

УДК 621.791

Исследование температурно-временных условий процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций*

С.А. Эгамбердиев¹, А.В. Коновалов², Р.С. Михеев²,
И.Е. Калашников³, Л.И. Кобелева³

¹ ООО «Летит»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

³ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

Study of temperature-time conditions of arc surfacing process of the working layer of multilayer composites

S.A. Egamberdiev¹, A.V. Konovalov², R.S. Mikheev²,
I.E. Kalashnikov³, L.I. Kobeleva³

¹ LLC Letit

² Bauman Moscow State Technical University

³ Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences

Проведено исследование температурно-временных условий процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций. В программном комплексе ABAQUS/CAE разработана математическая модель, позволяющая описывать температурное поле и определять температуру нагрева любой точки подложки при дуговой наплавке неплавящимся электродом в среде инертных газов рабочего слоя из композиционного материала на основе сплава АК12М2МгН, содержащего 10 % масс. частиц ортофазы (Ti₂NbAl) размером не более 100 мкм. Подложкой в форме пластины размером 100×100×11 мм служила биметаллическая композиция, состоящая из слоев низкоуглеродистой стали 20 и баббита Б83, толщиной 8 и 3 мм соответственно. При моделировании объемного источника нагрева применена модель двойного эллипсоида, в которой источник нагрева представлял собой комбинацию двух эллипсоидальных источников. Валидация математической модели показала, что она характеризуется удовлетворительной сходимостью (неопределенность не более 10 % при погонной энергии дуговой наплавки 840 Дж/мм).

EDN: JVFXKH, <https://elibrary/jvfxkh>

Ключевые слова: температурное поле, моделирование, дуговая наплавка, многослойные композиции, композиционные материалы

The temperature-time conditions of arc surfacing process of the working layer of multilayer composites have been investigated. A mathematical model has been developed in the ABAQUS CAE software package. It allows to describe the thermal field and determine the heating temperature of any point of the substrate during arc surfacing with a non-consumable electrode in an inert gas environment of a working layer made of a composite material based on the Al12Si2CuMgNi alloy, containing 10 wt.% of ortho-phase particles (Ti₂NbAl) no more than 100 μm in size. The substrate in the form of a plate measuring 100×100×11 mm was a bimetallic composition consisting of layers of low-carbon steel 20

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00319 25 00.

and babbitt B83, with a thickness of 8 and 3 mm, respectively. When modeling a volumetric heat source, a double ellipsoid model was used, in which the heat source was a combination of two ellipsoidal sources. Validation of the mathematical model showed that it was characterized by satisfactory convergence (uncertainty of no more than 10% with a linear energy of the surfacing process of 840 J/mm).

EDN: JVFXKH, <https://elibrary/jvfxkh>

Keywords: thermal field, modelling, arc surfacing, multilayer composites, composite materials

Конструкция современного промышленного оборудования включает в себя опорные узлы трения в виде подшипников скольжения, которые часто состоят из стального корпуса и антифрикционного рабочего слоя, т. е. являются биметаллическими [1–3].

Ресурс и гарантированный срок эксплуатации таких ответственных изделий во многом определяется свойствами антифрикционного слоя, выполненного преимущественно из сплавов системы Sn–Sb–Cu (баббитов) [4]. Однако подобные сплавы, например баббиты Б83, имеют невысокие значения усталостной прочности, следствием чего является относительно низкая износостойкость [5–7]. Возрастающие требования к антифрикционным сплавам, к наиболее значимым из которых относится повышение допустимых рабочих нагрузок и скоростей скольжения, требуют решения задачи по поиску способов улучшения их свойств или применения альтернативных функциональных материалов.

Одним из возможных решений подобной задачи является опробование новых композиционных материалов (КМ) с матрицей из сплавов алюминия в качестве антифрикционного рабочего слоя подшипников скольжения. КМ — гетерофазные материалы, состоящие из высокопластичной металлической матрицы и равномерно распределенных в ней тугоплавких высокомодульных наполнителей микронного размера. Подобное сочетание обеспечивает повышение усталостной прочности и улучшение триботехнических характеристик [8–11].

Поэтому применение КМ на основе алюминия в качестве рабочего слоя может изменить условия эксплуатации и существенно расширить область применения подшипников скольжения. Выбранная функциональная организация такой многослойной композиции благодаря наличию промежуточного слоя из баббита позволит ограничить химическое взаимодействие между материалами подложки и рабочего слоя (сталью и алюминиевой матрицей КМ) и

исключить появление слоя хрупких интерметаллидов Fe_xAl_y [12–14].

