УДК 621.9.01; 621.791.947.55

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ*

А.Х. РАХИМЯНОВ, инженер
(*НГТУ, г. Новосибирск*)

Поступила 26 марта 2014
Рецензирование 7 мая 2014
Принята к печати 12 мая 2014

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

Рассмотрены вопросы выбора технологических схем тонкоструйной плазменной резки листовых конструкционных сталей в диапазоне толщин от 0,5 до 30 мм. Представлены результаты экспериментальных исследований по оптимизации режимов плазменного раскроя углеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм с оценкой точности реза, качества его поверхности, гратообразования на нижней кромке. Точность раскроя листовых материалов оценивалась по углу наклона кромок реза на поперечных шлифах, а качество обработанных поверхностей – по параметру шероховатости. Установлено, что при выбранной технологической схеме тонкоструйной плазменной резки в зависимости от класса листового материала, его толщины достижение требуемой точности и качества реза обеспечивается за счет скорости обработки. Так, при повышении скорости обработки конструкционной стали Ст3 с 2,0 до 2,4 м/мин происходит увеличение отклонения кромок реза от перпендикулярности с 3,8 до 5,8° и повышение шероховатости поверхности реза от Ra = 1,75 мкм до Ra = 3,2 мкм. Снижение точности реза с повышением скорости обработки объясняется ростом градиента температур по сечению реза, приводящим к неравномерному температурному полю по толщине реза. Ухудшение шероховатости поверхности реза на максимальных скоростях объясняется ограничениями в развитии газо- и гидродинамических потоков, участвующих в удалении продуктов расплава из зоны реза, что приводит к частичному их осаждению на обработанных поверхностях. Тонкоструйная плазменная обработка конструкционной стали Ст3 не приводит к значительному гратообразованию на кромках реза во всем исследованном диапазоне скоростей.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, точность и качество реза, технологические схемы, плазмообразующие и завихряющие газы, конструкционные стали.

Введение

Технологический процесс изготовления деталей машин в общем случае предполагает традиционную структуру: заготовительная операция; комплекс механических операций, включая обдирочные, черновые, чистовые и отделочные этапы обработки; различного рода термические операции (нормализация, отжиг, закалка, отпуск); нанесение покрытий, мойка и контроль. Перспективным путем снижения технологической себестоимости может быть использование методов обработки, позволяющих сократить или исключить определенные этапы технологического процесса. Так, на этапе заготовительного производства использование традиционных технологий раскроя листовых материалов, таких как газопламенная [1], плазменная резка [2], со-

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

провождается низким качеством реза, что требует назначения излишних припусков и введения дополнительных обдирочных операций по их удалению.

Применение современных технологий, таких как лазерная [3–5], струйная гидравлическая, тонкоструйная плазменная обработка, позволило повысить точность и качество реза [6, 7].

Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов в зоне обработки металлических материалов при тонкоструйной плазменной резке [8] говорят об эффективности использования данного теплового источника как инструмента для разделительной резки листовых материалов в широком диапазоне толщин с высокой производительностью процесса.

В работах [9,10] авторами дан анализ современного состояния заготовительной стадии машиностроительного производства при раскрое листовых материалов. Экспериментально доказана возможность исключения стадий предварительной механической обработки в технологическом процессе изготовления деталей машин.

Для эффективного внедрения того или иного метода разделительной резки на заготовительной стадии процесса необходимо создание технологических рекомендаций для обработки определенного класса материалов.

Настоящая статья посвящена выбору технологических схем и оптимизации режимных параметров тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей по критериям точности и качества реза.

Методики экспериментальных исследований

Для проведения исследований в качестве материала была выбрана конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества марки сталь Ст3 в виде листового проката [11].

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

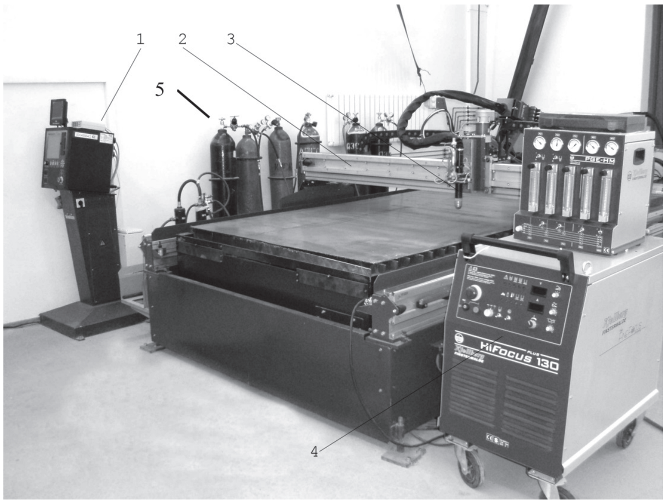

Рис. 1. Технологический комплекс тонкоструйной плазменной резки

Система ЧПУ обеспечивает перемещение плазмотрона 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 [6,12].

