

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-23-31

УДК 621.791.947.55, 621.9.01

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

OPTIMIZATION OF THE HIGH-PRECISION PLASMA CUTTING MODE FOR SHEET MATERIALS BASED ON DIMENSIONLESS PROCESS PARAMETERS

Рахимьянов Харис Магсуманович, докт. техн. наук, профессор,
e-mail: x.rakhimyanov@corp.nstu.ru,

Kh.M Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor,

Гаар Надежда Петровна, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: gaar@corp.nstu.ru

N.P. Gaar, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,

Локтионов Александр Анатольевич, старший препод.,
e-mail: loktionov@corp.nstu.ru

A.A. Loktionov, M.Sc. (Engineering), Senior Lecturer,

Новосибирский государственный технический университет 630073, Россия,
г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marks, Novosibirsk, 630073,
Russian Federation.

Аннотация: Тонкоструйная плазменная резка является одним из методов раскроя листового материала в заготовительном производстве. Оптимизация режимов раскроя направленная на минимизацию отклонения кромок реза от перпендикулярности позволит исключить последующую механическую обработку деталей под сварку. Однако, многофакторность процессов, определяющих положение кромок реза не позволяет воспользоваться для решения данной проблемы как методами математического моделирования процессов, так и путем экспериментального подхода. Целью данной работы является определение возможности использования безразмерных комплексов и теории подобия для выявления энергетических параметров процесса тонкоструйной плазменной резки для минимизации отклонения от перпендикулярности кромок реза. Предложено использовать в качестве безразмерных параметров процесса тонкоструйной плазменной резки, определяющих перпендикулярность кромок реза, безразмерную мощность и число Пекле. Экспериментально установлено, что минимальное значение отклонения от перпендикулярности реза достигается в узком диапазоне значений числа Пекле (от 1,4 до 1,9). Экспериментальные исследования проводились на конструкционной стали марки Ст3 толщиной от 4 до 20 мм на машине термической резки «Термит ППл» при использовании технологии тонкоструйной плазменной резки HiFocus^{plus}.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, перпендикулярность реза, безразмерная мощность, число Пекле.

Abstract: High-precision plasma cutting is one of the methods of sheet material cutting. Optimization of cutting mode aimed at minimizing the deviation of the cut squareness allows us to exclude the subsequent mechanical processing of parts for welding. However, the multi-factorial nature of the processes that determine the position of the edges of the cut does not allow us to use methods of mathematical modeling of processes, as well as an experimental approach, to solve this problem. The purpose of this work is to determine the possibility of using dimensionless complexes and similarity theory to identify the energy parameters of the process of high-precision plasma cutting to minimize the deviation from cut squareness. It is proposed to use the dimensionless power and the Peclet number as dimensionless parameters of the high-precision plasma cutting process, determining the cut squareness. It is established experimentally that the minimum value of the deviation of cut squareness is achieved in a narrow range of Peclet number values (from 1.4 to 1.9). Experimental studies were carried out on structural steel (St3) with a thickness of 4 to 20 mm on a thermal cutting machine "Termit PPI" using HiFocus^{plus}.

technology of high-precision plasma cutting.

Key words: *High-precision plasma cutting, squareness of cut, dimensionless power, Peclet number.*

Введение

Термические методы раскроя, к которым относится тонкоструйная плазменная резка, являются наиболее востребованными в получении заготовки из листового материала в заготовительном производстве. Большинство заготовок в дальнейшем используется для создания сварных соединений. Традиционно перед сваркой после термического раскроя материала назначается механическая обработка заготовок из-за необходимости как удаления зоны термического влияния (ЗТВ), так и повышения точности кромок реза. Исключение последующей механической обработки заготовок под сварку способствовало бы снижению трудоёмкости изготовления изделия в целом и повысило бы эффективность заготовительного производства.

Существует ряд работ [1-4], указывающих на возможность использования под сварку деталей, полученных при помощи тонкоструйной плазменной резки, без удаления зон термического влияния (ЗТВ) без потери качества самого сварного шва. Однако, остается открытым вопрос о точности обработки при тонкоструйной плазменной резке.

Точность обработки при тонкоструйной плазменной резке определяется как точностью выполнения линейных размеров детали, которая обеспечивается точностью позиционирования (системой ЧПУ), так и точностью обеспечения взаимного расположения поверхностей детали, которая определяется перпендикулярностью реза. Соблюдение точности взаимного расположения поверхностей является необходимым при изготовлении деталей под сварку, так как кромки реза в данном случае являются основными конструкторскими базами, определяющими положение детали в изделии.

В технологическом обеспечении, которым производитель оборудования сопровождает поставляемое оборудование, режимы обработки имеют рекомендательный характер, а показатели достигаемой точности ограничиваются достаточно широким диапазоном значений. Это подтверждают исследования, представленные в работах авторов [5-7].

