

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2288>

Количественная оценка кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов при наплавке расщепленной дугой в среде защитного газа

Я.П. Скобликов , С.Б. Сапожков 

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ iakov98sp@gmail.com

EDN: KDYBZG

Аннотация

Введение. Повышение эффективности дуговой наплавки плавящимся электродом является одним из ключевых направлений развития современного производства. Особый интерес представляет наплавка расщеплённым плавящимся электродом в среде защитного газа. Взаиморасположение электродов для данного способа наплавки сказывается на зоне проплавления, а именно на ее форме и кривизне. Форма проплавления влияет на градиент свойств и эксплуатационную надёжность покрытия. Влияние взаиморасположения электродов на кривизну фронта проплавления остаётся количественно не оценённым. Целью настоящего исследования являются определение корреляции кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов и ее количественная оценка.

Материалы и методы. Исследование влияния взаиморасположения электродов на форму проплавления проводилось путем наплавки шести слоёв и последующего анализа формы проплавления основного металла. В качестве влияющих факторов были выбраны расстояние между электродами (z) и угол их наклона (α). Процесс наплавки осуществлялся в среде защитного газа Ar/CO₂ в соотношении 98/2 %. Для выявления зоны проплавления поперечные сечения слоев были протравлены. Границы зон проплавления оцифрованы. Для определения функций, описывающих форму проплавления, использовался полином степени 6. Для анализа формы проплавления выполнялось дифференцирование полученных функций. Дифференциал первого порядка использовался для определения количества экстремумов. Для оценки кривизны формы проплавления использовался метод расчета среднего значения модуля второй производной для значений, лежащих в пределах ширины слоя. Установление корреляции выполнялось по методике Пирсона.

Результаты исследования. В ходе проведённого эксперимента дана количественная оценка кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов. Определены функции, описывающие профили проплавления. Вычислены кривизна полученных профилей и количество экстремумов. Установлены коэффициенты корреляции между межэлектродным расстоянием, углом наклона электродов, кривизной проплавления и количеством экстремумов. Сделан вывод о том, что кривизна формы проплавления и количество экстремумов слабо зависят от межэлектродного расстояния. Угол наклона электродов в большей степени определяет кривизну проплавления. Выявлен эффект демпфирования теплового потока электрической дуги объемом сварочной ванны при межэлектродном расстоянии в 15 мм.

Обсуждение. Зона проплавления основного металла для каждого опыта имеет седловатую форму. Увеличение угла развала электродов приводит к формированию более пологой формы проплавления из-за изменения вектора действия электромагнитных сил, влияющих на потоки плазмы и капли расплавленного металла. Возникновение демпфирующего эффекта объясняется тем, что при сближении электродов объём сварочной ванны увеличивается. Между электрической дугой и основным металлом возникает прослойка жидкого металла с высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью, за счет этого происходит демпфирование тепла от электрической дуги.

Заключение. Проведённое исследование позволило количественно оценить влияние взаиморасположения электродов на кривизну формы проплавления, а также определить степень влияния межэлектродного расстояния и угла наклона электродов на кривизну формы проплавления. Установлено слабое влияние межэлектродного расстояния

на кривизну формы проплавления и количество экстремумов. Коэффициенты корреляции для данных параметров равны $-0,22$ и $0,43$. Влияние угла наклона электродов на кривизну формы проплавления и количество экстремумов оценивается как существенное. Коэффициенты корреляции для данных параметров равны $-0,65$ и $-0,71$. С увеличением угла наклона электродов относительно вертикали кривизна формы проплавления уменьшается.

Ключевые слова: наплавка расщепленной дугой, GMAW, многопроволочная наплавка, взаимное расположение электродов, зона проплавления

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ статьи и рекомендации для ее корректировки.

Для цитирования. Скобников Я.П., Сапожков С.Б. Количественная оценка кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов при наплавке расщепленной дугой в среде защитного газа. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2288 <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2288>

Original Empirical Research

Quantitative Evaluation of Fusion Zone Curvature Correlation with Electrode Positioning in Shielded Gas Split-Arc Surfacing

Iakov P. Skoblikov , Sergey B. Sapozhkov 

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ iakov98sp@gmail.com

Abstract

Introduction. Improving the efficiency of arc surfacing with a consumable electrode is one of the key vectors in the development of modern manufacturing. Split-arc gas-shielded welding with a consumable electrode is of particular interest. The electrode arrangement in this welding process affects the fusion zone, namely its shape and curvature. The shape of the penetration zone significantly affects the property gradient and the operational reliability of the coating. The effect of the electrode arrangement on the curvature of the penetration front remains quantitatively unassessed. The objective of this study is to quantitatively evaluate and determine the correlation of the curvature of the penetration shape depending on the relative arrangement of the electrodes.

Materials and Methods. The effect of electrode positioning on the penetration shape was studied by building up six layers and subsequently analyzing the fusion shape in the base metal. The selected influencing parameters were the interelectrode distance (z) and the electrode inclination angle (α). The surfacing process was performed in an Ar/CO₂ shielding gas atmosphere in a ratio of 98/2%. To make the fusion zone visible, the transverse cross-sections of the layers were subjected to etching. The fusion zone boundaries were digitized. A 6th-degree polynomial was used to determine the functions describing the penetration shape. The obtained functions were differentiated to analyze the fusion shape. The first-order derivative was used to determine the number of extremes. To assess the curvature of the penetration shape, the average value of the absolute second derivative was calculated over the range of values within the layer width. Correlation was established using Pearson's method.