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

Тонкоструйная плазменная резка является сложным электрофизическим процессом, точность и качество реза при котором зависят от многих факторов, включая энергетические параметры (напряжение и ток дуги), состав, давление и расход плазмообразующих (режущих) и завихряющих газов, факельный зазор, скорость реза, теплофизические свойства и химический состав обрабатываемого материала.

Составы плазмообразующего и завихряющего газов определяются классом обрабатываемого материала. Если при раскрое конструкционных углеродистых сталей в качестве плазмообразующего газа используется кислород, то его применение для легированных сталей нежелательно, так как активное окисление металла в зоне реза приводит к образованию тугоплавких оксидов с образованием окалины на поверхности реза. Поэтому для раскроя металлов данного класса в качестве плазмообразующего газа используется чистый азот либо азото-водородная смесь в составе 95 % N и 5 % H. Однако применение азота приводит к образованию нитридов на поверхности реза, что впоследствии ухудшает свариваемость деталей.

Назначение рабочих давлений и расходов используемых газов в основном определяется толщиной реза, а соответственно и силой тока плазменной дуги. Напряжение последней зависит от величины факельного зазора (расстояния от плазмотрона до обрабатываемой поверхности). Увеличение напряжения от оптимального ухудшает точность реза (в первую очередь отклонение кромок от перпендикулярности) и увеличивает гратообразование. Снижение напряжения вследствие уменьшения факельного зазора приводит к преждевременному сгоранию сопла [13], что сопровождается снижением точности формообразования при обработке [14,15].

Таким образом, для оптимизации процесса тонкоструйной плазменной резки по оценкам точности и качества обработки, гратообразования, зоны термического влияния в качестве управляющих факторов процесса следует считать ток плазменной дуги и скорость 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 (рис. 2). Угловое отклонение кромок реза от перпендикулярности (α_1, α_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.

Качественная оценка состояния поверхности реза и количества грата на нижней кромке осуществлялась на микроскопе МБС-10. Для количественной оценки шероховатости использовался профилограф-профилометр модели 252. Изучение морфологии поверхности реза проводилось с помощью комплекса изучения топографии поверхности ZIGO New View 7300.

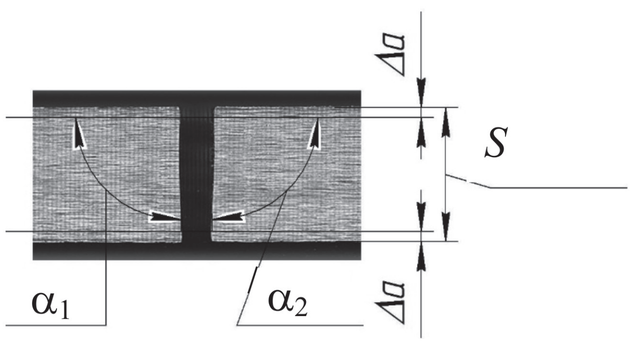

Рис. 2. Схема определения отклонения кромок реза от перпендикулярности в соответствии с методикой по ISO 9013: 2002

Зависимость величины Δa от толщины реза

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

Результаты и обсуждения

Оптимизация процесса плазменного раскроя по критерию качества обработки предполагает установление значений режимных параметров – тока плазменной дуги и скорости реза. При этом необходимо иметь в виду, что для каждой толщины обрабатываемого материала определенного класса и марки существует критическое значение скорости реза для конкретной величины тока дуги, выше которой не достигается сквозной прорез материала. Исходя из этих соображений разработчиком оборудования тонкоструйной плазменной резки (фирма Kjellberg, Германия) был предложен ряд технологических схем (Hi-Focus, Hi-Focus^{plus}, Hi-FocusF) с определением области их распространения для разделительной резки материалов в различном диапазоне толщин. Класс обрабатываемого материала в пределах технологических схем определяет набор плазмообразующего и завихряющего газов и значения их параметров (расход и давление), что обусловливает необходимый характер развития газо- и гидродинамических процессов в зоне реза.

