

УДК 629.12.011.1.002.22:621.791
<https://doi.org/10.37890/jwt.vi69.217>

Особенности формирования температурных полей при форсированной плазменной резке и их влияние на структуру сталей

А.Н. Винцев¹

ORCID: 0000-0003-2614-8575

Е.Г. Бурмистров²

ORCID: 0000-0003-0385-0847

¹*АО «Судостроительный завод «Вымпел», г. Рыбинск, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта», г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Целью исследований является оценка особенностей формирования температурных полей при плазменной резке и разработка технологических рекомендаций для назначения режимов резки основных групп сталей для формирования качественных кромок реза. В статье выявлены отличительные особенности формирования температурных полей при разделительной плазменной резке. Перечисляются факторы, влияющие на их формирование. Представлены графики распределения температур по толщине разрезаемого листа, изотермы температурных полей для рассматриваемого диапазона температур. Приведены принципы, исходя из которых авторами выполнены соответствующие расчёты и получены математические зависимости. Выполнен анализ уравнения теплового баланса процесса разделительной резки, описаны члены этого уравнения, и принципы ведения статистики по значимым для составления уравнения баланса факторам. Описаны общие подходы для определения ширины зоны термического воздействия при плазменной резке и описания происходящих в этой зоне процессов окисления металла, содержащего различные характерные примеси.

В заключительной части приведены таблицы структур зоны термического влияния и даны технологические рекомендации по плазменной резке конструкционных и инструментальных сталей с рекомендуемыми режимами их термической обработки и рассмотрением некоторых типичных особенностей, характерных для резки некоторых марок сталей.

Ключевые слова: температурное поле, плазменная дуга, зона термического влияния, технологические рекомендации, кромка реза, скорость резки

Features of the formation of temperature fields during forced plasma cutting and their effect on the structure of steels

Anna N. Vintsiv¹

ORCID: 0000-0003-2614-8575

Evgeny G. Burmistrov²

ORCID: 0000-0003-0385-0847

¹*AO Vympel Shipyard, Rybinsk, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The aim of the research is to assess the features of the formation of temperature fields during plasma cutting and to develop technological recommendations for choosing cutting modes for the main groups of steels for the formation of high-quality cut edges. The article reveals the distinctive features of the formation of temperature fields during separation plasma cutting. The factors influencing their formation are listed. The graphs of temperature distribution over the thickness of the cut sheet, isotherms of temperature fields for the

considered temperature range are presented. The principles on the basis of which the authors have performed the corresponding calculations and obtained mathematical dependencies are given. The analysis of the heat balance equation of the separation cutting process is carried out, the terms of this equation are described, as well as the principles of statistics on the factors that are significant for compiling the balance equation. General approaches are described for determining the width of the heat-affected zone during plasma cutting and for describing the oxidation processes of metal containing various characteristic impurities occurring in this zone.

The final part of the article includes tables of the structures of the heat-affected zone and technological recommendations for plasma cutting of structural and tool steels with the recommended modes of their heat treatment and consideration of some typical features characteristic of cutting some steel grades.

Keywords: temperature field, plasma arc, heat-affected zone, technological recommendations, cutting edge, cutting speed.

Введение

Целью исследований является оценка особенностей формирования температурных полей при разделительной плазменной резке и выработка практических технологических рекомендаций, которых следует придерживаться при назначении параметров режимов разделительной резки конструкционных и инструментальных сталей для формирования качественных кромок реза.

Из многих источников, например, из [1], известно, что физический смысл осуществления разделительной плазменной резки состоит в расплавлении обрабатываемого металла пучком низкотемпературной плазмы и последующем вытеснении расплавленного вещества из разреза потоком воздуха. Общее влияние потоков теплоты от горячего факела и теплоты сгорания металла, а также, частично, теплоты от плавящегося шлака, остающегося на кромках после резки, способствуют созданию специфического температурного поля в металле. Шлак и источник теплоты – плазменную дугу – можно рассматривать как поверхностно действующие источники теплоты, так как они ограничивают металл по верхней и нижней плоскостям. При этом теплота, образующаяся при расплавлении металла, распределяется по всей его толщине (со стороны торца по разрезу). Вследствие этого температурное поле в металле по его толщине не будет однородным, а верхняя его кромка будет нагрета значительно выше, чем нижняя. Отчасти этим объясняется имеющая место конусность реза при разделительной плазменной резке сталей толщиной 10 мм и более [2]. Кроме того, до настоящего времени до конца не исследован вопрос потери мощности плазменной дуги. Действительно, из источника [3] известно, что расчётная тепловая мощность сжатой дуги и фактическая мощность плазменной струи, замеряемая в разрезе в момент резки, может отличаться более, чем в 10 раз. Поэтому, данный вопрос весьма актуален в связи с поисками резервов для повышения эффективности плазменной резки сталей больших толщин.