Существуют попытки математического моделирования процесса [8-11], основанные на описании физических процессов в материале в условиях высокоскоростного нагрева, дающие достаточно объективную картину тепловых полей в зоне обработки, но это не позволяет установить количественные взаимосвязи режимов обработки с показателями точности реза. На данный момент не существует надёжных методов прогнозирования точности резки и выбора оптимальных режимных

параметров (мощности, скорости резки) при различной толщине разрезаемых листов. Связано это, прежде всего, с многообразием и сложным взаимодействием протекающих при тонкоструйной плазменной резке физических процессов. Главными из них являются: распространение и поглощение плазменного излучения в канале реза, распространение тепла в материале и образование расплава, течение газа в канале реза, выделение энергии в результате экзотермической реакции и образование окислов металла при использовании кислорода в качестве режущего и/или за-вихряющего газа, движение пленки расплава под действием потока газа. Эти процессы в свою очередь зависят от вида обрабатываемого материала (теплофизических свойств, его толщины), технологических режимов (тока, скорости резки, состава газов, их давления и расходов). Совокупность этих факторов и определяют точность и качество реза при тонкоструйной плазменной резке.

Постановка задачи и описание экспериментальных исследований

Для успешного решения подобных задач с большим количеством переменных успешно используется анализ физических систем при помощи методов подобия. Данный подход предполагает представление больших объемов данных в виде зависимостей между обобщенными безразмерными параметрами (комплексами) [12]. Это позволяет уменьшить количество независимых переменных и продвинуться в понимании физической сущности процессов, происходящих в исследуемой системе.

Описанный подход к исследованию физических процессов формообразования качественного реза был использован авторами работ [13-17] при исследовании механизмов формообразования реза при лазерном раскрое материалов. На основе установления оптимальных значений безразмерных параметров авторами предложены простые соотношения для определения мощности излучения и скорости резки, при которых поверхность реза имеет минимальную шероховатость [18].

Правомерность использования данного подхода по отношению к тонкоструйной плазменной резке объясняется тем, что данные процессы родственны и основаны на одних механизмах теплопередачи энергии от источника к обрабатываемому материалу. Кроме того, дополнительное сжатие плазменной дуги, реализованное в технологиях тонкоструйной плазменной резки, обеспечивает разделение материала, как и в случае лазерной резки в условиях высококонцентрированного теплового воздействия. Согласно теореме Кирпичева-Гухмана [12] для обоих процессов возможно ис-

пользовать одни и те же критерии подобия.

В общем случае перпендикулярность (α) кромок реза может быть представлена функцией следующих параметров:

$$\alpha = \Phi(W_{\text{общ}}, V, S, t, C_m, \lambda_m, \rho_m, T_m, L_m), \quad (1)$$

где $W_{\text{общ}}$ – мощность плазменного столба [Вт], V – скорость резки [м/мин], S – толщина материала [мм], t – ширина реза [мм], C_m – теплоемкость [Дж/(кг·К)], λ_m – теплопроводность [Вт/(м·К)], ρ_m – плотность [кг/м³], T_m – температура материала [К], L_m – теплота плавления разрезаемого материала [Дж/кг].

При рассмотрении процессов формообразования при лазерной резке, характеризующихся также большим количеством переменных факторов, как и при тонкоструйной плазменной резке, были использованы безразмерные обобщенные переменные – безразмерная мощность Q и число Пекле [13–17]. Число Пекле используется при описании процессов нагрева материала движущимся тепловым источником. Его использование говорит о том, что для достижения качественного реза необходимо выполнение определенных энергетических условий.

С учетом вышеизложенного функцию (1), определяющую перпендикулярность кромок реза можно представить в следующем виде:

$$\alpha = \Phi(Re, Q), \quad (2)$$

где Q – безразмерная мощность (отношение общей мощности к потерям энергии в единицу времени за счет теплопроводности, $Q = W_{\text{общ}}/(\lambda_m \cdot S \cdot T_m)$, где $W_{\text{общ}}$ – общая мощность плазменного столба [Вт], S – толщина материала [мм], λ_m , T_m – соответственно, теплопроводность [Вт/(м·К)] и температура плавления разрезаемого материала [К]) [19];

Re – число Пекле (отношение скорости резки к характерной скорости распространения тепловой волны от цилиндрического источника тепла диаметром, равным ширине канала реза (t). $Re = V \cdot t / \gamma_m$, где t – ширина реза [мм], V – скорость резки [м/мин], γ_m – температуропроводность разрезаемого материала [м²/сек]) [20].

