

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.4.01

УДК 621.791

**С.Д. Неулыбин, Г.Л. Пермяков, Д.Н. Трушников,  
Ю.Д. Щицын, В.Я. Беленький, Д.С. Белинин**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ**

Посвящено исследованию процесса многослойной плазменной наплавки на прямой и обратной полярности тока. Описаны основные положения в области аддитивного производства с использованием различных технологий, а также возможность и потенциальные преимущества гибридного производства изделий сложной формы. Показано, что применение плазменного источника нагрева при использовании тока прямой и обратной полярности имеет ряд преимуществ как с технологической, так и экономической точки зрения. Для численной реализации использован пакет COMSOL Multiphysics, позволяющий решать смежные задачи математической физики, возникающие при протекании сварочных процессов. Программная среда, обеспечивающая все этапы моделирования (определение геометрических параметров, описание физики, визуализацию), позволяет моделировать любые физические процессы, которые могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Разработана методика и представлено математическое описание теплового источника, описывающего процесс плазменной наплавки с учетом теплопередачи от потока плазмы и приэлектродных процессов. Разработана трехмерная численная модель теплопередачи в изделие для плазменной наплавки на токе прямой и обратной полярности. Получены термические циклы плазменной наплавки. На основании термических циклов произведен анализ структурно-фазовых превращений и дано описание тепловой обстановки на поверхности изделия. Показано, что применение обратной полярности благоприятно влияет на структурообразование наплавляемого материала. Произведена численная реализация процесса плазменной наплавки на токах прямой и обратной полярности для стали 10X18H10T. Погрешность в тестовых примерах при численной реализации не превысила 10 %.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, многослойная наплавка, плазмотрон, численное моделирование, метод конечных элементов, высоколегированная сталь, прямая полярность, обратная полярность, гибридные технологии, плотность мощности, катодные пятна, термический цикл, плазменный поток, электродные пятна.

**S.D. Neulybin, G.L. Permyakov, D.N. Trushnikov,  
Iu.D. Shchitsyn, V.Ya. Belenkiy, D.S. Belinin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **PLASMA SURFACING: MATHEMATICAL MODEL, NUMERICAL IMPLEMENTATION AND VERIFICATION**

The article is devoted to the investigation of multilayer plasma surfacing on the straight line and reverse polarity of the current. The article describes the main provisions in the field of additive produc-

tion using various technologies. The possibility and potential advantages of hybrid production of products of complex shape are described. It is shown that the use of a plasma heating source using direct and reverse polarity current has several advantages from both the technological and economic point of view. For the numerical implementation, the Comsol Multiphysics package is used, which allows solving adjacent problems of mathematical physics that occur during the course of welding processes. A software environment that provides all the stages of modeling (definition of geometric parameters, description of physics, visualization), allowing to model any physical processes that can be represented as a system of partial differential equations. A technique is developed and a mathematical description of the thermal source describing the plasma surfacing process taking into account the heat transfer from the plasma flow and near-electrode processes is presented. A three-dimensional numerical model of heat transfer into a product for plasma surfacing at a current of direct and reverse polarity is developed. Thermal cycles of plasma surfacing are obtained. On the basis of thermal cycles, the analysis of structural phase transformations and the description of the thermal situation on the surface of the article are made. It is shown that the use of reverse polarity favorably influences the formation of the deposited material. Numerical realization of the plasma surfacing process on the currents of direct and reverse polarity for steel 10Cr18Ni10Ti is made. The error in the test examples for numerical implementation did not exceed 10%.

**Keywords:** additive technologies, multilayer surfacing, plasma torch, numerical simulation, finite element method, high-alloy steel, direct polarity, reverse polarity, hybrid technologies, power density, cathode spots, thermal cycle, plasma flow, electrode spots.

## **Введение**

Аддитивные и гибридные технологии являются ключевыми составляющими построения цифровой экономики XXI в. Однако до настоящего времени, говоря об аддитивных технологиях, в основном имеют в виду производство изделий небольших размеров сложной формы [1–4]. Использование в качестве источника нагрева электрической дуги и проволоки в качестве присадочного материала способствует повышению производительности при формировании слоистых материалов [5–8]. При снижении затрат на технологическую подготовку производства повышается коэффициент использования материала и обеспечивается возможность получения готовых изделий с заданными эксплуатационными характеристиками. Использование разнородных материалов в одной заготовке обеспечивает повышение несущей способности конструкции в целом и придает рабочим поверхностям специальные свойства.