На рис. 3 показан реализуемый диапазон скоростей обработки в зависимости от толщины реза конструкционных сталей при значениях тока дуги, соответствующих технологической схеме Hi-Focus.

Данная технологическая схема ограничена диапазоном токовых значений от 20 до 50 А, что обеспечивает обработку листовых конструкционных сталей толщиной от 0,5 до 8 мм. Диапазон скоростей реза находится в пределах от 0,5 до 5 м/мин. При этом в качестве плазмообразующего газа используется кислород с параметрами давления 5 бар и расхода от 10 до 25 услов-

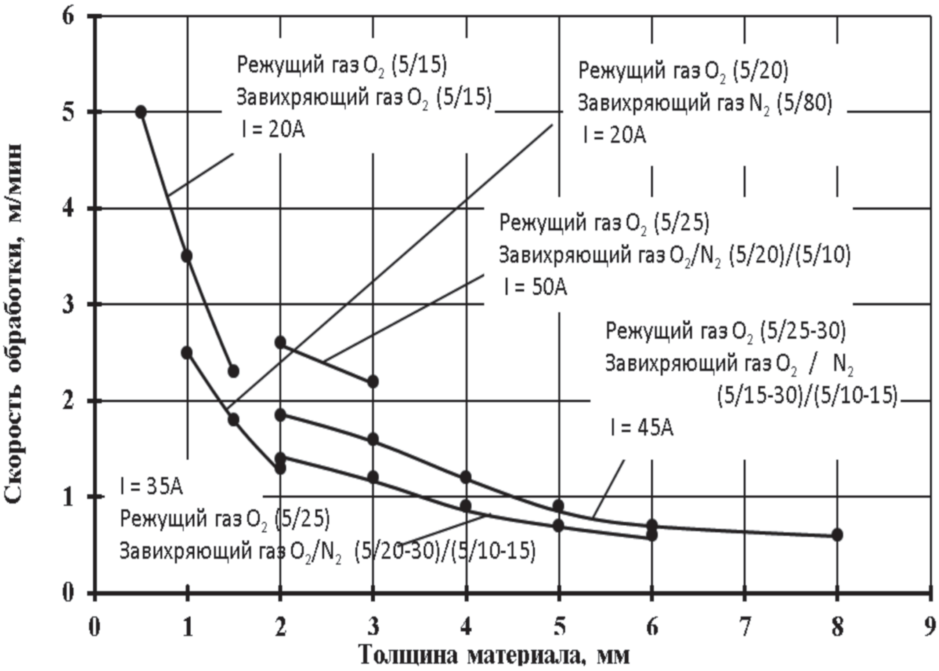

Рис. 3. Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Hi-Focus

ных делений по шкале прибора газовой консоли установки. Так, при минимально возможном значении тока I = 20 А диапазон толщин реза находится в пределах 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…50 А с соответствующим увеличением расхода плазмообразующего газа и снижением скорости обработки. При увеличении толщины реза необходима смена завихряющего газа с кислорода на азот и далее на кислородно-азотную смесь.

Следует отметить, что изменение тока дуги требует установки соответствующего сопла, что сопровождается изменением ширины реза (с 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 технологическую схему Hi-Focus^{plus} (рис. 4).

Данная схема характеризуется расширенным диапазоном рабочих токов (от 50 до 130 А) и обеспечивает раскрой на скоростях реза от 0,5 до 2,7 м/мин. Как и в предыдущей схеме, в качестве плазмообразующего газа используется кислород, но при повышенном давлении (10 бар) и регулируемых расходах от 20 до 60 условных делений шкалы прибора. В качестве завихряющего газа используется азот (I = 50 А) и кислородно-азотная смесь (I = 100…130 А). Как и следовало ожидать, переход к максимальным токам сопровождается увеличением ширины реза до 3,2 мм.

Третья технологическая схема (Hi-FocusF) в обработке конструкционных сталей также ориентирована на широкий диапазон толщин реза (6…25 мм), но в отличие от предыдущей схемы характеризуется постоянством мощности дуги при максимально возможном значении тока (I = 130 А) (рис. 5).

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

Возможность обработки листовых материалов в широком диапазоне толщин на одних технологических режимах, с одной стороны, является привлекательной, поскольку не требует дополнительной переналадки плазмотрона, а с другой – эксплуатация оборудования на максимальных токах ведет к ускоренному износу расходных элементов и росту энергозатрат.