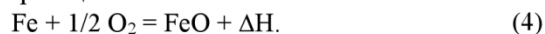
Следует отметить, что общую мощность плазменного столба ($W_{\text{общ}}$) при тонкоструйной плазменной резке можно выразить как:

$$W_{\text{общ}} = W_d + W_{\text{ок}} = W_m + W_{\text{cond}} + W_{\text{плазм}} + W_{\text{атм}}, \quad (3)$$

где $W_d = I_d \cdot U_d$ – мощность плазменной дуги, I_d – значение тока дуги [А], U_d – падение напряжения [В];

Поскольку материалом исследований является углеродистая сталь, в качестве режущего газа используется кислород. В соответствии с данными

работы [19] большую часть окислов в канале реза составляют окислы FeO, образующиеся в результате реакции:



Тогда $W_{\text{ок}} = k_{\text{ок}} \cdot V \cdot t \cdot S \cdot \rho \cdot \Delta H / M_{\text{Fe}}$ – мощность, выделяемая в результате реакции окисления, $k_{\text{ок}}$ – коэффициент, указывающий относительное количество атомов железа, удаленных из канала реза в виде FeO, V – скорость резки [м/мин], t – ширина реза [мм], S – толщина разрезаемого материала [мм], ρ – плотность разрезаемого материала [кг/м³], ΔH – энергия реакции [кДж/моль], M_{Fe} – молярная масса железа [г/моль].

Согласно данным работы [19] при расчете мощности ($W_{\text{ок}}$), выделяемой в результате окислительной реакции, значение $k_{\text{ок}}$ равно 0,35. Энергия реакции (ΔH) составляет 268,8 кДж/моль, а молярная масса железа (M_{Fe}) – 55,8 г/моль.

$W_m = V \cdot t \cdot S \cdot \rho \cdot [C_m \cdot \Delta T + L_f]$ – мощность, затрачиваемая на нагрев и расплавление удаляемого материала из канала реза, V – скорость резки [м/мин], t – ширина реза [мм], S – толщина разрезаемого материала [мм], ρ – плотность разрезаемого материала [кг/м³], C_m – средняя удельная теплоемкость [Дж/г·К], L_f – теплота плавления [Дж/г], ΔT – изменение температуры материала [К].

При расчете мощности (W_m), затрачиваемой на нагрев и расплавление удаляемого материала из канала реза, используются значения средней удельной теплоемкости ($C_m = 0,66$ Дж/г·К), теплоты плавления ($L_f = 275$ Дж/г) и изменения температуры материала ($\Delta T = 1600$ К).

W_{cond} – мощность, теряемая из-за отвода тепла из зоны реза за счет теплопроводности;

$W_{\text{плазм}}$ – суммарные потери мощности в плазматроне (катод и сопло);

$W_{\text{атм}}$ – потери мощности в атмосферу.

Согласно рекомендациям работы [21], значение мощностей W_{cond} , $W_{\text{плазм}}$, $W_{\text{атм}}$ для плазменной резки углеродистых сталей можно принять равными 60%, 8%, 32% от $W_{\text{общ}}$, соответственно.

При тонкоструйной плазменной резке для любой схемы раскроя материала под технологическими параметрами понимают: ток резки, скорость резки, давление и расходы газов. Ток определяется используемым типом сопла. Предельная величина давления и расходов газов определяются выбранным типоразмером набора расходных элементов плазматрона. Поэтому при определении технологических параметров, влияющих на формообразование кромок реза, возможно рассматривать только скорость резки как управляющий параметр [22]. Поэтому на предварительном этапе, до описания процесса, необходимо провести ряд экспериментов по определению оптимального значения скорости резки, при котором величина отклонения от перпендикулярности реза близка к 0.

Исследования проводились на машине термической резки «Термит ППл» на базе установки

тонкоструйной плазменной резки HiFocus 130i производства фирмы Kjellberg (ФРГ) с использованием технологии HiFocus^{plus}.

Производился раскрой листового материала стали Ст3 толщиной 4, 6, 10, 16, 20 мм. Диапазон варьирования скорости обработки соответствовал $\pm 30\%$ и $\pm 60\%$ от рекомендованного значения. Для каждой разрезаемой толщины материала и скоро-

сти резания было проведено не менее 5 опытов. Методика оценки перпендикулярности кромок реза представлена в работах [5-7].