Несмотря на развитие в последние годы дуговых методов 3D-наплавки [9, 10], до сих пор остро стоят вопросы снижения тепловложения в изделие при нанесении слоев, повышения адгезии слоев, возможности обработки материалов разных классов, снижения дефектности наплавленного металла, обеспечения требуемых свойств [11]. Структура и свойства слоистых материалов во многом определяются особенностями теплопередачи в изделие при наплавке. Применение высококонцентрированных источников энергии позволяет снизить теп-

ловложение в изделие и улучшить условия формирования структуры и свойств слоистых материалов. Использование плазменных технологий для формирования слоистых материалов имеет ряд преимуществ с технологической и экономической точек зрения.

Для создания слоистых материалов могут использоваться легированные стали и сплавы цветных металлов, имеющие различные теплофизические характеристики. Кроме того, при непрерывной многослойной наплавке происходит наложение температурных полей от слоя к слою, что влияет на формирование конечной структуры и свойств получаемых материалов.

Разработка технологии и ее распространение на различные группы материалов требует формализации исследуемых процессов аддитивного формирования оплавлением проволоочного материала в виде математического описания процессов. Применение математического моделирования с использованием вычислительного эксперимента способствует лучшему пониманию протекающих физических процессов и получению дополнительной информации о реализуемом наложении по времени термических циклов.

Для решения задач теплопроводности применяют аналитические и численные методы. Существующие аналитические методы дают возможность получать решения только для процессов, описываемых линейными дифференциальными уравнениями при линейных граничных условиях, т.е. для тех случаев, когда теплофизические свойства можно считать не зависящими от температуры. Аналитические методы приводят к общим уравнениям процессов, действительным при разнообразных числовых значениях параметров, характеризующих данную задачу: геометрических размеров, тепловых характеристик режима нагрева и физических свойств металла. В простейших задачах удается получить решение в замкнутой форме, т.е. выразить уравнение процесса через известные функции от времени, пространственных координат и постоянных параметров процесса. В более сложных задачах решения описываются определенными интегралами или бесконечными рядами [12–14].

Численные методы, в отличие от аналитических, позволяют решать задачу теплопроводности в сложной постановке, т.е. с учетом реальной геометрии конструкции, температурной зависимости теплофизических свойств, распределенности источника нагрева и т.д., что де-

лает их применение единственно возможным решением в условиях моделирования процесса наплавки. В настоящее время наиболее универсальным и распространенным в коммерческих пакетах прикладного программного обеспечения является метод конечных элементов (МКЭ, или FEM). Современные программные продукты, например ANSYS, COMSOL, предоставляют широкие возможности для решения задачи тепломассопереноса при сварке [15–21].

До настоящего времени все результаты моделирования плазменной сварки/наплавки на токе обратной полярности были без учета блуждания катодных пятен по поверхности изделия, и законченные динамические модели с учетом данного явления до сих пор отсутствуют.

### Методика исследования

Для математической постановки задачи необходимо знать тепловложение в изделие от воздействия плазменной дуги при работе на прямой и обратной полярности тока, а также распределение доли теплотеплопередачи от плазменной струи и электродных пятен. Теплопередача в изделие при плазменной обработке сжатой дугой прямого действия осуществляется двумя механизмами: конвекцией от плазменной струи (плазменного потока) и тепловыделением в активных (электродных) пятнах. В работе [22] установлено, что при одинаковом токе и прочих равных условиях тепловложение при работе плазмотрона на обратной полярности тока в изделие выше в 1,3–1,6 раза, чем на прямой полярности тока, что объясняется более высоким напряжением на дуге. Показано, что в отличие от сжатой дуги прямой полярности сжатая дуга обратной полярности характеризуется более равномерным распределением тепловой мощности по поверхности изделия (рис. 1).

Стоит отметить, что при плазменной обработке на токе прямой полярности величины  $d_{п.с}$  и  $d_{а.п}$  соразмерны и управлять их размером по отдельности невозможно. При плазменной обработке на токе обратной полярности дуга относится к типу дуг с нестационарными катодными пятнами, блуждающими по поверхности изделия. Ширина блуждания зависит от конструкции плазмотрона и материала изделия. Одной из отличительных особенностей нестационарных пятен является кратковременность их существования и большая плотность тока в них ( $j \sim 10^5\text{--}10^6 \text{ А/м}^2$ ), при этом удельные тепловые потоки достигают зна-

чений  $q \sim 10^6-10^7$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 2), а величинами  $d_{п.с}$  и  $d_{к.о}$  можно активно управлять и регулировать отдельно.