Results. As a result of the conducted experiment, a quantitative assessment of the curvature of the penetration shape depending on the relative arrangement of the electrodes was performed. Functions describing the penetration shapes were determined. The curvature of the obtained shapes and the number of extremes were calculated. Correlation coefficients between the interelectrode distance, the electrode inclination angle, the penetration curvature, and the number of extremes were determined. It was found that the curvature of the penetration shape and the number of extremes weakly depend on the interelectrode distance. The electrode inclination angle determines the penetration curvature to a greater extent. A damping effect of the heat flux of the electric arc by the volume of the weld pool was identified at an interelectrode distance of 15 mm.

Discussion. In each experiment, the base metal fusion zone displayed a saddle-shaped geometry. Increasing the electrode included angle resulted in a shallower penetration shape, attributed to an alteration in the vector of electromagnetic forces that govern plasma streams and molten metal droplet transfer. The damping effect occurred because reducing the interelectrode distance enlarged the weld pool. A layer of molten metal, possessing high heat capacity but low thermal conductivity, separated the electric arc from the base metal, thus damping the heat flux from the arc.

Conclusion. The conducted study made it possible to quantitatively assess the effect of the electrode arrangement on the curvature of the penetration shape, as well as to determine the degree of influence of the interelectrode distance and the electrode inclination angle on the curvature of the penetration shape. The interelectrode distance was found to have a weak effect on both the fusion shape curvature and the number of extremes. The correlation coefficients for these parameters were $-0,22$ and $0,43$. The effect of the electrode inclination angle on both the fusion shape curvature and the number of extremes was considered substantial. The correlation coefficients for these parameters were $-0,65$ and $-0,71$. As the angle of inclination of the electrodes relative to the vertical increased, the curvature of the penetration shape decreased.

Keywords: split-arc surfacing, GMAW, multiwire surfacing, mutual arrangement of electrodes, fusion zone

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board of the journal and the reviewers for their professional analysis of the article and valuable recommendations for its improvement.

For Citation. Skoblikov IP, Sapozhkov SB. Quantitative Evaluation of Fusion Zone Curvature Correlation with Electrode Positioning in Shielded Gas Split-Arc Surfacing. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2288. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2288>

Введение. В современных условиях развития промышленности, аддитивных технологий одним из ключевых факторов конкурентоспособности является повышение производительности различных производственных процессов, позволяющих сократить цикл производства и снизить себестоимость изготавливаемой продукции. К таким процессам можно отнести нанесение металлических покрытий методом наплавки плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW) [1]. Известно, что увеличение производительности данного способа наплавки путем повышения скорости подачи проволоки приводит к усилению мощности электрической дуги и вследствие этого к росту глубины проплавления основного металла, возникновению брызг, подрезов, выгоранию легирующих элементов.

Существует другой подход к увеличению производительности данного способа наплавки. Он заключается в увеличении количества проволок, подаваемых в сварочную ванну, а не в увеличении скорости их подачи. В работе [2] представлены итоги изучения этого метода. Один из них гласит, что при увеличении количества проволок в системе наплавки происходит экспоненциальный рост производительности за счёт более эффективного использования тепла электрической дуги.

Наплавка расщепленным электродом является одним из способов многопроволочной наплавки, который был разработан на основе вышеупомянутого подхода. Сущность данного способа заключается в том, что через токоподвод подаётся не одна, а несколько присадочных проволок. При этом подключение токоподвода выполняется к одному источнику тока [3]. Наплавка данным способом применяется для решения задач, связанных с нанесением антикоррозионных, износостойких покрытий или ремонтом деталей.

Для нанесения антикоррозионных покрытий необходимо добиваться минимального проплавления основного металла с ровной границей. Данная характеристика проплавления обеспечивает минимальную долю участия основного металла в наплавленном слое. В работе [4], посвящённой изучению влияния рода тока на форму проплавления при наплавке расщепленным электродом под слоем флюса, косвенно представлено влияние расстояния между электродами на форму проплавления. В работе отмечается, что при наплавке с межэлектродным расстоянием в 10–12 мм формируется седловатая форма проплавления. Несмотря на это, данная форма проплавления допустима для выполнения антикоррозионной наплавки при отсутствии несплавления в верхней точке седла и сохранении доли участия основного металла в диапазоне 15–25 %. Оценка кривизны формы проплавления, установление ее корреляции в зависимости от взаиморасположения электродов в работе отсутствуют.

Авторы статьи [5] отмечают, что при нанесении износостойких покрытий использование криволинейной формы проплавления обеспечивает более надежное сцепление слоёв с основным металлом, в отличие от пологой формы проплавления. В работе [6], посвящённой комплексному изучению форм проплавления при различных способах дуговой наплавки, подчеркивается: кривизна формы проплавления определяет характер перехода наплавленного металла к основному, что оказывает влияние на концентрацию напряжений в наплавленном металле, определяет градиент смещения основного металла в наплавленном и влияет на свойства наплавленного металла.