Материалы и методы

Исследования особенностей формирования температурных полей при форсированной плазменной резке ведутся авторами на базе лаборатории «Сварки судовых конструкций» кафедры Проектирования и технологии постройки судов ВГУВТ и в условиях реального корпусозаготовительного производства судостроительного завода «Вымпел» начиная с октября 2019 г. В исследованиях используются стали различных классов (мартенситные, мартенситно-ферритные, ферритные, аустенитно-ферритные и аустенитные), разделённые на 4 группы в зависимости от показателя эквивалентного содержания углерода (табл. 1). Диапазон исследуемых толщин сталей составляет 2...30 мм.

Таблица 1

Группы сталей, участвующие в исследовании, в зависимости от углеродного эквивалента $C_{эк}$

Группа стали	Эквивалентное содержание $C_{эк}$, %
I	Менее 0,54
II	0
III	0,7...0,94
IV	Свыше 0,94

Контролируемыми значениями являются ширина зоны термического воздействия и интенсивность формирования температурного поля по всем направлениям в зависимости от параметров режима резки.

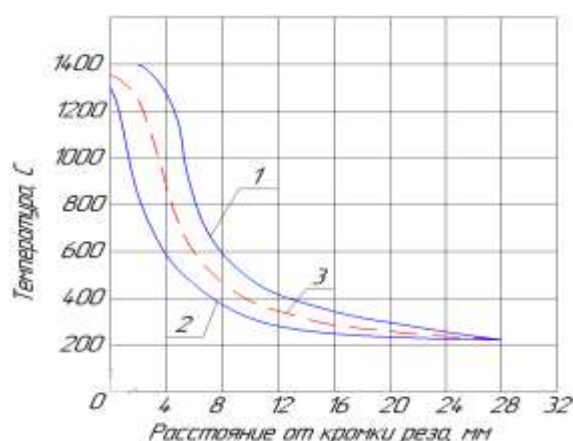


Рис. 1. Распределение максимальных температур в разрезаемом металле:
1 – верхняя кромка, 2 – нижняя кромка, 3 – средняя температура

Fig. 1. Distribution of maximum temperatures in the cut metal:
1 - upper edge, 2 - lower edge, 3 - average temperature

Для определения температуры на различных участках температурного поля по верхней и нижней поверхностям металла применялся инфракрасный пирометр SEM DT-8863 481691 с точечным лазерным прицелом 8-14 мкм, оптическим разрешением 20,1 и временем отклика 0,15 с. Точность измерения температуры $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (50...20 $^{\circ}\text{C}$); $\pm 1^{\circ}\text{C} \pm 1\%$ (20...300 $^{\circ}\text{C}$); $\pm 1,5\%$ (300...800 $^{\circ}\text{C}$). Для определения теоретической температуры по толщине металла использовался расчётный метод. Математическая основа исследования базируется на общепризнанных методах математического анализа. Для обработки результатов исследований применяются известные методы математической статистики.

Результаты

Распределение температур по толщине разрезаемого металла наиболее удобно представить в графическом виде. На рис. 1 представлены графики соответствующих зависимостей, разработанные авторами по данным источников [4] и результатам собственных исследований.

Изотермы для точек на поверхности металла, принятые на разных расстояниях от разрезаемой кромки нанесены на рис. 2, а), а температурное поле разрезаемого металла по слоям изображено на рис. 2, б).

Для плазменной резки основным технологическим параметром является напряжение на дуге, характеризующее мощность режущей струи. Величина напряжения определяет скорость резать. Толщину разрезаемого металла, а также ширину реза.

Из источников [5] известно, что теоретическая мощность, концентрируемая в плазменной дуге, может достигать $10^8 \dots 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$. По результатам исследований, изложенных в работе [5], а также полученных авторами, это, более, чем в 10 раз (!), превышает фактическую мощность плазменной струи, особенно при высоких скоростях резки. Очевидно, что значительная часть мощности, кроме испускаемого светового излучения, инициации химических реакций и металлургических процессов в расплавленном металле, расходуется на нагрев прилегающих слоёв металла. Т.е., на формирование температурных полей, а точнее – квазистационарного температурного поля от мощного быстродвижущегося источника теплоты.

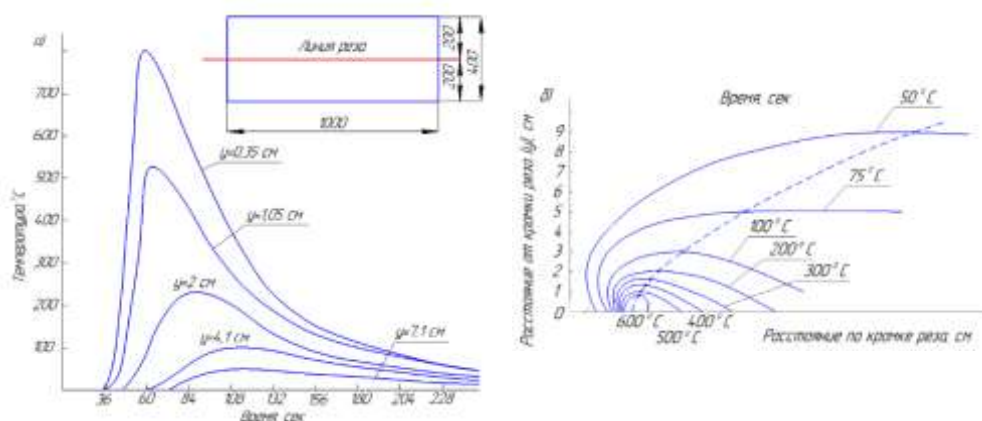


Рис. 2. Тепловое воздействие плазменной резки на металл:

- а) – изотермы в различных точках поверхности на различном расстоянии от кромки реза [5];
- б) – температурное поле посередине разрезаемого металла (условия резки те же, что и для Рис.1. Пунктирной линией показана изотерма максимальных температур

Fig.2. Thermal effects of plasma cutting on metal:

- a) - isotherms at different points of the surface at different distances from the cut edge [5];
- b) - temperature field in the middle of the cut metal (cutting conditions are the same as for Fig. 1. The dotted line shows the isotherm of maximum temperatures

Для понимания процессов, происходящих при резке, рассмотрим схему, представленную на рис. 3 [4], где условно изображено взаимодействие плазменной струи с разрезаемым металлом.

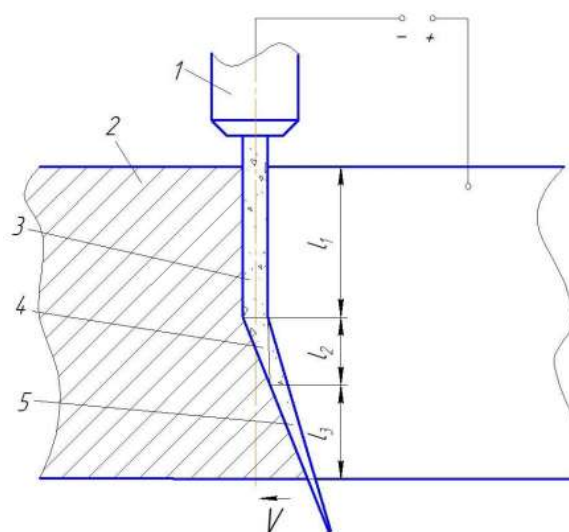


Рис. 3. Схема плазменно-дуговой резки:
 1 – плазмотрон; 2 – обрабатываемый металл; 3 – столб дугового разряда; 4 – анодное пятно; факел дуги; l_1 – протяжённость столба дуги; l_2 – протяжённость анодного пятна; l_3 – протяжённость факела; V – направление резки

Fig.3. Scheme of plasma-arc cutting:
 1 - plasmatron; 2 - processed metal; 3 - arc discharge column; 4 - anode spot; arc torch; l_1 - the length of the arc column; l_2 is the length of the anode spot; l_3 - torch length; V - cutting direction

Из схемы следует, что формирование струи при выходе из сопла происходит с выраженным наличием трёх участков: столб (l_1), анодное пятно (l_2), факел (l_3). При этом, наибольшая тепловая эффективность наблюдается в столбе. Именно она и определяет форму «конусности» пламени при прохождении по каналу реза. По режимам процесса и по его параметрам можно рассчитать ширину и форму реза, а также геометрию столба пламени, определяемую этими параметрами.

Дальнейшие рассуждения построены на известных фактах [6] – управлять режимами резки можно за счёт силы тока, напряжения, скорости резки, а также за счёт изменения параметров плазмообразующих газов. Можно утверждать, что поток струи плазмы зависит от геометрии и размера сопла, используемого на плазмотроне. Поэтому, параллельности кромок при резке можно добиться, приблизив режимы резки к оптимальным. Однако, это работает лишь при относительно небольших (до 6 мм) толщинах металла. То есть, толщинах, фактически перерезаемых только столбом дуги, в то время как физически процесс плазменной резки характеризуется наличием трёх участков (см. рис. 3) с различной выделяемой тепловой мощностью. По этой причине при резке металла с толщиной более 6 мм в полученном резе может присутствовать значительная конусность. Это является одной из характерных отличительных особенностей плазменной резки в сравнении с кислородной. Она же в настоящее время ограничивает плазменную резку толщинами не более 30 мм (для сталей).

Скорость – ещё один важный, с точки зрения рассматриваемого вопроса, технологический параметр дуговой резки вообще и плазменной в частности. Известно (см. источники [7]), что она во многом зависит от энергетических параметров, а также от толщины разрезаемого металла и его теплофизических свойств. С учётом выводов работы [3] выражение для расчёта скорости плазменной резки в зависимости от заявленных свойств и параметров можно представить в следующем виде:

$$V = \frac{0,24IU\eta - q}{\rho t \delta \Delta S}, \quad (1)$$

где V – скорость резки, м/час; I – сила тока дуги, А; U – напряжение на дуге, В; η – эффективный КПД дуги; q – интенсивность теплоотдачи в металл, Вт; ρ – плотность металла; t – ширина реза, мм; δ – толщина разрезаемого металла, мм; ΔS – приращение удельной энтальпии металла, Дж/кг.

