38-44 (in Russian).

15. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov* [Flame machining metals]. Moscow, Academia Publ., 2005. 336 p. ISBN 5-7695-1604-6.

Funding

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (The public contract no. 2014/138, project no. 257).

Received 1 July 2014 Revised 4 August 2014 Accepted 7 August 2014