Авторами [7] способ двухпроволочной наплавки был успешно применён в рамках аддитивного производства. Данный факт делает этот способ актуальным при выполнении ремонтных работ и выращивании деталей, где характер перехода наплавленного металла от слоя к слою имеет существенное значение. Таким образом, можно сделать вывод, что для решения задач, связанных с нанесением функциональных покрытий, одним из параметров качества является морфология зоны проплавления основного металла.

Влияние взаиморасположения электродов на форму проплавления обусловлено изменением электромагнитных сил в дуговом промежутке и характера тепломассопереноса. Раскрывая данную тему, авторы проанализировали ряд работ, посвящённых процессам, протекающим в дуговом промежутке при наплавке данным способом. В работе [8] определены силы, действующие на каплю и расплавленный металл при наплавке плавящимся электродом с импульсным питанием, а в работе [9] описано изменение этих сил в рамках двух рядом расположенных электродов. Установлено, что при близком расположении электродов на каплю расплавленного металла и поток плазмы влияет сила Лоренца, направленная в межэлектродное пространство. Влияние этой силы способствует изменению траектории падения капель и уменьшению давления электрической дуги. В работе [10] описан процесс моделирования распределения тепла в электрической дуге, возникающей на расщеплённом электроде, и установлено, что распределение тепла в расщеплённой дуге зависит от расстояния между электродами и силы тока. При определённых значениях силы тока и межэлектродного расстояния тепловое поле в электрической дуге принимает одновершинное или двухвершинное строение. Данное распределение теплового потока является важным фактором, определяющим форму проплавления.

В статье [11] выделено два ключевых параметра взаиморасположения электродов, влияющих на форму проплавления. Этими параметрами являются угол наклона электродов относительно вертикали и расстояние между электродами. Таким образом, установлено, что при выборе оптимального режима наплавки необходимо определять не только силу тока, но и взаиморасположение электродов. Данный вывод совпадает с выводом, сделанном авторами статьи [10]. В исследовании, изложенном в статье [12], выявлено влияние угла наклона рабочей головки на формирование наплавленного слоя при наплавке углом вперед. Определено, что оптимальный угол наклона лежит в диапазоне от 10 до 30°. При таком расположении головки удалось получить слои шириной 25 мм с долей участия основного металла в 30–33 %. Расстояние между электродами составляло 6 мм. В качестве электродов использовалась проволока марки Inconel 625. Наплавку выполняли под слоем флюса.

По результатам анализа научных работ по представленной теме можно заключить, что изучение формы проплавления при наплавке расщепленным электродом в среде защитного газа актуально при нанесении функциональных покрытий, ремонте деталей и аддитивном выращивании. Взаиморасположение электродов при наплавке этим способом существенно влияет на силы, действующие в дуговом промежутке, и на тепломассоперенос электродного металла. Изменение формы проплавления в зависимости от расстояния между электродами и угла наклона электродов для такого процесса наплавки изучено недостаточно полно. Выявленный научный пробел заключается в отсутствии количественных данных об изменении формы проплавления в зависимости от расстояния между электродами и угла их наклона относительно вертикальной плоскости. В связи с этим цель настоящего исследования — дать количественную оценку и определить корреляцию кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить количество экстремумов и кривизну функции, описывающей форму проплавления, для каждого опыта.
2. Определить величины корреляции межэлектродного расстояния с кривизной формы проплавления и с количеством экстремумов, а также угла наклона электродов с кривизной формы проплавления и с количеством экстремумов.

Материалы и методы. Для оценки кривизны формы проплавления в зависимости от конфигурации электродов выполнена наплавка плоских слоев с различным расстоянием между электродами и углом между ними. Перемещение рабочего инструмента выполнялось с использованием робота Fanuc 120iD (Япония). Питание электрической дуги осуществлялось от импульсного источника питания EWM Titan XQ500 (Германия). Наплавочная головка состояла из двух горелок, закрепленных на регулируемом кронштейне. В качестве подложек использовались пластины из стали Ст3 размером 150×70×20 мм. Наплавка выполнялась в режиме GMAW-Pulse проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Химический состав проволоки представлен в таблице 1. В качестве защитного газа использовалась смесь газов — Ar (98 %) и CO₂ (2 %). Такая газовая смесь, по сравнению со смесями с большим содержанием CO₂, имеет сниженную окислительную способность, за счет чего в процессе наплавки возникает меньше неметаллических включений. Для визуализации макроструктуры наплавленного слоя выполнялось травление образцов электролитическим методом в растворе хлорида натрия (NaCl) с концентрацией 200 г/л. Перед травлением образцы были отполированы. Травление проводилось с плотностью тока 7–10 А/дм². В качестве катода выступал стержень из стали 12Х18Н10Т, на конце которого был закреплен тампон. Травление выполнялось методом протирки образца до выявления структуры. Данный способ травления был выбран как один из доступных способов на момент проведения исследования. Измерение формы проплавления проведено с использованием ПО Digimizer (версия 6.5.1).

Таблица 1

Химический состав проволоки Св-08Г2С (мас. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0,05–0,11	0,70–0,95	1,80–1,90	≤0,030	≤0,025	≤0,025	≤0,020	≤0,025

В качестве независимых факторов, определяющих взаимное расположение горелок, были выбраны расстояние между электродами (z) и угол их наклона относительно вертикальной плоскости (α). При проведении эксперимента наплавка выполнялась с одинаковым вылетом (SO), равным 20 мм. На рис. 1 представлены компоновка электродов во время наплавки и исследованные параметры.