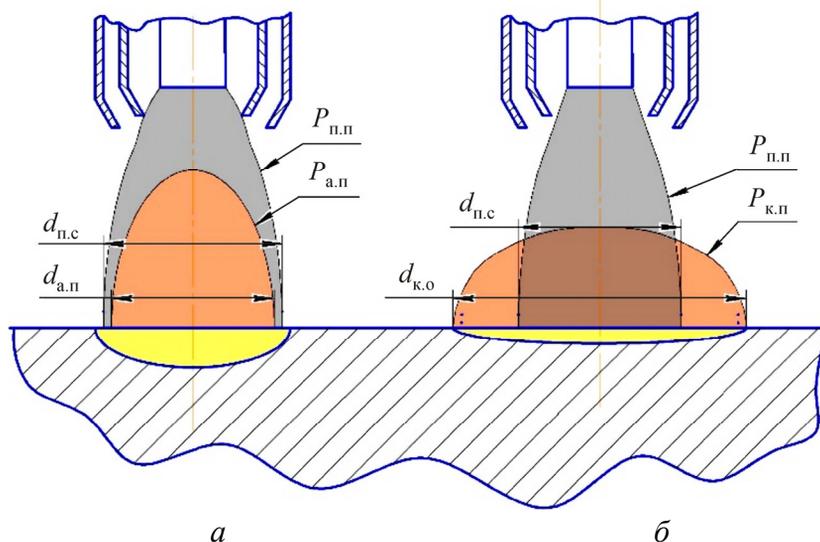


Рис. 1. Схема теплопередачи в изделии при плазменной обработке: *а* – прямая полярность тока; *б* – обратная полярность тока;  $P_{п.п}$  – мощность, передаваемая конвекцией;  $P_{а.п}$  – мощность, выделяемая в анодном пятне;  $P_{к.п}$  – мощность, выделяемая в катодной области;  $d_{п.с}$  – диаметр плазменной струи;  $d_{а.п}$  – диаметр анодного пятна;  $d_{к.о}$  – диаметр катодной области

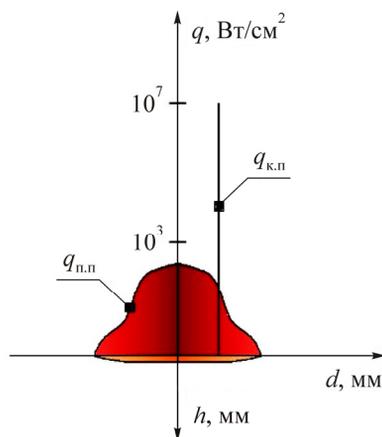


Рис. 2. Особенность теплопередачи в изделии при работе плазматрона на токе обратной полярности:  $q_{к.п}$  – тепловой поток от нестационарного катодного пятна;  $q_{п.п}$  – результирующий тепловой поток;  $d$  – диаметр воздействия теплового потока;  $h$  – глубина проплавления основы

Продолжая исследования, представленные в работах по оценке доли теплопередачи в изделие [23–25], на основе приведенных ниже регрессионных уравнений разработали динамическую модель теплопередачи в изделие при плазменной наплавке на токе прямой и обратной полярности и провели ее численную реализацию для стали 10Х18Н10Т.

$$P_{\text{и.п.п}} = 170,45 + 18,5I_{\text{д}} + 227,8Q_{\text{п}} - 311,1d_{\text{с}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{и.о.п}} = 886,9 + 20,4I_{\text{д}} + 364,6Q_{\text{п}} - 510,1d_{\text{с}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{и.о.п.п}} = 886,9 + 15,34I_{\text{д}} + 367,7Q_{\text{п}} - 510,1d_{\text{с}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{и.п.п}}$  – мощность, вводимая в изделие при работе на прямой полярности тока;  $P_{\text{и.о.п}}$  – мощность, вводимая в изделие при работе на обратной полярности тока;  $P_{\text{и.о.п.п}}$  – мощность, передаваемая изделию плазменной струей на токе обратной полярности.

### Математическая модель

Модель основана на решении тепловой задачи расплавления прищадочного материала плазменной дугой в трехмерной постановке. Основные уравнения для расчетов приведены в работах [16–21].