Результаты и обсуждения

Результаты предварительных исследования по установлению оптимальной скорости резки для всех исследуемых толщин материалов, а также рассчитанные по формулам (2-3) безразмерная

Таблица 1

Table 1

Номер опыта и соответствующая нумерация точек на рис. 1,2	Толщина, мм	Ток, А	Скорость реза, м/мин	Ширина реза, мм	Напряжение, В	Колпачок завихряющего газа	W _д , кВт	W _{ок} , кВт	W _{общ} , кВт	W _т , кВт	Q	Р _е	Vc*t, мм ² /с	W _{общ} /S, Вт/мм
1	4	50	0,88	1,85	123	Z4020	6,15	1,42	7,57	0,66	15,39	1,18	27,13	1893,3
2	4	50	1,54	1,7	121		6,05	2,29	8,34	1,05	16,94	1,90	43,63	2084,7
3	4	50	2,2	1,51	119		6,0	2,9	8,9	1,3	17,99	2,42	55,37	2213,6
4	4	50	2,86	1,3	117		5,85	3,25	9,10	1,50	18,49	2,71	61,97	2275,1
5	4	50	3,52	1,15	115		5,75	3,54	9,29	1,63	18,87	2,95	67,47	2322,2
6	6	50	0,6	2,06	130		6,5	1,6	8,1	0,7	11,00	0,90	20,58	1353,2
7	6	50	1	1,74	127		6,4	2,3	8,6	1,1	11,85	1,33	30,45	1457,7
8	6	50	1,5	1,66	125		6,3	3,3	9,5	1,5	12,88	1,81	41,45	1585,2
9	6	50	2	1,56	122		6,1	4,1	10,2	1,9	13,65	2,21	50,57	1679,8
10	6	50	2,4	1,52	120		6,0	4,8	10,8	2,2	14,61	2,66	60,80	1797,3
11	10	130	0,96	2,67	135	Z4022	17,6	5,6	23,2	2,6	18,82	1,87	42,72	2315,2
12	10	130	1,68	2,36	134		17,4	8,7	26,1	4,0	21,20	2,89	66,08	2608,6
13	10	130	2,4	2,24	133		17,3	11,8	29,0	5,4	23,60	3,92	89,60	2904,0
14	10	130	3,12	1,75	132		17,2	11,9	29,1	5,5	23,65	3,98	91,00	2909,4
15	10	130	3,84	1,45	131		17,0	12,2	29,2	5,6	23,73	4,06	92,80	2920,0
16	16	130	0,72	2,75	147		19,1	6,5	25,6	3,0	13,87	1,44	33	1706,7
17	16	130	1,26	2,4	143		18,6	9,9	28,5	4,6	15,44	2,21	50,4	1900,2
18	16	130	1,8	2,29	140		18,2	13,5	31,7	6,2	17,18	3,01	68,7	2114,2
19	16	130	2,34	1,9	137		17,8	14,6	32,4	6,7	17,55	3,24	74,1	2159,0
20	16	130	2,88	1,6	135		17,6	15,1	32,7	7,0	17,69	3,36	76,8	2177,1
21	20	130	0,3	2,8	156	Z4025	20,28	3,67	23,95	1,69	9,73	0,61	14,00	1197,6
22	20	130	0,52 5	2,73	154		20,02	6,27	26,29	2,88	10,68	1,04	23,89	1314,2
23	20	130	0,75	2,62	152		19,8	8,6	28,3	4,0	11,52	1,43	32,75	1417,5
24	20	130	0,97	2,51	150		19,50	10,70	30,20	4,92	12,27	1,78	40,79	1509,8
25	20	130	1,2	2,23	148		19,24	11,70	30,94	5,38	12,57	1,95	44,60	1546,8

Примечание: сопло для толщин 4, 6мм - S2008х; для 10, 16, 20 мм - S2012х

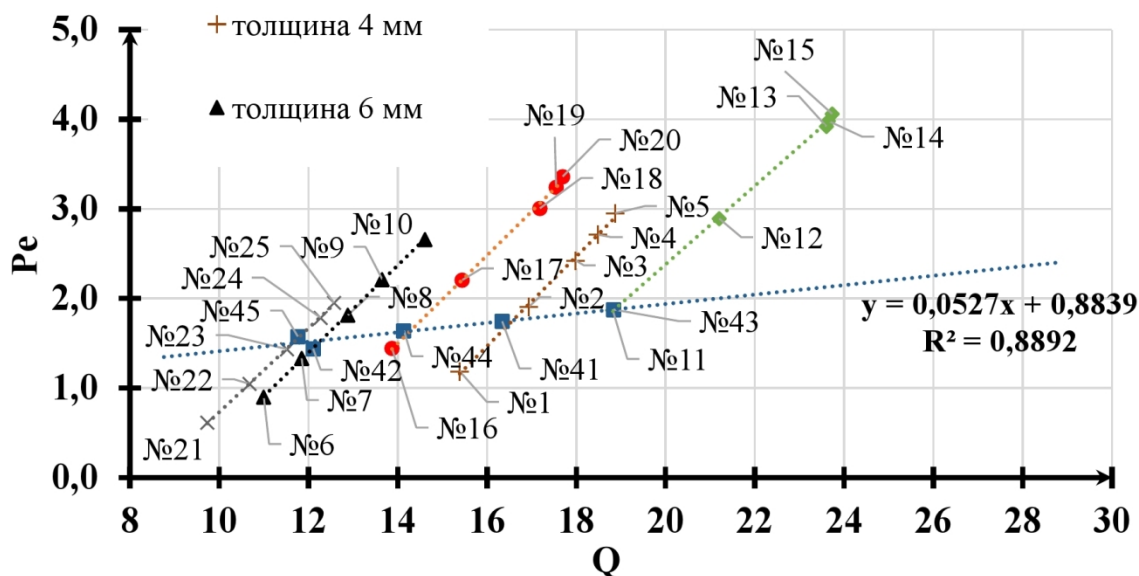


Рис. 1. Значение числа Пекле Pe в зависимости от безразмерной мощности Q
 Fig. 1. The value of the Peclet number Pe depending on the dimensionless power Q