Скорость плазменной резки при прочих равных условиях, главным образом, является функцией от напряжения и силы тока. При этом глубина реза определяется напряжением дуги, а ширина реза, в основном, зависит от величины тока. Однако, по мнению авторов, при рассмотрении вопросов скоростной (форсированной) плазменной резки в обязательно порядке необходимо рассматривать скорость резки и как функцию от теплофизических свойств металла, поскольку она (скорость) напрямую зависит от массовой плотности, теплоёмкости и теплопроводности металла. В любом случае должно соблюдаться условие полного прорезания металла по всей заданной толщине. В свою очередь выполнение этого условия зависит от выполнения неравенства

$$0,24IU\eta > q. \quad (2)$$

Кроме того, для форсированной плазменной резки необходимо рассматривать также динамические процессы, развивающиеся непосредственно в самой зоне реза и при удалении расплавленного металла из этой области, так как качество реза, а, соответственно, и кромок вырезаемых деталей, в значительной мере определяют именно эти процессы. В частности, практическим путём авторами установлено, что по направлению истечения побочных продуктов резки (расплавленного металла и шлаков) из разреза можно определить, насколько верно задана скорость резки. В качестве критерия оптимальности скорости авторами принимался угол наклона характерных бороздок на кромках реза $5...10^\circ$ в сторону, противоположную направлению резки.

На скорость удаления из реза побочных продуктов (а, соответственно, и на скорость плазменной резки) большое влияние оказывает ширина реза. Расширению реза способствует уменьшение скорости резки. Однако, это приводит и к повышенному скоплению легкоудаляемого шлака на нижней кромке реза. Если скорость окажется ниже оптимальной, то на нижней кромке реза будет образовываться трудноудаляемый шлак, а расплавленный металл будет выбрасываться из реза вверх, в сторону сопла плазмотрона.

В целом воздействие высоких температур на металл при форсированной плазменной резке можно сравнить с однопроходной дуговой автоматической сваркой листов средних толщин. Схожесть обоих процессов состоит в очень быстром нагреве металла при высоких температурах с последующей высокой же скоростью охлаждения при снижении температуры. Однако, если для скоростной сварки теоретические зависимости для расчётных точек изотерм температурных полей получены и обоснованы ещё Н.Н. Рыкалиным [9], то для скоростной плазменной резки таких обоснований до настоящего времени не существует. По аналогии со скоростной сваркой можно лишь допустить, что

$$T_{(x,y,t)} = T_{c(x,y,t)} + T_{p(x,y,t)} \quad (3)$$

ГДЕ $T_{(x,y,t)}$ – результат наложения двух температур для уже установившегося процесса (можно охарактеризовать как квазистационарное состояние в месте воздействия плазменной струи на разрезаемый металл при рассмотрении её в подвижной системе координат);

$T_{c(x,y,t)}$ – температура металла при резке в точке с координатами x и y в момент времени t , когда плазмотрон проходит рассматриваемое сечение;

$T_{p(x,y,t)}$ – температура в тот же момент времени, но от действия подогревающего поверхностного источника теплоты и остывающего шлака на нижней кромке металла.

Для упрощения решения задачи сосредоточенный источник теплоты – плазменную струю – можно считать линейным, а выделяемую им теплоту распределяющейся равномерно по всей толщине металла. Полная мощность источника при этом будет включать мощность, идущую на расплавление металла и мощность, необходимую для образования шлака. Для более точного расчёта мощности источника теплоты потребуются учёт расхода плазмообразующего газа и коэффициента сосредоточенности плазменной струи.

Если придерживаться этой схемы расчёта для средних толщин, то расчётное температурное поле будет незначительно отличаться от полученного авторами в ходе экспериментов (для температур близких к 800 °С погрешность составит 15%, для более низких температур – ещё меньше).

Из источников [8] известно, что при скоростной сварке сталей из-за комплексного влияния теплоты дуги и теплоты, выделяющейся при расплавлении металла в сварочной ванне, по её переднему фронту устанавливается температура, превышающая температуру плавления стали на 200...500 °С. Очевидно, что схожие процессы имеют место и при форсированной плазменной резке. Из уравнения (1) предположим, что при разделительной резке сталей толщиной более 5 мм, составляющие теплового баланса могут существенно изменяться в зависимости от толщины металла. В расчёте энергетических параметров за искомую величину удобно принимать поступающую в термодинамическую систему тепловую энергию. При снижении доли теплоты от плазменной струи (источника теплоты) с 75 до 11%, теплота от расплавленного в резе металла будет возрастать. В первом приближении можно принять, что при этом вся суммарная теплота, образовавшаяся при расплавлении металла, окислении содержащихся в нём примесей, тепловом излучении и т.п. не будет превышать 5% от общей тепловой мощности плазменной струи. В максимальном же расчётном случае можно учесть, что 50% теплоты расходуется на нагрев металла, другие 50% идут на образование газов, нагрев шлаков, тепловое излучение и т.п.