Математическая модель плазменной наплавки основана на решении дифференциального уравнения теплопроводности с подвижными координатами (уравнение переноса энергии):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + v \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{P}{C_{\text{eff}} \rho}, \quad (4)$$

где  $T$  – температура;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $v$  – скорость движения среды (совпадает со скоростью перемещения плазмотрона в области 1 на рис. 3 и со скоростью подачи проволоки в области 2);  $\rho$  – плотность.

Вклад конвективного переноса в расплаве учитывается формулой  $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_L (2 - T_L/T)$ , где  $\lambda_L$  – коэффициент теплопроводности жидкости;  $T_L$  – температура ликвидус.

Скрытая теплота плавления и кристаллизации учитывалась введением эффективной теплоемкости:

$$C_{eff} = C_0 + \frac{\exp\left[-\left(\frac{T - T_{melt}}{T_L - T_S}\right)^2\right]}{\sqrt{\pi}(T_L - T_S)} H_f, \quad (5)$$

где  $C_0$  – теплоемкость в зависимости от температуры;  $T_{melt}$  – температура плавления, которая принята средней в интервале от температуры солидуса  $T_S$  до температуры ликвидуса  $T_L$ ;  $H_f$  – скрытая теплота плавления.

Теплопередачу в изделие при работе плазмотрона от плазменного потока и приэлектродных процессов можно представить в следующем виде:

$$q = q_{п.п} + q_{к.п}, \quad (6)$$

$$q_{п.п} = \frac{k_{п.п} P}{2\pi R_{п.п}^2} \exp\left(-\frac{2R_{п.п}^2}{R_{п.п}^2}\right), \quad (7)$$

$$q_{к.п} = \frac{k_{к.п} P}{2\pi r_{к.п}^2} \exp\left(-\frac{2r_{к.п}^2}{r_{к.п}^2}\right), \quad (8)$$

где  $q$  – тепловой поток, подводимый в изделие плазменной дугой;  $q_{п.п}$  – тепловой поток, подводимый плазменным потоком;  $q_{к.п}$  – тепловой поток, отражающий совокупное тепловое воздействие катодных пятен (для сварки на прямой полярности  $k_{к.п} = 0$ );  $k_{п.п}$ ,  $k_{к.п}$  – коэффициенты, учитывающие распределение мощности между потоком плазмы и катодными пятнами, соответственно ( $k_{п.п} + k_{к.п} = 1$ ), рассчитываются с помощью статистической подмодели, описываемой уравнениями (1)–(3); плазменный поток описывается окружностью радиусом  $R_{п.п} = \sqrt{x^2 + y^2}$  с центром в начале координат; катодные пятна описываются окружностями радиусом  $r_{к.п} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  с центрами в координатах  $x_0$ ,  $y_0$ , определяемых случайным образом с помощью встроенной функции  $random(x_0(t), y_0(t))$ .

Задача решалась в трехмерной постановке. Вследствие симметрии для описания достаточно в расчетную область включить только половину всего объекта.

Дифференциальное уравнение переноса энергии является математической моделью целого класса явлений теплопроводности и имеет бесконечное множество решений. Чтобы получить из этого множества одно частное решение, характеризующее конкретный процесс, необходимо иметь дополнительные данные, не содержащиеся в исходном дифференциальном уравнении. Эти дополнительные условия, которые в совокупности с дифференциальным уравнением определяют конкретную задачу, называются условиями однозначности. Условия однозначности включают в себя геометрические условия, физические свойства тела, граничные и начальные условия.

Использовались граничные условия смешанного типа:

– на обрабатываемой поверхности изделия

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q_{п.п} + q_{к.п} - \alpha_0 (T - T_0); \quad (9)$$

– в плоскости симметрии

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0; \quad (10)$$

– на всех остальных поверхностях

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_0 (T - T_0), \quad (11)$$

где  $\alpha_0$  – эффективный коэффициент теплоотдачи, учитывающий потери тепла на конвекцию и излучение.

Форма наплавленного валика аппроксимировалась полуэллипсом. Объем наплавленного за единицу времени валика совпадает с объемом подаваемого присадочного материала  $\pi r_{пр}^2 v_{пр} = \pi a_в b_в v_{pl} / 2$ , где  $a_в$ ,  $b_в$  – ширина и высота наплаваемого валика соответственно;  $v_{pl}$  – скорость наплавки валика;  $v_{пр}$  – скорость подачи проволоки. Ширина наплаваемого валика  $a_в$  определяется методом последовательного приближения из условия ее равенства ширине.

### Численная реализация

Численная реализация осуществлялась с помощью пакета прикладного программного обеспечения COMSOL 4.4 (модуль Heat Transfer). Геометрия расчетной области представлена на рис. 3.