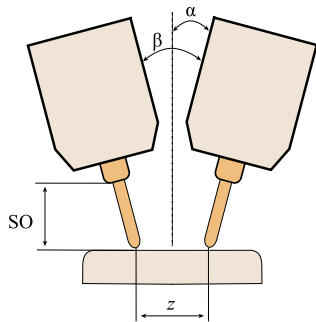


Рис. 1. Схема компоновки [11]

Наплавка слоев выполнялась при скорости подачи проволоки (WFS), равной 6,5 м/мин для одной горелки. Так как в процессе наплавки использовалось две горелки, общая скорость подачи проволоки составляла 13 м/мин. Перемещение рабочего инструмента происходило с постоянной линейной скоростью (TS), равной 4 мм/с. В процессе наплавки фиксировались значения силы тока (I) и напряжения (U), регистрация которых осуществлялась по показаниям амперметра и вольтметра, интегрированных в источник питания. Для поддержания схожей тепловой картины при проведении опытов использовались одинаковые подложки. Перед наплавкой слоя подложки были зачищены до металлического блеска и подогреты до температуры (MBT), равной 150 °С. Подогрев выполнялся с целью имитации реальных технологических условий, при которых ведутся производственные работы, и проводился газовой горелкой. Контроль температуры осуществлялся тепловизором HIKMICRO B20. Расход защитного газа для каждой из горелок составлял 15 л/мин. Общий расход газа — 30 л/мин. В таблице 2 приведен режим наплавки.

Таблица 2

Режим наплавки

WFS, м/мин	I, A	U, B	TS, мм/с	MBT, °C	SO, мм	Газ, л/мин
13	420	25	4	150	20	30

План эксперимента включал в себя шесть опытов с различными параметрами z (1Cr, 18, 21 мм) и α (5°, 10°). Образцы для анализа отбирались на участке, составляющем 3/4 длины наплавленного слоя. План эксперимента представлен в таблице 3. На рис. 2 показана фотография образца с линией его рассечения.

Таблица 3

План эксперимента

Опыт	z , мм	α , °
1	15	5
2	18	5
3	21	5
4	15	10
5	18	10
6	21	10



Рис. 2. Внешний вид образца

Для оценки влияния взаимного расположения электродов на форму проплавления в программе Digimizer были определены ее границы. На рис. 3 представлено фото макрошлифов с очерченными границами.

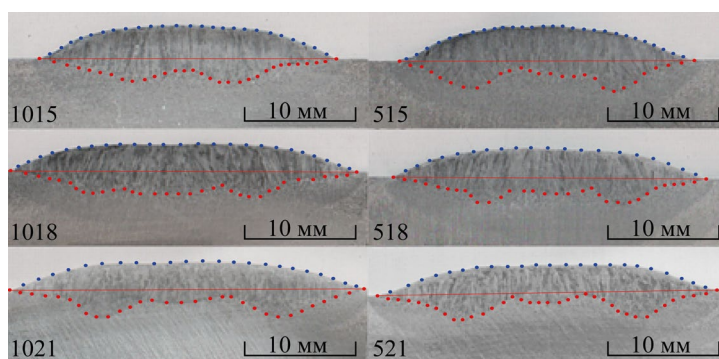


Рис. 3. Фото макрошлифов с очерченными границами [5]

Так как при наплавке расщепленной дугой два источника тепла располагаются симметрично относительно вектора движения, то и форма проплавления условно является симметричной. Для оценки формы проплавления было решено зеркально отразить и наложить измеренные значения друг на друга относительно оси слоя и инвертировать значения по оси Y. На рис. 4 показана данная методика. В результате проделанной операции удалось представить данные как точки в системе координат XY, где X — ширина проплавления от оси слоя, а Y — глубина проплавления. Причем ось Y является осью наплавленного слоя.

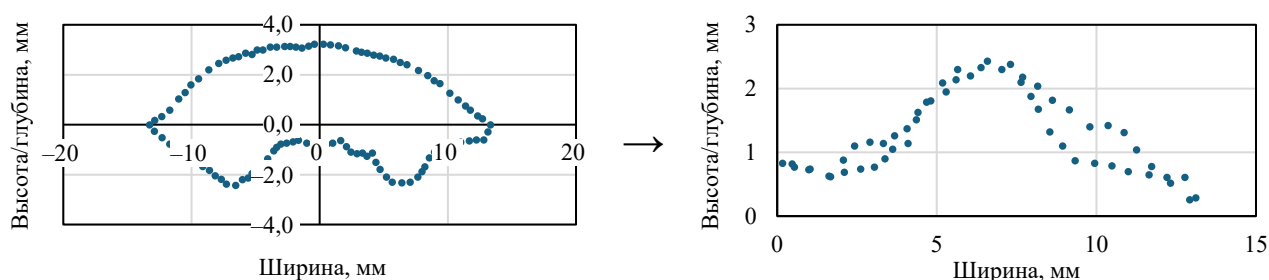


Рис. 4. Процесс обработки данных

Для оценки кривизны формы проплавления на основе измеренных данных определена регрессионная функция каждого профиля. Для описания всех кривых использовался полином шестой степени. Первая производная уравнений, описывающих форму проплавления, использовалась для определения количества экстремумов. Вторая производная применялась для количественной оценки кривизны. Кривизна формы проплавления для каждого опыта вычислялась как среднее значение модуля второй производной для точек, лежащих в пределах ширины слоя. Корреляция кривизны формы проплавления и экстремумов в зависимости от расстояния между электродами и угла их наклона вычислялась по методике Пирсона.