Другой важной особенностью предлагаемой функциональной организации слоев является ее универсальность, заключающаяся в возможности получения подобных многослойных композиций не только при изготовлении, но и при проведении плановых ремонтов, связанных с восстановлением изношенного рабочего слоя после достижения гарантированного срока эксплуатации подшипников скольжения.

Дуговая наплавка неплавящимся электродом в среде инертных газов является производительным и экономичным процессом нанесения функциональных покрытий из КМ [15, 16], вследствие чего ее применение при изготовлении или ремонте подшипников скольжения представляется весьма перспективным.

В данном процессе источником нагрева служит горящая между закрепленным в сварочной горелке 3 неплавящимся (вольфрамовым) электродом 4 и биметаллической подложкой 5 электрическая дуга 2 (рис. 1). Благодаря выделяемой теплоте происходит плавление поверхностного баббитового слоя биметаллической подложки и образуется сварочная ванна. Наплавка осуществляется подачей прутка из КМ на основе алюминия 1 в сварочную ванну, где он расплавляется и формирует рабочий слой 6 многослойной композиции.

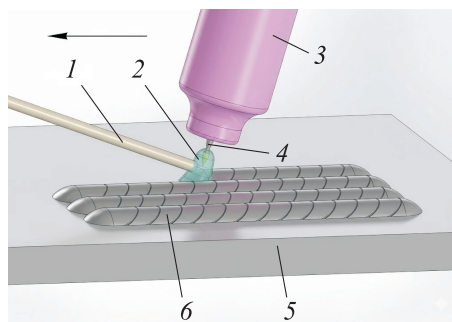


Рис. 1. Схема дуговой наплавки неплавящимся электродом в среде инертных газов рабочего слоя многослойной композиции (стрелкой указано направление наплавки)

При этом важны температурно-временные условия дуговой наплавки, определяющие характер изменяющегося во времени температурного поля, возникающего в биметаллической подложке. Именно оно определяет размеры областей, нагреваемых до той или иной максимальной температуры, и термические циклы нагрева и охлаждения отдельных точек, что имеет решающее значение при оценке размеров зоны проплавления промежуточного слоя из легкоплавкого сплава системы Sn–Sb–Cu.

Кроме того, температурное поле воздействует на структуру и свойства металла в зоне термического влияния, на термические напряжения в изделии и т. д. [16–20]. Поэтому оценка, анализ и учет температурного поля являются необходимыми условиями при выборе технологических параметров режимов нанесения рабочего слоя многослойных композиций, обеспечивающих отсутствие полного проплавления промежуточного слоя из баббита.

Экспериментальные методы оценки температурного поля зачастую сложны и затруднительны, а их применение в условиях дуговой наплавки требует специализированного измерительного оборудования, что не всегда экономически целесообразно. В связи с этим для решения подобных задач используют математические методы моделирования тепловых процессов, опирающиеся на современные вычислительные возможности и технические инструменты. Они позволяют определять свойства и характер поведения объекта моделирования в сложных комбинированных условиях дуговой наплавки или сварки, сочетающих высокие температурные градиенты, фазовые переходы в материалах и изменения их свойств в зависимости от температуры, а также быстротечность процессов, недоступных при использовании иных подходов.

Цель работы — создание математической модели, позволяющей адекватно описывать температурное поле, характерное для дуговой наплавки неплавящимся электродом в среде

инертных газов рабочего слоя многослойных композиций.

Материалы и методы математического моделирования процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций. В качестве подложки применяли биметаллические образцы в форме пластин размером 100×100 мм. Для их изготовления на заготовки толщиной 8 мм, выполненные из конструкционной стали 20 (с химическим составом, % масс.: С — 0,17...0,24; Si — 0,17...0,37; Mn — 0,35...0,65; Cr — не более 0,25; Fe — остальное по ГОСТ 1050–2013), методом литья наносили слой толщиной 3,0 мм из баббита Б83, который имел следующий химический состав, % масс.: Sb — 10...12; Cu — 5,5...6,5; Sn — остальное по ГОСТ 1320–74 [21].

Для разработки математической модели, позволяющей построить температурное поле в биметаллической подложке при дуговой наплавке рабочего слоя КМ на основе алюминия, использовали программный комплекс ABAQUS/CAE (далее ПК ABAQUS). ПК ABAQUS имеет широкое промышленное применение, так как позволяет решать сложные задачи, связанные с раскрытием и описанием физических процессов, возникающих в металлах при наплавке или сварке методом конечных элементов [22–25].