Слои металла, находящиеся в непосредственной близости от реза и нагревающиеся от плазменной струи, образуют зону термического влияния (ЗТВ). При этом в поверхностных слоях металла, расположенных ближе к плазмотрону, нагрев выражен значительно сильнее. Наименьшая ширина ЗТВ характерна для средней части толщины металла, где имеет место минимум температурных значений. К нижней кромке ЗТВ несколько расширяется за счёт вытеснения в эту область давлением газов расплавляемого металла и шлаков. За счёт более интенсивного теплообмена с окружающей средой скорость охлаждения поверхностных слоёв значительно выше, чем нижерасположенных. Авторами экспериментально установлено [10], что при резке сталей толщиной 10...30 мм скорость охлаждения поверхностных слоёв составляет от 1273 до 2273 К/с в зависимости от типа стали. Такое быстрое охлаждение способствует образованию по кромкам реза закалочных структур даже при достаточном содержании в металле легирующих элементов. Фактически же на кромках листа после термической резки химический состав, как правило, не соответствует исходному. Отличия зависят от количества и качества, содержащихся в стали, примесей. Так, Mn, Si, Cr, имеющие большее сродство к кислороду, чем железо, при резке выходят быстрее. Поэтому процентное содержание этих элементов в окалённой кромке значительно ниже исходного. Другие элементы (Cu, Mo, Ni) окисляются значительно меньше, так как из-за строения кристаллической решётки менее сходны с кислородом. По истечении некоторого времени после начала резки содержание этих веществ в слоях металла, прилегающих к кромке реза может

резко возрасти. Результаты спектральных анализов [11] однозначно это подтверждают.

Поведение углерода на кромке реза поддается некоторой закономерности. Так, если резать холодный металл, углерод практически не выходит из металла и его процентное содержание значительно выше, чем при резке подогретого листа стали.

Известно [12], что в кромке металла независимо от продолжительности действия плазменной струи образуются три специфических области:

1) область расплавленного металла с изменённой кристаллической решёткой, температура нагрева у которого была ниже температуры плавления стали (зона А);

2) область плавления, в которой температура превышала температуру рекристаллизации стали (зона Б);

3) область промежуточной кристаллизации – ширина области с изменённой кристаллической решёткой при обработке металла средних толщин (обычно составляет 0,2 мм для углеродистых и низколегированных сталей).

Приведём таблицу с характерными структурами, образующимися по кромкам деталей, вырезанных плазменной резкой на форсированных режимах.

Таблица 2

Характерные структуры сталей, образующиеся по кромкам после термической резки

Типы сталей	Зона А	Зона Б
Низкоуглеродистая сталь толщиной 20 мм	Сорбит с отдельными участками мартенсита	Ферритно-перлитная структура с видманштеттовой ориентацией
Низкоуглеродистая сталь толщиной 60 мм	Участки с ледебуритом	
Низколегированные стали	Ледебурит, троостомартенсит	-
Средне- и высокоуглеродистые, среднелегированные стали	Области ледебуритной эвтектики	Мартенсит с цементитными иглами, видманштеттовой ориентацией и крупнозернистой троостомартенситной структурой с ферритной сеткой по границам зёрен

Перестройка кристаллической решётки, связанная со структурными переходами в металле в зонах А и Б влияет на поверхностную твёрдость разрезаемого металла. Кромка реза из-за образования закалочных структур становится более твёрдой. Это может привести к потере технологической прочности металла, и образованию в нём трещин в процессе дальнейшей обработки. Очевидно, что это обусловлено внутренними напряжениями и низкой пластичностью металла на кромках вследствие значительного воздействия теплоты плазменной струи.

Очевидно также, что образующаяся по кромкам сложная структура требует более пристального изучения, что не представляется возможным в рамках данного исследования. Здесь ограничимся тем, что приведём некоторые, выработанные многолетней практикой, технологические рекомендации, способствующие «выравниванию» структуры кромок за счёт исключения их избыточного газонасыщения в процессе разделительной плазменной резки конструкционных и инструментальных (табл. 3) и высоколегированных сталей (табл. 4). Как правило, все они (кроме конструкционных сталей I-й группы) сводятся к предварительному либо сопутствующему подогреву металла по линии реза до определённых температур. При этом используется эффект сглаживания кривой структурных превращений при снижении скорости охлаждения металла.

Таблица 3

Технологические рекомендации для разделительной плазменной резки конструкционных и инструментальных сталей

Группа стали	Эквивалентное содержание $C_{экв}$, %	Рекомендации по резке
I	Менее 0,54	Резка возможна без технологических ограничений. При вырезке деталей сложной конфигурации в зимнее время необходим подогрев до температуры 423 К
II	0	Резка возможна при предварительном или сопутствующем подогреве металла до температуры 423...523 К. Охлаждение на спокойном воздухе
III	0,7...0,94	Резка должна выполняться на предварительно нагретом до температуры 523...623 К металле с последующим медленным охлаждением
IV	Свыше 0,94	Резку следует выполнять при подогреве изделия до температуры не ниже 623 К с последующим медленным охлаждением в печи

Таблица 4

Технологические рекомендации для разделительной плазменной резки высоколегированных сталей