Оптимизация режимов обработки в рамках конкретной технологической схемы должна производиться по критериям точности и качества раскроя определенной марки материала, состояния поставки и толщины. В качестве конструкционной стали для оптимизации режимов тон-

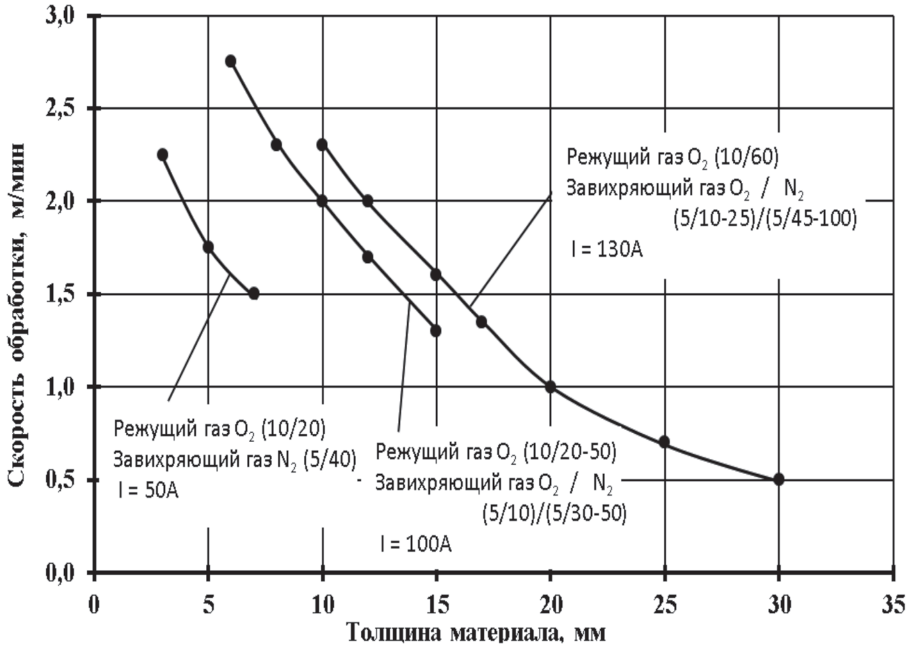

Рис. 4. Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Hi-Focus[plus]

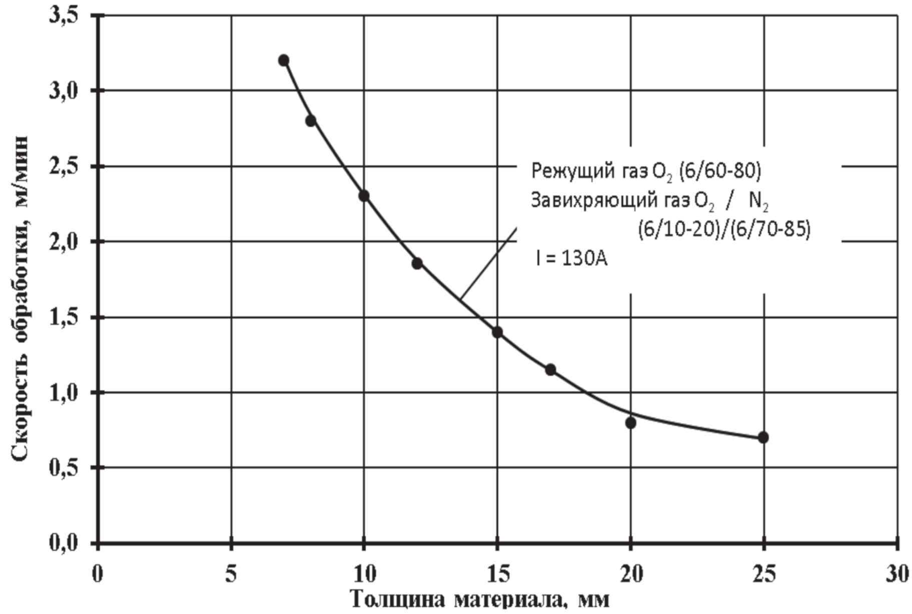

Рис. 5. Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Hi-FocusF

коструйной плазменной резки использовался листовой прокат стали Ст3 толщиной 3 мм. Из рассмотренных технологических схем представляется целесообразной схема Hi-Focus. Из возможных вариантов обработки с токами 35, 45, 50 А предпочтение было отдано последнему варианту, как обладающему наибольшей мощностью, а следовательно, допускающему обработку с максимальной производительностью.

Выбирая для обработки определенную технологическую схему с соответствующим значением токовой характеристики, с установленным набором плазмообразующего и завихряющего газов и их параметрами, в роли технологического режима для оптимизации точности и качества реза может быть использована только скорость обработки. По результатам предварительных экспериментов был установлен диапазон варьирования скоростью обработки – V = 2,0…2,4 м/мин [11].