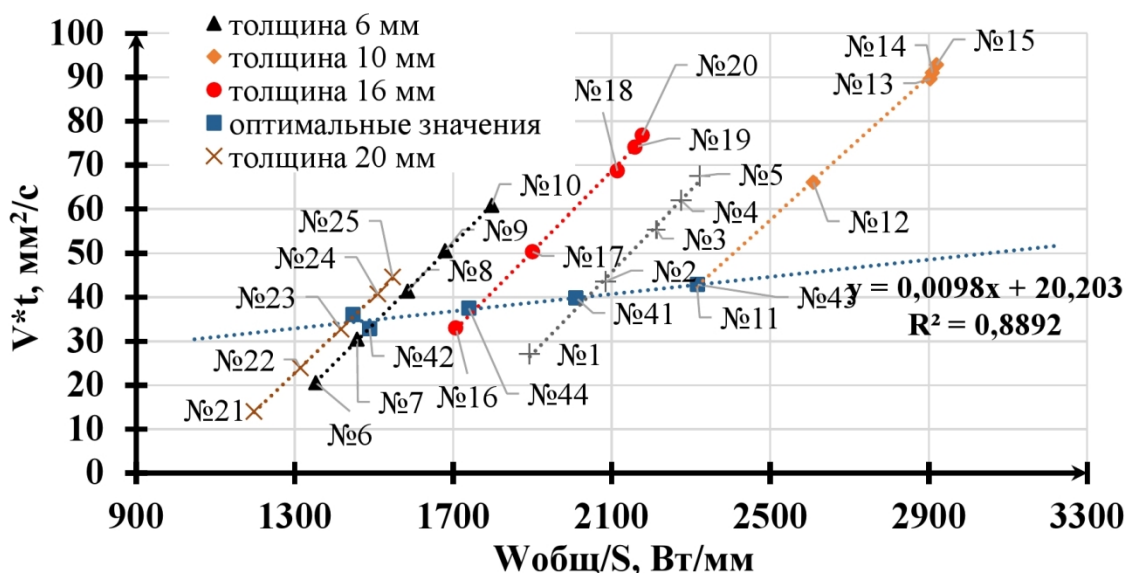


Рис. 2. Зависимость оптимальной скорости резки от мощности в координатах $V \cdot t$, W/S
 Fig. 2. The dependence of the optimal cutting speed on the power in the coordinates $V \cdot t$, W/S

мощность Q и число Пекле (Pe), представлены в таблице 1.

Полученные данные были перенесены на теоретическую кривую зависимости числа Пекле от безразмерной мощности (рис. 1).

Зависимость числа Пекле (Pe) от безразмерной мощности (Q) можно представить в виде линейной зависимости, полученной методом наименьших квадратов через точки, соответствующие оптимальным значениям скорости реза, с достоверностью аппроксимации до 88 %, как: $Pe = 0,0527Q + 0,8839$. Для данной зависимости число Пекле находится в диапазоне от 1,575 (для толщины 20 мм) до 1,876 (для толщины 10 мм). В теории по-

добия значение числа Пекле позволяет определить какой механизм передачи тепла в жидкой среде преобладает – диффузионный или конвективный. Значение числа Пекле от 0 до 1 указывает на действие диффузионных процессов переноса тепла, а чем дальше от 1 находится число Пекле, тем больше в переносе тепла играет роль конвективный перенос. Таким образом, для всех разрезаемых толщин материалов при использовании данной технологии основным механизмом передачи тепла является конвективный [23], а, следовательно, распространение тепла в пространстве осуществляется за счёт переноса тепла при перемещении жидкой среды из области с более высокой

температурой в область с меньшей температурой, а также за счёт теплового движения микрочастиц и обмена кинетической энергией между ними.