Группа стали	Класс стали	Режим термической обработки	
		До резки	После резки
I	Мартенситные (5...15% Cr, 0,2...0,5% C)	Подогрев до температуры 523...623 К	Отпуск или отжиг при температуре 923...1223 К
II	Мартенситно-ферритные (12...18% Cr, 0,15% C)	Без подогрева. При резке сталей или изделий средней толщины сложной конфигурации подогрев до температуры 523...623 К	Отпуск или отжиг при температуре 923...1223 К
III	Ферритные (16...30% Cr, 0,35% C)	Без подогрева	Нагрев до температуры 1023...1123 К и быстрое охлаждение в воде
IV	Аустенитно-ферритные (хромоникелевые с титаном или ниобием)	То же	Термообработка не требуется
V	Аустенитные (хромоникелевые стали, сплавы)	-	Нагрев до температуры 1323...1423 К с быстрым охлаждением в воде

Однако, предварительный и сопутствующий подогрев не всегда технически осуществим. Кроме того, часто он не предусмотрен принятым на конкретном предприятии технологическим процессом, а, следовательно, и принятыми нормами времени на резку. Поэтому часто, во избежание появления закалочных структур и

охрупчивания металла по кромкам, просто уменьшают (относительно оптимальной) скорость резки, что, однако, приводит к снижению производительности процесса. Использование при резке флюсов также не всегда является альтернативой подогреву, так как, например, при холодной резке высоколегированных и хромоникелевых сталей со специфическим составом (примером может служить сталь X12) на поверхности кромок образуются трещины, размером до 2 мм. Этому способствует исходная ферритная структура, обусловленная высоким содержанием Сг, которая при нагревании превращается в хрупкую крупнозернистую. В то же время, последующая термообработка таких сталей приводит к измельчению структуры и снижению их хрупкости. В ряде случаев эффективным может оказаться так же воздушное или водяное охлаждение зоны реза.

Обсуждение

Проводимое исследование представляется актуальным в связи с поисками путей увеличения толщин сталей для скоростной плазменной резки, то есть, для повышения её эффективности. Полученные авторами результаты теоретических и экспериментальных исследований следует рассматривать как промежуточные. Однако и они позволили выявить отличительные особенности формирования температурных полей при разделительной плазменной резке и факторы, влияющие на их формирование. Изотермы температурных полей для диапазона температур ниже 800 °С, в том числе изотерма максимальных температур, представлены на соответствующих графиках.

В ходе исследования установлено, что скорость плазменной резки, кроме известных зависимостей от электрических параметров плазменной струи, необходимо рассматривать как функцию от теплофизических свойств металла: массовой плотности, теплоёмкости и теплопроводности металла. Это особенно важно для форсированной плазменной резки сталей толщиной более 20 мм в связи с имеющей место проблемой «конусности» реза». Кроме того, в статье поднят вопрос о более, чем в 10-кратных потерях мощности плазменной струи при высоких скоростях резки. Данный вопрос требует отдельного изучения, однако ясно, что большая часть потерь обусловлена формированием сопутствующего резке квазистационарного температурного поля. Для моделирования этого процесса в дальнейшем в качестве расчётной может быть принята схема формирования температурного поля от мощного линейного быстродвижущегося источника теплоты.

Воздействие высоких температур на металл при форсированной плазменной резке и, соответственно, влияние на формирование температурного поля, предложено рассматривать как результат наложения двух температур для квазистационарного состояния в точке воздействия плазменной струи на разрезаемый металл: 1) температуры в точке с координатами x и y в момент времени t , при прохождении плазмотроном рассматриваемого сечения; 2) температуры в тот же момент времени от подогревающего поверхностного источника теплоты и остывающего шлака на нижней кромке металла. Во всяком случае в ходе проведённых авторами экспериментов подтверждено, что для резки сталей средних толщин расчётное температурное поле незначительно отличается от фактического (для температур ≈ 800 °С погрешность 15%, для более низких температур – <15%).

Кроме отмеченного, авторами экспериментально доказано, что при плазменной резке сталей толщиной 10...30 мм скорость охлаждения поверхностных слоёв составляет более 1273 К/с, что способствует образованию по кромкам реза закалочных структур даже при достаточно большом содержании в стали легирующих элементов. В связи с этим в статье приведены некоторые технологические рекомендации для разделительной плазменной резки основных групп конструкционных и инструментальных сталей, а также некоторых высоколегированных сталей.

Заключение

В статье изложены результаты промежуточных исследований по выявлению особенностей формирования температурных полей при форсированной термической резке. Данный вопрос представляется весьма важным в связи с поисками путей повышения эффективности скоростной плазменной резки сталей больших толщин. В результате выполненного исследования:

1) выявлены отличительные особенности формирования температурных полей при разделительной плазменной резке. Определены факторы, влияющие на их формирование;

2) получены графики распределения температур по толщине разрезаемого листа и изотермы температурных полей для рассмотренного в исследовании диапазона температур (до 800 °С), представляющего интерес с точки зрения формирования структуры металла по кромкам вблизи реза;

3) выполнен анализ уравнения теплового баланса процесса разделительной резки с описанием значимых с точки зрения его составления факторов;

4) изложены общие подходы к рассмотрению процессов, происходящих в зоне термического влияния при плазменной резке сталей, в том числе содержащих различные характерные примеси, приведены их структуры;

5) сформулированы вопросы для дальнейшего изучения: а) влияния ширины реза на скорость и полноту удаляемых побочных продуктов резки и уменьшения «конусности» реза, б) снижения потерь мощности плазменной струи на форсированных режимах резки;

6) даны некоторые технологические рекомендации по плазменной резке основных групп конструкционных и инструментальных сталей и некоторых высоколегированных сталей с рекомендуемыми режимами их термической обработки.