Присадочным материалом служили изготовленные путем экструзии прутки диаметром 3 мм и длиной 300 мм из КМ на основе алюминиевого сплава АК12М2МгН (со следующим химическим составом, % масс.: Si — 11...13; Cu — 1,5...3,0; Mn — 0,3...0,6; Mg — 0,85...1,35; Zn — менее 0,5; Ti — 0,05...1,20; Ni — 0,3...1,3; Fe — менее 0,8; Cr — менее 0,2; Sn — менее 0,1; Al — остальное по ГОСТ 1583–79), содержащего 10 % масс. частиц ортофазы (Ti₂NbAl) размером не более 100 мкм.

Для расчета параметров и построения температурного поля задавали следующие исходные данные:

Таблица 1

Технологические параметры режима дуговой наплавки

Сила сварочного тока $I_{св}$, А	Напряжение на дуге U_d , В	Скорость наплавки v_n , мм/с	Расход защитного газа V_{Ag} , л/мин	Погонная энергия Q , Дж/мм
100	12	1,4	10...12	600
120	12	1,4	10...12	720
140	12	1,4	10...12	840

- геометрические размеры объекта моделирования (биметаллической пластины);

- параметры тепловой нагрузки источника нагрева (электрической дуги), определяемые режимом дуговой наплавки (табл. 1);

- граничные условия для моделирования;

- вспомогательные параметры для моделирования.

В качестве параметра тепловой нагрузки электрической дуги использовали погонную энергию Q , характеризующую количество тепловой энергии, затраченной на единицу длины наплавленного слоя (см. табл. 1). Погонную энергию определяли по формуле

$$Q = k \frac{U_d I_{св}}{v_n}, \text{ Дж/мм},$$

где k — безразмерный эффективный коэффициент полезного действия нагрева изделия в процессе дуговой наплавки неплавящимся электродом в среде инертных газов.

Вспомогательными параметрами для моделирования являлись зависимости коэффициента теплопроводности и удельной (массовой) теплоемкости вещества от температуры нагрева для исследуемых материалов при постоянных значениях давления и объема. Их добавление в базу данных ПК ABAQUS позволило учесть