В соответствии с методикой оценки геометрической точности реза получена зависимость отклонения от перпендикулярности реза от скорости обработки (рис. 6).

Аналогичный характер зависимости от скорости обработки имеет характеристика качества поверхности реза стали Ст3, представленная на рис. 7.

Топография поверхности реза с количественной оценкой характеристик ее микрогеометрии показана на рис. 8.

Внешний вид поверхности реза стали Ст3 при различных скоростях обработки изображен на рис. 9.

Если на скорости V = 2,0 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 разделительной резки. Рельеф представляет собой совокупность следов от мгновенных положений потоков продуктов расплава из зоны реза. Увеличение скорости обработки вносит ограничения в развитие газо- и гидродинамических потоков, участвующих в удалении продуктов расплава с поверхности реза.

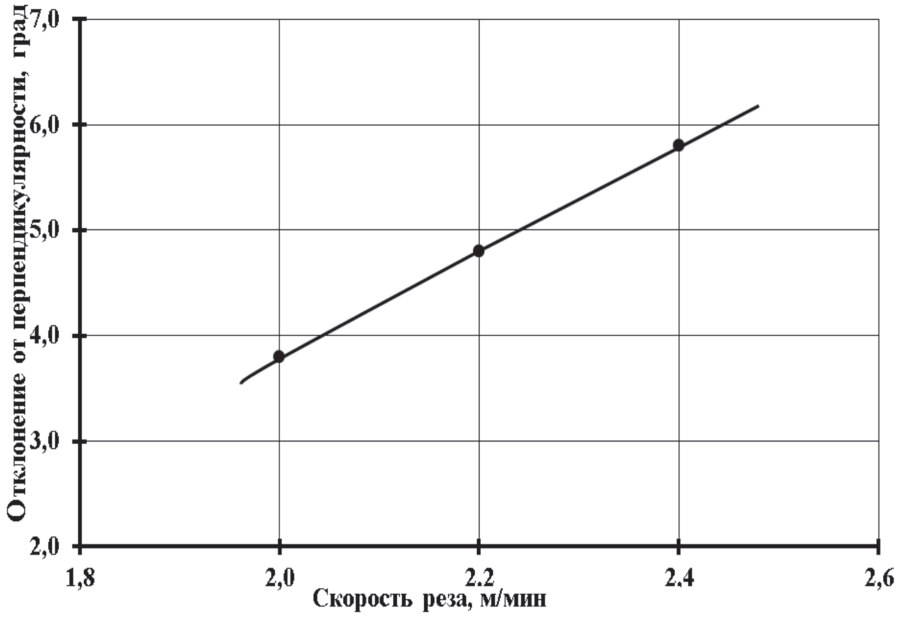

Рис. 6. Влияние скорости обработки на точность реза стали Ст3

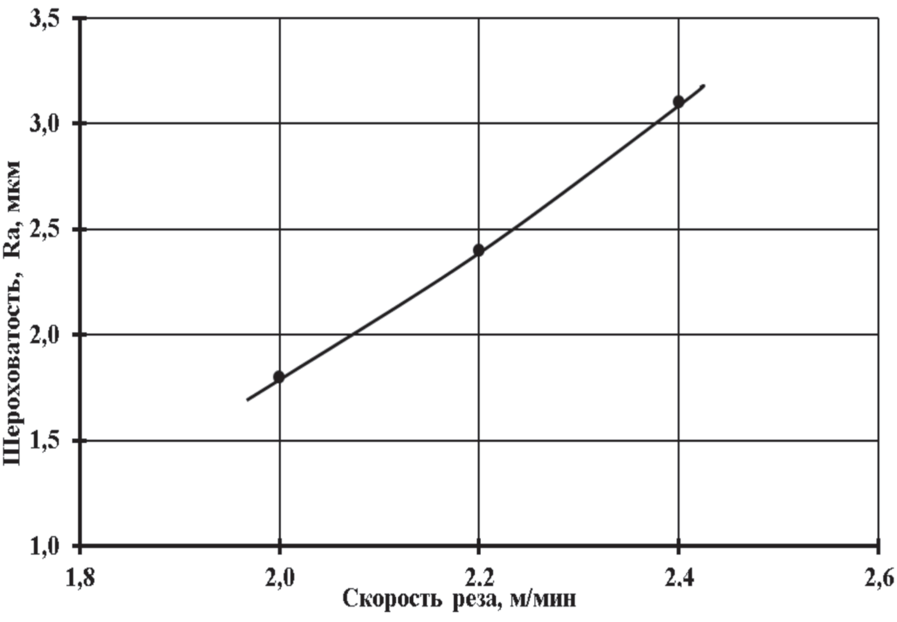

Рис. 7. Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности реза стали Ст3

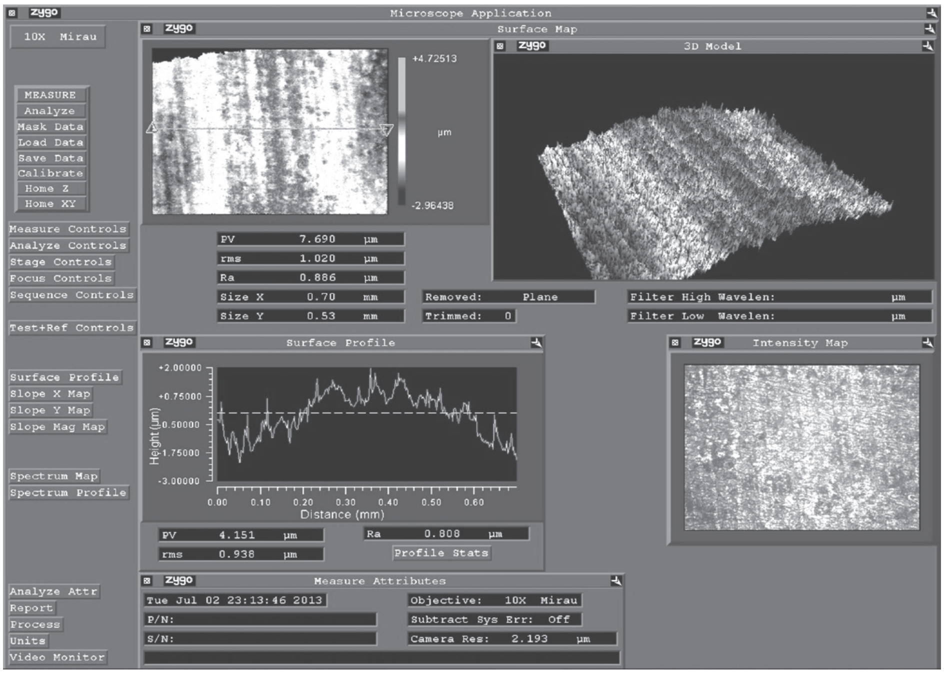

Рис. 8. Топография поверхности реза стали Ст3

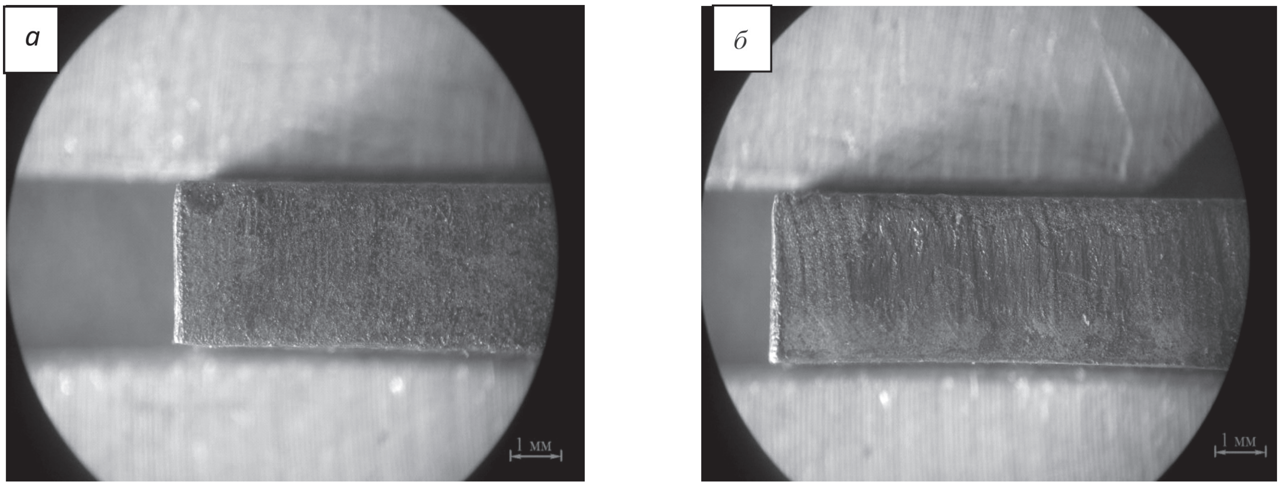

Рис. 9. Морфология поверхности реза стали Ст3:
а – *V* = 2,0 м/мин; *б* – *V* = 2,4 м/мин

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» газо- и гидродинамических потоков в зоне реза. При этом образующийся грат легко отделим от кромок реза.