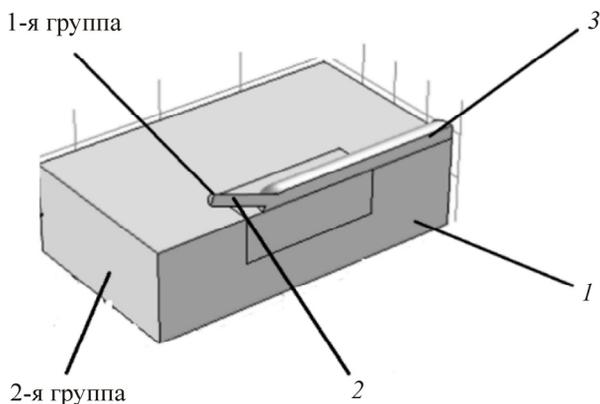


Рис. 3. Расчетная схема плазменной наплавки: 1 – изделие с наплавляемой поверхностью; 2 – присадочная проволока; 3 – наплавленный валик

Область имитации процесса покрывали трехмерной сеткой, вписанной в расчетную область. Размеры расчетной области: длина 70 мм, ширина 30 мм и толщина 10 мм. Сетка имела неравномерный шаг (рис. 4). В зоне воздействия дуги и подачи присадочной проволоки максимальный размер ячейки составлял 0,5 мм, в остальной области – 2,5 мм.

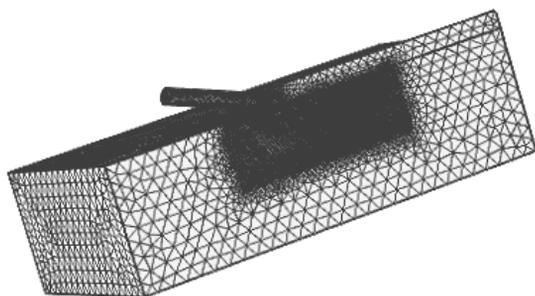


Рис. 4. Разбиение расчетной области на сетку

В качестве исходных параметров для расчетов использовались теплофизические характеристики материала, приведенные в таблице, и параметры режима наплавки, представленные ниже.

Принятые при расчете теплофизические характеристики  
наплавляемого материала

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Температура ликвидус	$T_L$	°С	1450
Температура солидус	$T_S$	°С	1520
Удельная теплоемкость	$C$	Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	500
Плотность	$\rho$	кг·м <sup>-3</sup>	7680
Теплопроводность	$\lambda$	Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	28,9
Удельная теплота плавления	$H_f$	кДж/кг	84

Режим плазменной наплавки

Номер образца	$I_d$ , А	$v_{пер}$ , м/ч	$G_p$ , л/мин	$G_z$ , л/мин	$v_{pl}$ , м/ч	$v_{пр}$ , м/ч
1	80	8,4	3,8	5,5	12	36

Решение динамической модели тепловых процессов при работе на обратной полярности тока с учетом воздействия нестационарных катодных пятен представлено на рис. 5.

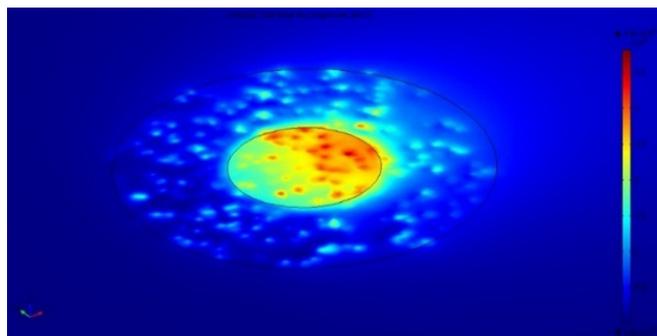


Рис. 5. Распределение плотности мощности при воздействии плазменной дуги обратной полярности с учетом воздействия нестационарных катодных пятен

Поскольку при получении слоистых материалов важным является снижение тепловложения в изделие, информация о тепловой обстановке на поверхности изделия играет важную роль. Расчетный термический цикл позволяет определить характер и степень завершенности фазовых превращений, прогнозировать конечную структуру и свойства

материала. Для объяснения механизма структурообразования построены термические циклы процесса плазменной наплавки на токе прямой и обратной полярности (рис. 6)