Результаты исследования. Определены уравнения регрессии, описывающие форму проплавления. Коэффициент детерминации составил более 0,9. Уравнения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Уравнения регрессии

№	X^6	X^5	X^4	X^3	X^2	X^1	Const	R^2
515	-0,000075	0,002839	-0,0385	0,216	-0,41	0,15	0,83	0,91
1015	-0,000003	-0,000049	0,0039	-0,050	0,17	0,16	0,75	0,90
518	-0,000070	0,002942	-0,0449	0,296	-0,77	0,46	1,87	0,93
1018	-0,000013	0,000466	-0,0058	0,027	-0,04	-0,02	2,08	0,92
521	-0,000035	0,001672	-0,0292	0,222	-0,67	0,60	1,02	0,92
1021	-0,000052	0,002405	-0,0413	0,315	-0,99	1,00	0,65	0,92

На рис. 5 даны графики, иллюстрирующие форму проплавления и характер ее изменения в зависимости от угла наклона электродов при одинаковом расстоянии между ними. На рис. 6 изображены графики, описывающие форму проплавления и характер ее изменения в зависимости от расстояния между электродами, для экспериментов с фиксированным углом наклона.

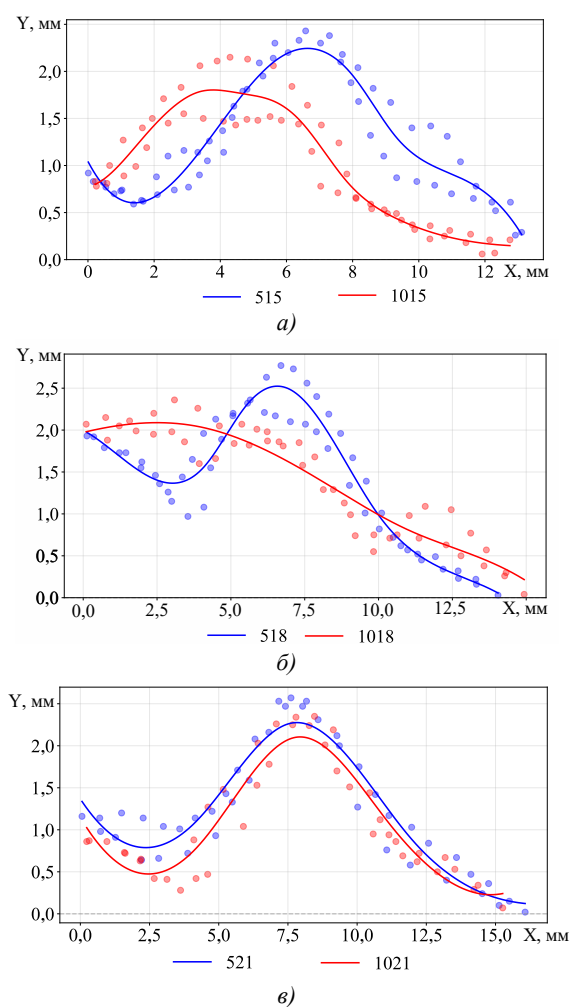


Рис. 5. Форма и характер изменения проплавления для угла в 5 и 10°:
а — для $z = 15$ мм; б — для $z = 18$ мм; в — для $z = 21$ мм

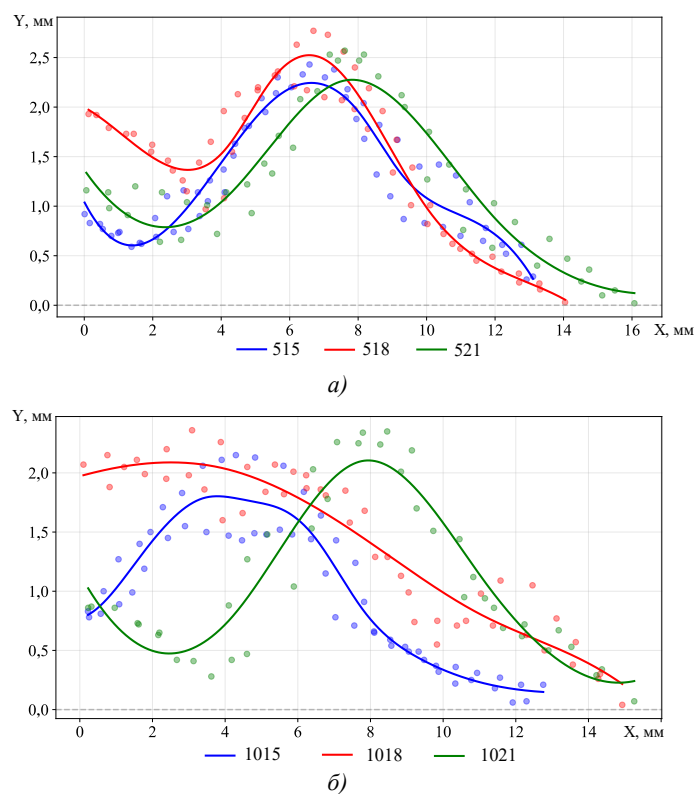


Рис. 6. Форма и характер изменения проплавления при $Z = 15, 18, 21$ мм:
а — угол наклона электродов 5°; б — угол наклона электродов 10°

На приведенных графиках видно, что для всех опытов характерна криволинейная седловатая форма проплавления. Кривые, описывающие форму проплавления, имеют один или два экстремума в зависимости от конфигурации электродов.