Выводы

Технология тонкоструйной плазменной резки листовых конструкционных сталей основана на трех технологических схемах: Hi-Focus, Hi-Focus^{plus}, Hi-FocusF, предназначенных для различных толщин обрабатываемого материала. Так, для малых толщин реза (0,5…8 мм) рекомендуется технологическая схема Hi-Focus, реализующая процесс раскроя при токах плазменной дуги от 20 до 50 А. Использование максимального значения тока позволяет повысить скорость обработки, но при этом ухудшаются показатели точности и качества реза. Повышение тока сопровождается ростом диаметра столба плазменной дуги, что ведет к увеличению ширины реза.

Необходимость обработки больших толщин материала требует применения других технологических схем: Hi-Focus^{plus} либо Hi-FocusF, позволяющих вести обработку на токах до 130 А (для используемого технологического комплекса). Технологическая схема Hi-Focus^plus допускает ряд токовых значений плазменной дуги от 50 до 130 А для обработки материалов в широком диапазоне толщин реза (4…30 мм). Для технологической схемы Hi-FocusF характерна обработка во всем рекомендуемом диапазоне толщин (6…25 мм) листового материала при максимальном значении тока (130 А).

Выбор плазмообразующих и завихряющих газов в основном определяется классом обрабатываемого материала. Так, для конструкционных сталей в качестве плазмообразующего газа используется кислород, а завихряющего – кислород, азот либо кислородно-азотная смесь. Параметры газов (давление и расход), определяющие характер газо- и гидродинамических потоков, ответственных как за плавление, так и за удаление продуктов расплава из зоны реза, назначаются для каждой технологической схемы в зависимости от тока дуги.

Таким образом, для управления точностью формообразования, качеством поверхности реза и производительностью процесса наиболее эффективным режимным параметром плазменного раскроя в рамках каждой технологической схемы является скорость обработки.

Список литературы

1. *Полевой Г.В.* Газопламенная обработка металлов: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Г.В.Полевой, Г.К.Сухинин. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с. ISBN 5-7695-1604-6.

2. *Электрофизическая* и электрохимическая обработка материалов: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

3. *Григорьянц А.Г., Соколов А.А.* Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с.

4. *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-й Междунар. конф. «Лазерные технологии и средства их реализации». – С-Петербург, 23-28 сент. 2003.

5. *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. стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664с.

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

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

8. *Рахимянов А.Х.* Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов при тонкоструйной плазменной резке листовых материалов / А.Х. Рахимянов // 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.

9. *Локтионов А.А.* Повышение эффективности листового раскроя в заготовительном производстве / А.А. Локтионов, Х.М. Рахимянов // Инновации в машиностроении: Тр. 3-й междунар. науч.-практ. конф., Барнаул, 26–28 сентября 2012 г.

10. *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.

11. *Рахимянов А.Х.* Исследование обрабатываемости стали Ст3 методом тонкоструйной плазменной резки / А.Х. Рахимянов, К.Х. Рахимянов, С.В. Шопф // Ползуновский альманах, 2012. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – № 1 – С. 121–124.

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

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

14. *Локтионов А.А.* Износ расходных элементов плазмотрона при термической резке листового материала / А.А. Локтионов, Х.М. Рахимянов,

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. Зайреса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 61–65.

15. *Рахимянов Х.М.* Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке / Х.М. Рахимянов, А.А. Локтионов // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. – 2011. – № 4 (53). – С. 14–18.