Однако, с технологической точки зрения наибольший интерес представляет зависимость оптимальной скорости резки от безразмерной мощности в координатах $V \cdot t$, $W_{\text{общ}}/S$, представленной на рисунке 2. Данный график отличается от графика 1 лишь размерными константами, характеризующими теплофизические свойства материала. Полученная зависимость также может быть описана линейной функцией (с достоверностью аппроксимации до 89%): $W_{\text{общ}}/S = 0,0098 V \cdot t + 20,203$, характеризуемой коэффициентом $W_{\text{общ}}/(V \cdot S \cdot t) = 102 \text{ Дж/мм}^3$. Данный коэффициент характеризует величину энергии, вкладываемую в единицу объема удаляемого материала.

Из анализа полученной кривой зависимости числа Пекле от безразмерной мощности видно (по незначительной величине угла наклона), что во всем диапазоне толщин минимум отклонения от перпендикулярности реза достигается при близких значениях числа Пекле (от 1,4 до 1,9). Относительное постоянство значений числа Пекле при различных значениях разрезаемых толщин позволяет говорить о том, что для всех исследуемых толщин имеется подобие процессов при тон-

коструйной плазменной резке. Существование ограниченного диапазона числе Пекле, при котором осуществляется качественных раскрой материала (с минимальным отклонением от перпендикулярности реза), подтверждается авторами работ [15, 19].

Таким образом, использование безразмерных переменных Q и Pe позволяет подбирать режимы обработки, при которых обеспечивается минимальное отклонение кромок реза от перпендикулярности что, позволяет исключить последующую механическую обработку деталей.

Выводы

1. Предложен подход в оптимизации точности реза тонкоструйной плазменной резки листовых материалов на основе безразмерных параметров процесса (безразмерной мощности и числа Пекле).

2. Экспериментально доказано, что минимальное отклонение реза от перпендикулярности при использовании технологии $\text{HiFocus}^{\text{plus}}$ при раскрое углеродистых сталей в диапазоне толщин от 4 до 20 мм достигается при значении числа Пекле от 1,4 до 1,9.

3. Экспериментально подтверждено, что для управления точностью реза наиболее технологичным параметром является скорость обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование качества резки стали с применением узкоструйной плазменной технологии / С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, Т.М. Быкова // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 4. – С. 31–37.
2. Механические и технологические свойства сварных соединений, полученных после применения плазменной резки / С.В. Анахов, С.В. Гладковский, С.В. Лепихин, Д.А. Двойников, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2016. – № 6. – С. 8–14.
3. Микроструктурный анализ сварных соединений, полученных с применением плазменных технологий резки / С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, Т.М. Быкова // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 2. – С. 16–22.
4. Анахов, С.В. О качестве сварных швов, полученных после плазменной резки / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Технологии и материалы. – 2016. – № 1. – С. 23–27.
5. Оценка технологических схем тонкоструйной плазменной резки металлических материалов и их композиций = Evaluation of technological schemes of high precision plasma cutting of metallic materials and its compositions / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов, Н.П. Гаар // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты = Obrabotka metallov: metal working and material science. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 18–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20-2-18-34.
6. Технологические возможности схемы HiFocus тонкоструйной плазменной резки в обработке конструкционных сталей / Х. М. Рахимьянов, Н. П. Гаар, А. А. Локтионов // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докл. 7 Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Иркутск, 26–28 апр. 2017 г. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2017. – С. 38–43.
7. Estimation of accuracy in forming construction steels by the hifocus technology of high-precision plasma cutting / K.M. Rakhimyanov, N.P. Gaar, A.K. Rakhimyanov, A.A. Loktionov // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Pt. 1. – P. 66–68. – ISBN 978-1-5090-0853-7. – DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884190.
8. Numerical simulation and experimental verification of electrode life for different coolants and its flow in plasma cutting torch / M. Senthil Kumar, B. Dhanasekar, G. Ranga Janardhana, K. S. Jayakumar // International Journal of Intelligent Information Processing. – 2012. – Vol. 3, № 2. – P. 77–85.
9. Optimization of Process Parameters in Plasma arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis / Milan Kumar Das, Kaushik Kumar, Tapan Kr. Barman, Prasanta Sahoo // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 5. – P. 1550–1559.

10. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process / Salonitis K., Vatousianos S. // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 3. – P. 287–292.
11. A Fuzzy Model for Predicting Surface Roughness in Plasma Arc Cutting of AISI 4140 Steel / Cebeli Özek, Ulaş Çaydaş, Engin Ünal. // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2012. – Vol. 27, № 1. – P. 95–102.
12. Иванов, И.Е. Методы подбора физических процессов / И.Е. Иванов, В.Е. Ерещенко. – М: МАДИ, 2015. – 144 с.
13. О законах подбора течения многофазной жидкости в условиях газолазерной резки металлов / В. М. Фомин, А. Г. Маликов, А. М. Оришич, В. Б. Шулятьев, А. А. Голышев // *Динамика многофазных сред: тр. 14 Всерос. семинара, приуроч. к 75-летию акад. РАН Фомина В. М., Новосибирск, 2–5 нояб. 2015 г.* – Новосибирск, 2015. – С. 105–108.
14. О законах подбора газолазерной резки толстых стальных листов / В.М. Фомин, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, В.Б. Шулятьев // *Доклады Академии Наук*. – 2009. – № 3. – С. 325–329.
15. Маликов А.Г. Оптимизация процесса лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05 / Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. – Новосибирск, 2010. – 18 с.
16. Энергетические условия газолазерной резки толстых стальных листов / В.М. Фомин, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, В.Б. Шулятьев // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2011. – Т. 52, № 3. – С. 16–23.
17. Маликов, А.Г. Экспериментальная оптимизация газолазерной резки толстых стальных листов / А.Г. Маликов, А.М. Оришич, В.Б. Шулятьев // *Квантовая Электроника*. – 2009. – № 6. – С. 547–551.
18. Голышев, А.А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // *Обработка Металлов (Технология, Оборудование, Инструменты)*. – 2016. – № 1 (70). – С. 16–21.
19. Шулятьев В.Б. Резка толстых стальных листов излучением СО₂-лазера: дис. докт. техн. наук 01.02.05 / Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. – Новосибирск, 2011. – 31 с.
20. Подбор тепловых потоков при лазерно-кислородной резке стали / В.М. Фомин, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, В.Б. Шулятьев // *Доклады Академии Наук*. – 2011. – Т. 436, № 2. – С. 184–187.
21. Голобородько, Ж.Г. Тепловой баланс и качество изготовления судокорпусных деталей воздушно-плазменной резкой с добавлением воды / Ж.Г. Голобородько, В.В. Квасницкий // *Ультронний вісник наук*. – 2010. – № 2 – С. 1–5.
22. Влияние скорости обработки на положение анодного пятна и перпендикулярность кромок при тонкоструйном плазменном раскрое / Х.М. Рахимьянов, Н.П. Гаар, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // *Механика XXI века*. – 2015. – № 14. – С. 119–122.
23. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

REFERENCES

1. Anakhov S.V., Pugacheva N.B., Pykin Yu.A., Matushkin A.V., Bykova T.M. Issledovanie kachestva rezki stali s primeneniem uzkostruynoy plazmennoy tekhnologii [Investigation of steel cutting quality using narrow-jet plasma technology] // *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of material processing]. 2016. No 4. P. 31–37.
2. Anakhov S.V., Gladkovskiy S.V., Lepikhin S.V., Dvoynikov D.A., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. Mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoystva svarykh soedineniy, poluchennykh posle primeneniya plazmennoy rezki [Mechanical and technological properties of welded joints obtained after plasma cutting application] // *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production]. 2016. No 6. P. 8–14.
3. Anakhov S.V., Pugacheva N.B., Pykin Yu.A., Matushkin A.V., Bykova T.M. Mikrostrukturnyy analiz svarykh soedineniy, poluchennykh s primeneniem plazmennyykh tekhnologiy rezki [Microstructural analysis of welded joints produced using plasma cutting technologies] // *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of material processing]. 2016. No 2. P. 16–22.
4. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. O kachestve svarykh shvov, poluchennykh posle plazmennoy rezki [On the quality of welds obtained after plasma cutting] // *Tekhnologii i materialy* [Technologies and materials]. 2016. No 1. P. 23–27.
5. Rakhimyanov Kh.M., Loktionov A.A., Rakhimyanov A.Kh., Gaar N.P. Evaluation of technological schemes of high precision plasma cutting of metallic materials and its compositions // *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty = Obrabotka metallov: metal working and material science*. 2018. Vol. 20, No 2. P. 18–34. - DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-18-34.

6. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P., Loktionov A.A. Tekhnologicheskie vozmozhnosti skhemy HiFocus tonkostruynoy plazmennoy rezki v obrabotke konstruksionnykh staley [Technological capabilities of the HiFocus scheme of thin-jet plasma cutting in the processing of structural steels] // Zhiznenny tsikl konstruksionnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii): materialy dokl. 7 Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem, Irkutsk, 26–28 apr. 2017 g. [Life cycle of structural materials (from production to disposal): materials of the report. 7 All-Russia. scientific and technical conf. from Intern. participation, Irkutsk, 26–28 Apr. 2017] Irkutsk. IRNITU Publ., 2017. P. 38-43.
7. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P., Rakhimyanov A.K., Loktionov A.A. Estimation of accuracy in forming construction steels by the hifocus technology of high-precision plasma cutting // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. Novosibirsk: NSTU, 2016. Pt. 1. P. 66-68. - ISBN 978-1-5090-0853-7. - DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884190.
8. M. Senthil Kumar, B. Dhanasekar, G. Ranga Janardhana, K. S. Jayakumar Numerical simulation and experimental verification of electrode life for different coolants and its flow in plasma cutting torch // International Journal of Intelligent Information Processing. 2012. Vol. 3, No 2. P. 77–85.
9. Milan Kumar Das, Kaushik Kumar, Tapan Kr. Barman, Prasanta Sahoo Optimization of Process Parameters in Plasma arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 5. P. 1550–1559.
10. Saloni K., Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process // Procedia CIRP. 2012. Vol. 3. P. 287–292.
11. Cebeli Özek, Ulaş Çaydaş, Engin Ünal A Fuzzy Model for Predicting Surface Roughness in Plasma Arc Cutting of AISI 4140 Steel // Materials and Manufacturing Processes. 2012. Vol. 27, № 1. P. 95–102.
12. Ivanov I.E., Ereshchenko V.E. Metody podobiya fizicheskikh protsessov [Similarity methods for physical processes]. Moscow, Publishing of the Moscow Automobile and Road construction State Technical University, 2015. 144 P.
13. Fomin V.M., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B., Golyshev A.A. O zakonakh podobiya tekheniya mnogofaznoy zhidkosti v usloviyakh gazolazernoy rezki metallov [On the laws of the similarity of a multiphase fluid flow under the conditions of gas-laser cutting of metals] // Dinamika mnogofaznykh sred: tr. 14 Vseros. seminar, priuroch. k 75-letiyu akad. RAN Fomina V. M., Novosibirsk, 2–5 noyab. 2015 g. [Dynamics of multiphase media: tr. 14 All-Russia. seminar timed to the 75th anniversary of Acad. RAS Fomina V.M., Novosibirsk, 2–5 Nov. 2015] Novosibirsk, 2015. P. 105–108.
14. Fomin V.M., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. O zakonakh podobiya gazolazernoy rezki tolstykh stal'nykh listov [On the laws of the similarity of gas-laser cutting of thick steel sheets] // Doklady Akademii Nauk [Reports of the Academy of Sciences]. 2009. No 3. P. 325–329.
15. Malikov A.G. Optimizatsiya protsessa lazerno-kislorodnoy rezki nizkouglerodistoy stali: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.02.05 [Optimization of the process of laser-oxygen cutting of low carbon steel: author. dis. ... Cand. tech. Sciences: 01.02.05] / Institut teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki im. S.A. Khristianovicha SO RAN [Siberian Branch of Russian Academy of Sciences Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics]. Novosibirsk, 2010. 18 P.
16. Fomin V.M., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Energeticheskie usloviya gazolazernoy rezki tolstykh stal'nykh listov [Energy conditions of gas laser cutting of thick steel sheets] // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Applied mechanics and technical physics]. 2011. Vol. 52, No 3. P. 16–23.
17. Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Eksperimental'naya optimizatsiya gazolazernoy rezki tolstykh stal'nykh listov [Experimental optimization of gas laser cutting of thick steel sheets] // Kvantovaya Elektronika [Quantum Electronics]. 2009. No 6. P. 547–551.
18. Golyshev A.A. Standardization of oxygen-assisted laser cutting by the surface roughness criterion // Obrabotka metallov: metal working and material science. 2016. No 1 (70). P. 16–21.
19. Shulyat'ev V.B. Rezka tolstykh stal'nykh listov izlucheniem CO₂-lazera: dis. dokt. tekhn. nauk 01.02.05 [Cutting thick steel sheets by CO₂-laser radiation: dis. Dr. tech. Sciences 01.02.05] / Institut teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki im. S.A. Khristianovicha SO RAN [Siberian Branch of Russian Academy of Sciences Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics]. Novosibirsk, 2011. 31 P.
20. Fomin V.M., Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Podobie teplovykh potokov pri lazerno-kislorodnoy rezke stali [The similarity of heat flow in laser-oxygen cutting steel] // Doklady Akademii Nauk

[Reports of the Academy of Sciences]. 2011. Vol. 436, № 2. P. 184–187.

21. Goloborod'ko Zh.G., Kvasnitskiy V.V. Teplovoy balans i kachestvo izgotovleniya sudokorpusnykh detaley vozduшно-plazmennoy rezkoy s dobavleniem vody [Heat balance and quality of manufacture of ship-body parts by air-plasma cutting with the addition of water] // Ulektronniy visnik nuk. 2010. No 2. P. 1–5.

22. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimyanov A.Kh. Vliyanie skorosti obrabotki na polozhenie anodnogo pyatna i perpendikulyarnost' kromok pri tonkostruynom plazmennom raskroe [The effect of processing speed on the position of the anode spot and the perpendicularity of the edges with a thin-jet plasma cutting] // Mekhaniki XXI veku [Mechanics of the XXI century]. 2015. No 14. P. 119-122.

23. Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical heat transfer and fluid flow]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 P.

Поступило в редакцию 19.10.2018

Received 19 October 2018