На рис. 7 представлены графики, показывающие изменение кривизны формы проплавления в зависимости от взаимного расположения электродов. Цифры 1 и 2 указывают количество экстремумов на кривой, описывающих форму проплавления.

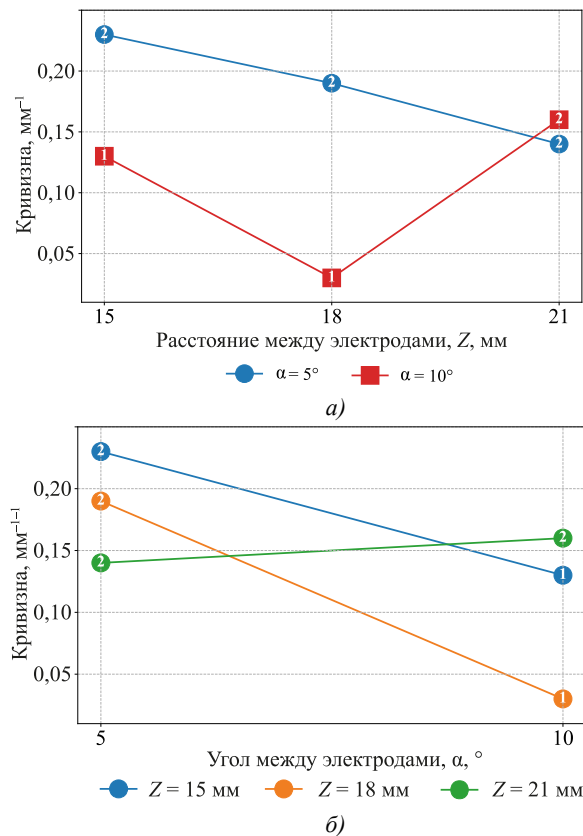


Рис. 7. Графики зависимости кривизны зоны проплавления:
а — от расстояния между электродами; б — от угла между электродами

Для опытов с межэлектродным расстоянием в 21 мм величина кривизны формы проплавления лежит в районе $0,15 \text{ мм}^{-1}$. Зона проплавления имеет два экстремума. Для опытов с расстоянием между электродами в 18 и 15 мм величина кривизны формы проплавления зависит от угла наклона электродов. При угле наклона 10° форма проплавления имеет кривизну, равную $0,03 \text{ мм}^{-1}$ и $0,14 \text{ мм}^{-1}$ соответственно. Количество экстремумов равно единице. При уменьшении угла до 5° кривизна увеличивается до $0,19 \text{ мм}^{-1}$ и $0,24 \text{ мм}^{-1}$ соответственно. Количество экстремумов становится равным двум.

В таблице 5 представлена матрица, полученная в ходе оценки величины корреляции кривизны формы проплавления и количества экстремумов в зависимости от расстояния между электродами и угла их наклона.

Таблица 5

Корреляционная матрица

	Z	α	Кривизна	Экстремумы
Z	1	-0,08	-0,22	0,43
α	-0,08	1	-0,65	-0,71
Кривизна	-0,22	-0,65	1	0,36
Экстремумы	0,43	-0,71	0,36	1

Коэффициент корреляции расстояния между электродами с кривизной формы проплавления равен $-0,22$, а с количеством экстремумов — $0,43$. Коэффициент корреляции угла наклона с кривизной формы проплавления равен $-0,65$, а с количеством экстремумов — $-0,71$.

Обсуждение. Форма проплавления основного металла характеризуется наличием осевой зоны (P1) и основной зоны (P2) проплавления. Основная зона проплавления формируется непосредственно под действием источника тепла. Возникновение осевой зоны проплавления обусловлено суперпозицией тепловых полей от каждого источника тепла и тепловым воздействием потоков плазмы, устремляющихся в область между электродами [13]. На рис. 8 дано схематическое изображение зоны проплавления при наплавке расщепленной дугой.