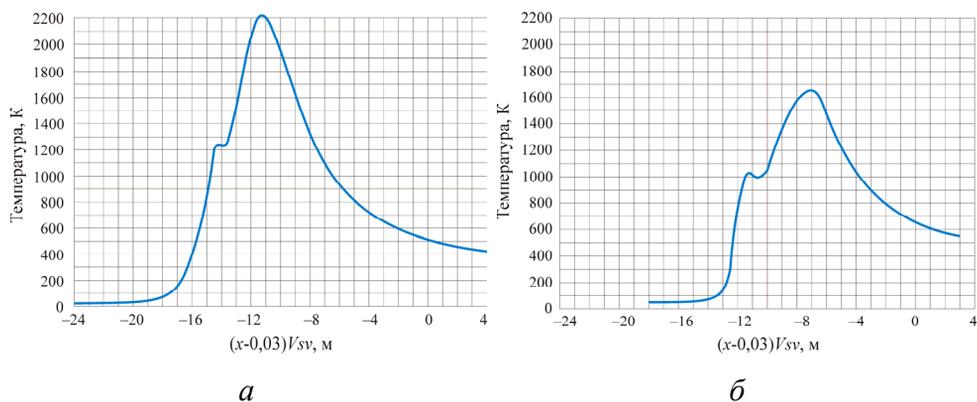


Рис. 6. Термический цикл нагрева-охлаждения поверхности при наплавке на прямой (*a*) и обратной полярности тока (*б*)

Анализ термических циклов позволяет сделать вывод о том, что использование при наплавке тока обратной полярности обеспечивает необходимые и достаточные условия для качественного сплавления материала, при этом значительно сокращается время пребывания металла выше температур кристаллизации. Происходит это благодаря резкому разогреву и расплавлению металла в тонком поверхностном слое при воздействии нестационарных катодных пятен.

Решение тепловой задачи и сравнение с экспериментальными данными осуществлялось на примере плазменной наплавки проволоки стали 10X18H10T на образец из того же материала (рис. 7).

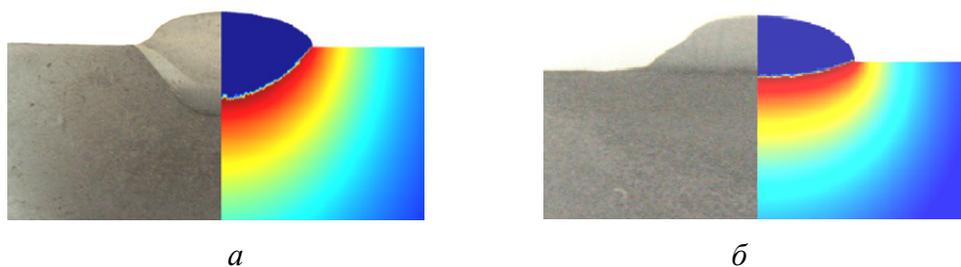


Рис. 7. Экспериментальные и рассчитанные поперечные сечения наплавленного валика при плазменной наплавке на прямой (*a*) и обратной полярности (*б*)

## Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ статистических данных значений теплопередачи в изделие при различных режимах работы плазмотрона на токе прямой и обратной полярности. Получены регрессионные уравнения, позволяющие оценить доли теплопередачи в изделие от плазменного потока и приэлектродных процессов.

2. Разработаны математические модели плазменной наплавки на токе прямой и обратной полярности с учетом теплопередачи в изделие от приэлектродных процессов.

3. Проведена численная реализация и верификация математических моделей плазменной наплавки на токе прямой и обратной полярности с учетом локального воздействия нестационарных катодных пятен для стали 10X18H10T.

4. Разработанные модели позволяют оценить геометрические параметры наплавляемого валика, термические циклы наплавки и осуществить предварительный выбор технологических параметров процесса наплавки. Погрешность в тестовых примерах не превысила 10 % для высоты и ширины валика и 20 % для определения глубины проплавления на обратной полярности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (RFMEFI58317X0022) в рамках проекта БРИКС.*

## Список литературы

1. Elliott J.A. Novel approaches to multiscale modelling in materials science // International Materials Reviews. – 2011. – Vol. 56. – P. 207–225.

2. Petrick I., Simpson T. 3D Printing disrupts manufacturing // Research-Technology Management. – 2013. – November-December. – P. 15–16.

3. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing / W.R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, S.J. Skerlos // J. Clean Prod. – 2007. – № 15. – P. 932–943.

4. Wray P. Additive manufacturing: turning manufacturing inside out // Amer. Ceram. Soc. Bull. – 2014. – Vol. 93, № 3. – P. 17–23.

5. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214, № 5. – P. 1102–1110.

6. Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting / H.B. Qi [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture. – 2006. – Vol. 220, № 11. – P. 1845–1853.
7. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L.E. Murr [et al.] // Journal of Materials Science & Technology. – 2012. – Vol. 28, № 1. – P. 1–14.
8. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: A review // J. Mater. Eng. Performance. – 2014. – Vol. 23, № 6. – P. 917–1928.
9. Hybrid layered manufacturing using tungsten inert gas cladding / S. Kapil, F. Legesse, P.M. Kulkarni, P. Joshi, A. Desai, K.P. Karunakaran // Progress in Additive Manufacturing. – 2016. – № 1(1). – P. 79–91.
10. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing / Y. Zhang, A. Bernard, R. Harik, K.P. Karunakaran // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2017. – Vol. 28, iss. 6. – P. 1393–1407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1057-1>
11. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2010. – № 3. – С. 43–45.
12. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч. 2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете MathCad. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 119 с.
13. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
14. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 572 с.
15. Математическое моделирование сварочных процессов в пакете Femlab 3.0 / Р.А. Мусин, Д.Н. Трушников, В.А. Шкурихин, Ю.А. Путин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 7–16.
16. Brent A.D., Voller V.R., Reid K.J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal // Numerical Heat Transfer. – 1988. – Vol. 13, iss. 3. – P. 297–318. DOI: [10.1080/10407788808913615](https://doi.org/10.1080/10407788808913615)
17. Kou S., Sun D.K. Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds // Metallurgical Transactions A. – 1985. – Vol. 16, iss. 2. – P. 203–213. DOI: [10.1007/BF02815302](https://doi.org/10.1007/BF02815302)
18. Kim C.H., Zhang W., DebRoy T. Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas metal arc fillet welding // Journal of Physics. – 2003. – Vol. 94, iss. 4. – P. 2667–2679. DOI: [10.1063/1.1592012](https://doi.org/10.1063/1.1592012)
19. De A., DebRoy T. Probing unknown welding parameters from convective heat transfer calculation and multivariable optimization // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2004. – Vol. 37, № 1. – P. 140–150. DOI: [10.1088/0022-3727/37/1/023](https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/1/023)
20. De A., DebRoy T. A smart model to estimate effective thermal conductivity and viscosity in weld pool // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95, iss. 9. – P. 5230–5240. DOI: [10.1063/1.1695593](https://doi.org/10.1063/1.1695593)

21. Rappaz M., Bellet M., Deville M. Numerical modeling in materials science and engineering. – Springer, 2003. – 540 p.
22. Щицын В.Ю., Язовских В.М. Влияние полярности на тепловложение в сопло плазмотрона // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 17–19.
23. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Струков Н.Н. Распределение энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2010. – № 3. – С. 13–16.
24. Тепловые характеристики при однодуговом и комбинированном режиме работы плазмотрона / П.С. Кучев, Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, А.Ю. Шилов // Сварка. Реновация. Триботехника / Нижнетагил. технол. ин-т (филиал) Урал. федер. ун-та. – Н. Тагил, 2013. – С. 46–49.
25. Неулыбин С.Д., Щицын Ю.Д., Белинин Д.С. Определение падения напряжения на анодном участке дуги при плазменной обработке металлов // Сварка и Диагностика. – 2016. – № 3(57). – С. 29–30.

### References

1. Elliott J.A. Novel approaches to multiscale modelling in materials science. *International Materials Reviews*, 2011, vol. 56, pp. 207–225.
2. Petrick I., Simpson T. 3D Printing disrupts manufacturing. *Research-Technology Management*, 2013. November-December, pp. 15–16.
3. Morrow W.R., Qi H., Kim I., Mazumder J., Skerlos S.J. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal Clean Prod.*, 2007, no. 15, pp. 932–943.
4. Wray P. Additive manufacturing: turning manufacturing inside out. *American Ceramic Society Bulletin*, 2014, vol. 93, no. 3, pp. 17–23.
5. Jhavar S., Jain N.K., Paul S.P. Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 5, pp. 1102–1110.
6. Qi H.B. et al. Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture*, 2006, vol. 220, no. 11, pp. 1845–1853.
7. Murr L.E. [et al.] Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 1–14.
8. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 917–1928.
9. Kapil S., Legesse F., Kulkarni P.M., Joshi P., Desai A., Karunakaran K.P. Hybrid layered manufacturing using tungsten inert gas cladding. *Progress in Additive Manufacturing*, 2016, no. 1(1), pp. 79–91.
10. Zhang Y., Bernard A., Harik R., Karunakaran K.P. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, vol. 28, iss. 6, pp. 1393–1407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1057-1>

11. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Possibilities of plasma processing of metals current of the return polarity]. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 43–45.
12. Iazovskikh V.M. Matematicheskoe modelirovanie i inzhenernye metody rascheta v svarke: v 2 ch. Ch. 2. Teplovye protsessy pri svarke i modelirovanie v pakete MathCad [Mathematical modeling and engineering methods of calculation in welding: in 2 h the P. 2. Thermal processes when welding and modeling in the Mathcad package]. Perm': Izdatel'stvo permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008. 119 p.
13. Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke [Calculations of thermal processes when welding]. Moscow: Mashgiz, 1951. 296 p.
14. Karkhin V.A. Teplovye protsessy pri svarke [Thermal processes when welding]. 2nd ed. Saint-Petersburg. Izdatel'stvo politekhnicheskogo universiteta, 2015, 572 p.
15. Musin R.A., Trushnikov D.N., Shkurikhin V.A., Putin Iu.A. Matematicheskoe modelirovanie svarochnykh protsessov v pake-te Femlab 3.0 [Mathematical modeling of welding processes in a Femlab 3.0 package]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 7–16.
16. Brent A.D., Voller V.R., Reid K.J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer*, 1988, vol. 13, iss. 3, pp. 297–318. DOI: 10.1080/10407788808913615
17. Kou S., Sun D.K. Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds. *Metallurgical Transactions A*, 1985, vol. 16, iss. 2, pp. 203–213. DOI: 10.1007/BF02815302
18. Kim C.H., Zhang W., DebRoy T. Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas metal arc fillet welding. *Journal of Physics*, 2003, vol. 94, iss. 4, pp. 2667–2679. DOI: 10.1063/1.1592012
19. De A., DebRoy T. Probing unknown welding parameters from convective heat transfer calculation and multivariable optimization. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, vol. 37, no. 1, pp. 140–150. DOI: 10.1088/0022-3727/37/1/023
20. De A., DebRoy T. A smart model to estimate effective thermal conductivity and viscosity in weld pool. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 95, iss. 9, pp. 5230–5240. DOI: 10.1063/1.1695593
21. Rappaz M., Bellet M., Deville M. Numerical modeling in materials science and engineering, *Springer*, 2003. 540 p.
22. Shchitsyn V.Iu., Iazovskikh V.M. Vliianie poliarnosti na teplo-vlozhenie v soplo plazmotrona [Influence of polarity on a heat investment in a plasmatron nozzle]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2002, no. 1, pp. 17–19.
23. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Strukov N.N. Raspredelenie energii szhati dugi pri rabote plazmotrona na toke obratnoi poliarnosti [Distribution of energy of the compressed arch during the work of a plasmatron on current of the return polarity]. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 13–16.
24. Kuchev P.S., Shchitsyn Iu.D., Belinin D.S., Shilov A.Iu. Teplovye kharakteristiki pri odnodugovom i kombinirovan-nom rezhime raboty plazmotrona [Thermal characteristics at the one-arc and combined plasmatron operating mode]. *Svarka. Renovatsiia*.

*Tribotekhnika*. Nizhnetagil'skii tekhnologicheskii institut (filial) Ural'skogo federal'nogo universiteta, 2013, pp. 46–49.

25. Neulybin S.D., Shchitsyn Iu.D., Belinin D.S. Opredelenie padeniia napriazheniia na anodnom uchastke dugi pri plazmennoi obrabotke metallov [Definition of power failure on the anode site of an arch at plasma processing of metals]. *Svarka i Diagnostika*, 2016, no. 3(57), pp. 29–30.

Получено 23.10.2017

### Об авторах

**Неулыбин Сергей Дмитриевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

**Пермяков Глеб Львович** (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.

**Трушников Дмитрий Николаевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

**Щицын Юрий Дмитриевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

**Беленький Владимир Яковлевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: mtf@pstu.ru.

**Белинин Дмитрий Сергеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru.

### About the authors

**Sergey D. Neulybin** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

**Gleb L. Permyakov** (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.

**Dmitry N. Trushnikov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

**Iuri D. Shchitsyn** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

**Vladimir Ya. Belenkiy** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: mtf@pstu.ru.

**Dmitry S. Belinin** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.