OBRABOTKA METALLOV
(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)
N 2(63), April – June 2014, Pages 46–55

Selection of technological schemes and high-precision plasma cutting mode optimization for structural steels

Rakhimyanov A.Kh., Engineer, e-mail: centerfht@mail.ru

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

Abstract

Problems of the high-precision plasma cutting technological scheme for structural sheet steels with thickness range from 0,5 to 30 mm are considered. Results of experimental research on plasma cutting mode optimization for 3 mm thick steel St 37-3 are presented with evaluation of cutting precision, surface quality and burr forming on the bottom edge. The accuracy of sheet materials cutting was estimated by cutting edge angle at the transverse sections, the surface quality assessed by roughness parameter. It is established that depending on material class for the chosen scheme, the required accuracy and cutting quality are provided by processing speed. Thus the perpendicularity deviation increase in cutting edge from 3,8º to 5,8º and roughness development from Ra = 1,75 μm to Ra = 3,2 μm occurs with the processing speed increase from 2,0 to 2,4 m / min while structural steel St 37-3 cutting. Loss of the cutting precision with increased processing speed is due to the increase of the temperature gradient over the cross section of the cut, which leads to uneven temperature field over the thickness of the cut. Deterioration of the cut surface roughness at the maximum speed is due to limitations in the development of gas-dynamic and hydrodynamic flow that participate in removal of products from the cutting zone of the melt, leading to their partial deposition on treated surface.

Keywords:
the high-precision plasma cutting, accuracy and cutting quality, plasma gas and swirl gas, structural steels.

References

1. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaia obrabotka metallov: Uchebnik dlia studentov uchrezhdenii srednego professional'nogo obrazovaniia* [Flame machining metals: Textbook for students of secondary vocational education]. Moscow, Publishing Center «Academia», 2005. 336 p.

2. Popilov L.Ya. *Elektrofizicheskaia i elektrokhimicheskaia obrabotka materialov: Spravochnik* [Electrophysical and electrochemical processing of materials. Handbook]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 400 p.

3. Grigor'iants A.G., Sokolov A.A. *Lazernaia rezka metallov* [Laser cutting of metals]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1988. 127 p.

4. Afonin Yu.V., Ermolaev G.V., Malov A.N., Malov N.A., Orishich A.M., Shuliat'ev V.B., Pechurin V.A., Filev V.F. [Experimental study of gas-laser cutting of mild steel]. *Trudy 4 Mezhdunarodnoi konferentsii «Lazernye tekhnologii i sredstva ikh realizatsii»* [Proceedings of the 4th International Conference "Laser technology and their means of implementation"]. Saint Petersburg, 2003, pp. 47–54. (In Russian).

5. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki: Uchebnoe posobie dlia vuzov* [Technological processes of laser machining: Textbook for universities]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 664 p.

6. Rakhimianov Kh.M., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimianov A.Kh. Modelirovanie protsessov tonkostruinoi plazmennoi rezki dlia obespecheniia tochnosti formirovaniia krivolineinykh konturov [High-precision

plasma arc cutting modeling for shaping accuracy of cam contours assurance]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of NSTU*, 2009, no. 4 (37), pp. 123–134.

7. 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).

8. Rakhimianov A.Kh. [Theoretical and experimental study of thermal processes in trickle plasma cutting sheet materials]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno – tekhnicheskoi konferentsii "Vysokie, kriticheskie elektro – i nanotekhnologii"* [Proceedings of the All-Russian Scientific - Technical Conference "High critical electro – and nanotechnology"]. Electronic edition. Tula, TSU Publ., 2011. (In Russian).

9. Loktionov A.A., Rakhimianov Kh.M. [Increased efficiency in cutting sheet blank production]. *Trudy 3 mezhdunarodnoi nauchno – prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii"* [Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference "Innovations in Machine Building "], Barnaul, 2012, pp. 158–159. (In Russian).

10. 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, Part 2, pp. 29–30. (In Russian).

11. 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.

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

13. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [eine elektronische Ressource]. Werkstatt Ausrüstung Leitner Josef. Salzweg, 2002. 66 p. Zugriffsmodus: http://wal.dcon.at/cu/wal/pdf/Handbuch_Plasmaschneiden_web.pdf

14. Loktionov A.A., Rakhimianov Kh.M., Zhuravlev A.I. [Depreciation cost elements in the thermal plasma torch cutting sheet material]. *Materialy dokladov II Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno–tekhnicheskoi konferentsii "Zhiznennyi tsikl konstruktsionnykh materialov (ot polucheniia do utilizatsii)". Irkutsk, 25–27 aprelia 2012* [Proceedings of the 2nd All-Russian scientific conference with international participation "The life cycle of construction materials (from receipt to disposal)" (Irkutsk, 25–27 April 2012)]. Irkutsk, 2012, pp. 61015065. (In Russian).

15. Rakhimianov Kh.M., Loktionov A.A. Vliianie iznosa raskhodnykh elementov na tochnost' formoobrazovaniia pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Deterioration of consumable elements influence on accuracy forming at high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiia, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4 (53), pp.14–18.

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 26 Mart 2014
Revised 7 May 2014
Accepted 12 May 2014