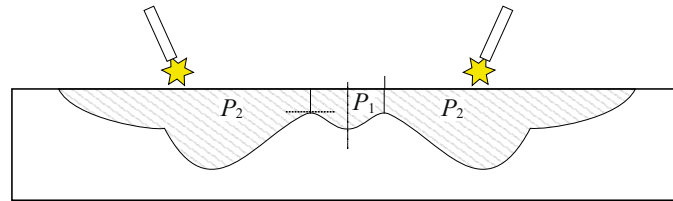


Рис. 8. Схематическое изображение зоны проплавления при наплавке расщепленным электродом

Анализ кривизны формы проплавления показывает, что при расстоянии между электродами в 21 мм она не зависит от угла наклона электродов. При наплавке с данной конфигурацией электродов электрические дуги ведут себя как независимые источники тепла. Об этом говорят схожая форма проплавления, значение кривизны формы в районе $0,15 \text{ мм}^{-1}$ и равное количество экстремумов. При уменьшении расстояния между электродами до 18 или 15 мм кривизна формы проплавления становится зависимой от угла наклона электродов. С увеличением угла наклона электродов проплавление становится более пологим. Об этом свидетельствует уменьшение кривизны формы проплавления и количества экстремумов. Для опытов с расстоянием между электродами в 18 мм уменьшение кривизны проплавления происходит на 84 %, а для опытов с расстоянием между электродами в 15 мм — на 42 %.

Согласно результатам оценки корреляции, связь между межэлектродным расстоянием (z) и кривизной формы проплавления является слабой (коэффициент Пирсона $r = -0,22$), а связь между межэлектродным расстоянием и количеством экстремумов является умеренной ($r = -0,43$). Корреляция между углом наклона электродов (α) и кривизной формы проплавления определена как умеренная, близкая к сильной ($r = -0,65$), тогда как корреляция угла наклона с количеством экстремумов оценивается как сильная ($r = -0,71$).

Изменение кривизны формы проплавления в зависимости от взаимного расположения электродов связано с изменением вектора сил, действующих на каплю в дуге. В работе [14] проанализированы силы, действующие на каплю при GMAW-наплавке. При отрыве капли на нее действуют сила тяжести, электромагнитная сила и сила, обусловленная воздействием потоков плазмы. При наплавке расщепленным электродом из-за взаимодействия электромагнитных полей соседних дуг возникает сила Лоренца, отклоняющая столб дуги и каплю к оси шва [15]. В результате капли расплавленного металла падают не строго под электрод, а со смещением к оси шва. Это подтверждается результатами скоростной видеосъемки процесса тандемной сварки, представленными в работе [16]. Данное смещение приводит к формированию более пологой формы проплавления.

Стоит заметить, что минимальное значение кривизны формы проплавления, равное $0,03 \text{ мм}^{-1}$, возникает при межэлектродном расстоянии в 18 мм и угле их наклона к вертикали в 10° . При сближении электродов до 15 мм форма проплавления становится более крутой несмотря на сближение источников тепла и усиление действия радиальной составляющей электромагнитной силы.

Сравнение результатов экспериментов показывает, что при наплавке с параметром $z = 15 \text{ мм}$ ширина наплавленного слоя меньше. Однако из-за равного объема расплавленного электродного материала толщина (или высота) данного слоя оказывается больше. На рис. 9 представлен график зависимости высоты и ширины наплавленного слоя от расположения электродов [11].

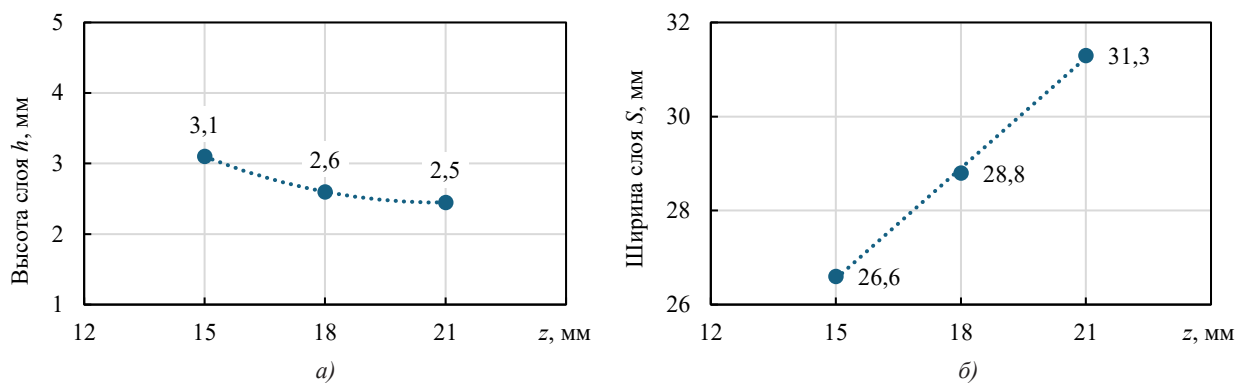


Рис. 9. Габариты слоя в зависимости от расположения электродов:
а — высота слоя; б — ширина слоя [11]

Следовательно, можно сделать вывод, что при наплавке с меньшим расстоянием между электродами формируется сварочная ванна с большей толщиной. Между электрической дугой и основным металлом возникает прослойка жидкого металла с высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью. По этой причине возникает эффект демпфирования теплового потока и уменьшения температурных колебаний в сварочной ванне. Этот эффект описан в работе [17].

С практической точки зрения полученные результаты позволяют более ясно сформировать понимание процессов, происходящих при изменении взаиморасположения электродов, и послужить опорой для определения режима наплавки с использованием других сварочных материалов. Для нанесения антикоррозионных покрытий рекомендуется использовать режим наплавки с углом наклона электродов в 10° и расстоянием в 15–18 мм. Такое взаиморасположение электродов дает возможность получать зону проплавления с меньшей кривизной. Благодаря этому в наплавленном слое возникает равномерное распределение химических элементов. Для выполнения ремонтных наплавок рекомендуется выбирать расположение электродов с углом наклона электродов в 5° , а расстояние между электродами — в 15 мм. При этом угле наклона электродов и межэлектродном расстоянии форма проплавления имеет наибольшую кривизну, благодаря чему прочность сцепления такой наплавки с основным металлом больше, по сравнению с наплавкой с полой формой проплавления [6].