Список литературы

1. Влияние резки на состав и структуру металла [Электронный ресурс] . – Режим доступа : https://metallcheckportal.ru/articles/svarka/gazovaa_rezka/vlianie_rezki_na_sostav_i_strukturu_metalla, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 01.09.2021 г.).
2. Температурное поле при кислородной резке [Электронный ресурс] . – Режим доступа : https://metallcheckportal.ru/articles/svarka/gazovaa_rezka/temperaturnoe_pole_pri_kislorodnoi_rezke, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.09.2021 г.).
3. Основы лазерной и газоплазменной обработки конструкционных сталей: монография/[Сергеев Н.Н. и др.]; Под ред. профессора Н.Н. Сергеева – Москва; Вологда: Инфра-инженерия, 2020. – 284 с.
4. Бурмистров Е. Г. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте : учебн. для ВУЗов. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 535 с. ISBN 978-5-8114-5234-7.
5. Температурное поле. Влияние процесса резки на химический состав, структуру и свойства поверхности кромок металла [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://hssco.ru/temperaturnoe-pole-vliyanie-processa-rezki-na-ximicheskij-sostav-strukturu-i-svoystva-metalla-poverxnosti-kromok/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.10.2021 г.).
6. Совершенствование технологического оборудования для термической резки заготовок в условиях серийного производства [Электронный ресурс] . – Режим доступа : https://studentlib.com/diplom-232953-sovershenstvovanie_tehnologicheskogo_oborudovaniya_dlya_termicheskoy_rezki_zagotovok_v_usloviyah_seriyного_proizvodstva.html, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.09.2021 г.).
7. Газорезчик. Влияние процесса резки на металл поверхности реза [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <https://tepka.ru/gazorezchik/7.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.09.2021 г.).
8. Сварочное пламя, его строение и характеристики [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <https://extxe.com/9923/svarochnoe-plamja-ego-stroenie-i-harakteristiki/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.09.2021 г.).

9. Температурное поле при кислородной резке [Электронный ресурс] . – Режим доступа : https://metallichekiy-portal.ru/articles/svarka/gazovaa_rezka/temperaturnoe_pole_pri_kislorodnoi_rezke, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.09.2021 г.).
10. Plasma-arc-cutting / <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/plasma-arc-cutting> , свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.10.2021 г.).
11. Dross formation and heat transfer during plasma arc cutting / https://www.researchgate.net/publication/252898779_Dross_formation_and_heat_transfer_during_plasma_arc_cutting, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.10.2021 г.).
12. J. P. Trelles, C. Chazelas, A. Vardelle and J. V. R. Heberlein Arc Plasma Torch Modeling : monograph, 53 p. / <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1301/1301.0650.pdf>.
13. Masaya Shigeta. Modeling and simulation of a turbulent-like thermal plasma jet for nanopowder production / IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, IEEJ Trans 2019; 14: 16–28, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI:10.1002/tee.22761. p.16-27. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/tee.22761>.
14. Sagar S. Pawar, Dr. K. H. Inamdar FACTORS AFFECTING QUALITY OF PLASMA ARC CUTTING PROCESS: A REVIEW. International Journal of Technolugu in Engineering and Escience, Vol. №4, Issue №12, December 2016. p. 177-183. http://www.ijates.com/images/short_pdf/1480951831_1408.pdf.
15. Robert L. Merlino. Dusty plasmas and applications in space and industry. Transworld Research Network 37/661 (2), Fort P.O., Trivandrum-695 023, Kerala, India. p. 73-110. http://homepage.physics.uiowa.edu/~rmerlino/Grabbe_Merlino-Ch_52.pdf.
16. Isidoro Martinez. Thermal effects on materials. P. 44. <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/ot1/Thermal%20effects%20on%20materials.pdf>.
17. Plasma Module User’s Guide. P. 374. <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.plasma/PlasmaModuleUsersGuide.pdf>.
18. Javier Aldazabal, Antonio Martín-Meizoso, Andrzej Klimpel, Adam Bannister and Sergio Cicero. Mechanical and Microstructural Features of Plasma Cut Edges in a 15 mm Thick S460M Steel Plate. P. 13. <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/6/447/pdf>.

References

1. The influence of cutting on the composition and structure of metal [Electronic resource]. - Access mode: https://metallichekiyportal.ru/articles/svarka/gazovaa_rezka/vlianie_rezki_na_sostav_i_strukturu_metalla, free. - Title from the screen (date of circulation 09/01/2021).
2. Temperature field in oxygen cutting [Electronic resource]. - Access mode: https://metallichekiyportal.ru/articles/svarka/gazovaa_rezka/temperaturnoe_pole_pri_kislorodoi_rezke, free. - Title from the screen (date of treatment 09/05/2021).
3. Fundamentals of laser and gas-plasma processing of structural steels: monograph / [Sergeev N.N. and etc.]; Ed. Professor N.N. Sergeeva. Moscow; Vologda: Infra-engineering, 2020.- 284 p.
4. Burmistrov E.G. Fundamentals of welding and gas thermal processes in shipbuilding and ship repair: textbook. for universities. - St. Petersburg: Lan, 2020 .- 535 p. ISBN 978-5-8114-5234-7.
5. Temperature field. The influence of the cutting process ha chemical composition, structure and properties of the surface of the edges of the metal [Electronic resource]. - Access mode: <http://hssco.ru/temperaturnoe-pole-vliyanie-processa-rezki-na-ximicheskij-sostav-strukturu-i-svoystva-metalla-poverxnosti-kromok/>, free. - Title from the screen (date of circulation 10/05/2021).
6. Improvement of technological equipment for thermal cutting of blanks in the conditions of serial production [Electronic resource]. - Access mode: https://studentlib.com/diplom-232953-sovershenstvovanie_tehnologicheskogo_oborudovaniya_dlya_termicheskoy_rezki_zagotovok_v_usloviyah_seriynogo_proizvodstva.html, free. - Title from the screen (date of treatment 09/05/2021).
7. Gas cutter. The influence of the cutting process on the metal of the cutting surface [Electronic resource]. - Access mode: <https://tepka.ru/gazorezchik/7.html>, free. - Title from the screen (date of treatment 09/05/2021).
8. Welding flame, its structure and characteristics [Electronic resource]. - Access mode: <https://extxe.com/9923/svarochnoe-plamja-ego-stroenie-i-harakteristiki/>, free. - Title from the screen (date of treatment 09/05/2021).
9. Temperature field in oxygen cutting [Electronic resource]. - Access mode: https://metallichekiy-portal.ru/articles/svarka/gazovaa_rezka/temperaturnoe_pole_pri_kislorodnoi_rezke, free. - Title from the screen (date of treatment 09/05/2021).

10. Plasma-arc-cutting / <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/plasma-arc-cutting>, free. - Title from the screen (date of circulation 10/15/2021).
11. Dross formation and heat transfer during plasma arc cutting / https://www.researchgate.net/publication/252898779_Dross_formation_and_heat_transfer_during_plasma_arc_cutting, free. - Title from the screen (date of circulation 10/15/2021).
12. J. P. Trelles, C. Chazelas, A. Vardelle and J. V. R. Heberlein Arc Plasma Torch Modeling: monograph, 53 p. / <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1301/1301.0650.pdf>.
13. Masaya Shigeta. Modeling and simulation of a turbulent-like plasma thermal jet for nanopowder production / IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, IEEJ Trans 2019; 14: 16–28, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). Doi: 10.1002 / tee.22761. p.16-27. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/tee.22761>.
14. Sagar S. Pawar, Dr. K. H. Inamdar FACTORS AFFECTING QUALITY OF PLASMA ARC CUTTING PROCESS: A REVIEW. International Journal of Technology in Engineering and Escience, Vol. # 4, Issue # 12, December 2016. p. 177-183. http://www.ijates.com/images/short_pdf/1480951831_1408.pdf.
15. Robert L. Merlino. Dusty plasmas and applications in space and industry. Transworld Research Network 37/661 (2), Fort P.O., Trivandrum-695 023, Kerala, India. p. 73-110. http://homepage.physics.uiowa.edu/~rmerlino/Grabbe_Merlino-Ch_52.pdf.
16. Isidoro Martinez. Thermal effects on materials. P. 44. <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/ot1/Thermal%20effects%20on%20materials.pdf>.
17. Plasma Module User's Guide. P. 374. <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.plasma/PlasmaModuleUsersGuide.pdf>.
18. Javier Aldazabal, Antonio Martín-Meizoso, Andrzej Klimpel, Adam Bannister and Sergio Cicero. Mechanical and Microstructural Features of Plasma Cut Edges in a 15 mm Thick S460M Steel Plate. P. 13. <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/6/447/pdf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Винцив Анна Николаевна, инженер-технолог, АО «Судостроительный завод «Вымпел», 152912, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Новая, 4, e-mail: a.n.vintsiv@vympele-rybinsk.ru

Anna N. Vintsiv, Process Engineer, JSC «Vympel Shipbuilding Plant», 152912, Russia, Yaroslavl region, Rybinsk, Novaya str., 4, e-mail: a.n.vintsiv@vympele-rybinsk.ru.

Бурмистров Евгений Геннадьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Evgeny G. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport (VSUVT), 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.11.2021; опубликована онлайн 20.12.2021.
Received 16.11.2021; published online 20.12.2021.