По результатам проведенной работы установлено слабое влияние расстояния между электродами на кривизну формы проплавления и количество экстремумов. Коэффициент корреляции для данных параметров равен $-0,22$ и $0,43$. Влияние угла наклона электродов относительно вертикали на кривизну формы проплавления и количество экстремумов оценивается как существенное. Коэффициент корреляции для данных параметров равен $-0,65$ и $-0,71$. С увеличением угла наклона электродов относительно вертикали кривизна формы проплавления уменьшается.

Наплавка с межэлектродным расстоянием в 18 мм и уменьшением угла наклона электродов на 5° приводит к уменьшению кривизны проплавления на 84 %. Для опытов с межэлектродным расстоянием в 15 мм — на 42 %.

Определено изменение кривизны формы проплавления от толщины сварочной ванны за счет эффекта демпфирования теплового потока прослойкой расплавленного металла.

Заключение. В настоящей работе дана оценка влияния взаимного расположения электродов на кривизну формы проплавления при наплавке расщепленным электродом в среде защитного газа. Определены регрессионные функции, описывающие форму проплавления для каждого из шести опытов, установлено количество экстремумов и проведен расчет кривизны каждой кривой проплавления. Рассчитаны коэффициенты корреляции исследуемых параметров.

Показано, что для всех рассмотренных конфигураций электродов форма проплавления является криволинейной и седловатой. Установлено, что при межэлектродном расстоянии $z = 21$ мм кривизна формы проплавления не зависит от угла наклона электродов и составляет около $0,15 \text{ мм}^{-1}$, а дуги ведут себя как независимые источники тепла. При уменьшении расстояния до $z = 18$ мм и $z = 15$ мм кривизна формы проплавления приобретает выраженную зависимость от угла наклона электродов α . С увеличением угла форма проплавления становится более полой, что свидетельствует об усилении электромагнитного взаимодействия между дугами и смещении капель электродного металла к оси шва.

По результатам корреляционного анализа установлено, что связь между межэлектродным расстоянием z и кривизной формы проплавления является слабой ($r = -0,22$), тогда как угол наклона электродов α обнаруживает умеренную, близкую к сильной корреляцию с кривизной формы проплавления ($r = -0,65$) и сильную корреляцию с количеством экстремумов ($r = -0,71$). Таким образом, угол наклона электродов является более значимым управляющим параметром формы проплавления, чем межэлектродное расстояние.

Полученные результаты применимы к условиям только проведенного исследования. При использовании прикладной проволоки иных марок количественные показатели будут отличаться, однако физические механизмы, определяющие влияние взаиморасположения электродов на форму проплавления, остаются неизменными.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные данные позволяют обоснованно подходить к выбору конфигурации электродов при наплавке функциональных покрытий, когда форма и кривизна проплавления непосредственно определяют долю участия основного металла в наплавленном слое и характер концентрации напряжений.

Перспективным направлением дальнейших исследований является моделирование процесса тепломассопереноса при наплавке расщепленным плавящимся электродом с различным взаиморасположением электродов и разработка модели источника тепла, позволяющей осуществлять данный процесс наплавки методом конечных элементов.

Список литературы / References

1. Rui Xiang, Jiankang Huang, Xiaoquan Yu, Huayu Zhao, Ding Fan. A Review of Double-Electrode GMAW: Approaches, Developments and Variants. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025;133:1160–1182. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.017>
2. Tušek J. Mathematical Modelling of Melting Rate in Arc Welding with a Triple-Wire Electrode. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;146(3):415–423. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.12.006>
3. Елсуков С.К., Соколов Г.Н., Зорин И.В., Фастов С.А., Полунин И.А. Исследование дугового процесса при наплавке расщепленным электродом в смеси защитных газов. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020;237(2):62–66. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-2-237-62-66>
4. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
5. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
6. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
7. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
8. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
9. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
10. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
11. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
12. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
13. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
14. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
15. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
16. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
17. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>

Об авторах:

Яков Павлович Скобников, аспирант кафедры «Сварка судовых конструкций» Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), iakov98sp@gmail.com

Сергей Борисович Сапожков, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка судовых конструкций» Санкт-Петербургского морского технического университета (190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), wh13@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

Я.П. Скобников: разработка концепции, проведение исследования, разработка методологии, визуализация.

С.Б. Сапожков: написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Iakov P. Skobnikov, Postgraduate student of the Department of Welding of Ship Structures, Saint Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., Saint Petersburg, 190121, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), iakov98sp@gmail.com

Sergey B. Sapozhkov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Welding of Ship Structures, Saint Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., Saint Petersburg, 190121, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), wh13@bk.ru

Claimed Contributorship:

IP Skobnikov: conceptualization, investigation, methodology, visualization.

SB Sapozhkov: writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 06.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 01.04.2026

Принята к публикации / Accepted 08.04.2026