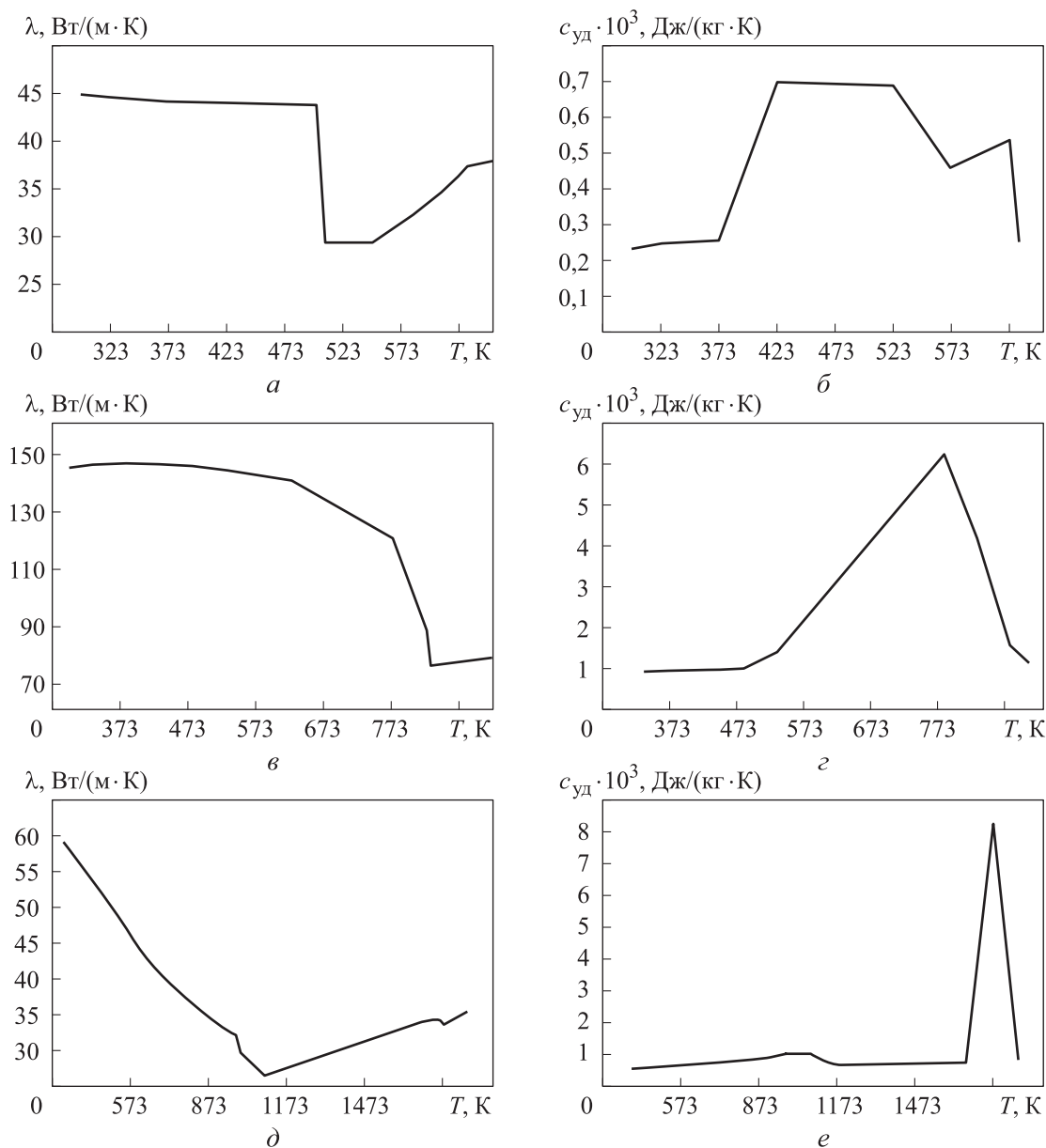


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплопроводности λ (а, в, д) и удельной теплоемкости $c_{уд}$ (б, з, е) от температуры нагрева T баббита Б83 (а, б), алюминиевого сплава АК12М2МгН (в, з) и стали 20 (д, е)

скрытую теплоту, высвобождаемую термодинамической системой при изменении состояния. Соответствующие зависимости для конструкционной стали 20, баббита Б83 и матричного алюминиевого сплава АК12М2МгН, полученные с помощью программного пакета для моделирования свойств многокомпонентных сплавов JMatPro, приведены на рис. 2.

Математическая модель процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций. При моделировании биметаллический образец рассматривали как единое массивное тело, образованное изотропными материалами (сталью 20 и баббитом Б83). По его поверхности перемещался непрерывный нормально-круговой источник нагрева (q_2), которым являлась электрическая дуга. Кроме того, между поверхностью нагретого массивного тела и внешней средой происходит теплообмен (q_h).

Перенос теплоты и неравномерность нагрева биметаллической подложки в условиях дуговой наплавки неплавящимся электродом в среде инертных газов можно описать нелинейным дифференциальным уравнением теплопроводности [18]

$$c_{уд}\rho \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\lambda_y \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(\lambda_z \frac{dT}{dz} \right) + q_2(x, y, z, t), \quad (1)$$

где $c_{уд}\rho$ — распределение объемной теплоемкости (произведение удельной теплоемкости $c_{уд}$ и плотности ρ) материала в зависимости от температуры нагрева T ; λ_x , λ_y и λ_z — распределение теплопроводности материала по осям декартовой системы координат x , y и z в зависимости от температуры нагрева T ; $q_2(x, y, z, t)$ — распределение удельной мощности источника нагрева в пространстве и во времени t .

Так как решение нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности (1) является затруднительным, при моделировании прибегали к различным упрощениям. В частности, вводили граничные условия, определяющие распределение температуры нагрева в начальный момент времени. Кроме того, считали, что точки на кривой распределения температуры нагрева границы между массивным телом и непрерывным нормально-круговым источником нагрева могут иметь любое значение

по оси ординат при заданном градиенте (граничное условие второго рода). Теплообмен между поверхностью нагретого массивного тела и внешней средой может происходить по механизмам конвекции и излучения (граничное условие третьего рода) [26].

В качестве допущения принято, что суммарная теплоотдача с поверхности массивного тела определяется параметрами конвекции:

$$q_h = H(T - T_{cp}), \text{ Вт/см}^2,$$

где q_h — тепловой поток (теплообмен) с поверхности массивного тела; H — коэффициент теплоотвода с поверхности массивного тела, Вт/(см²·К); T — фактическая температура поверхности массивного тела, К; T_{cp} — температура внешней среды, $T_{cp} = 293$ К.

При дуговой наплавке неплавящимся электродом в среде инертных газов профиль поперечного сечения кратера максимально приближен к эллиптической форме. Эта особенность позволила описать непрерывный нормально-круговой источник нагрева с помощью эллиптических моделей [27].

Среди них предложенная Я.А. Голдаком модель двойного эллипсоида, наиболее широко применяемая для характеристики объемного тепловыделения в сварочной ванне движущимся источником нагрева при моделировании процессов наплавки и сварки [28–31]. Для такой модели характерен комбинированный источник нагрева, состоящий из двух эллипсоидальных источников. Другая особенность модели двойного эллипсоида заключается в возможности учета несимметричного объемного теплового потока, возникающего в условиях дуговой наплавки.

Таким образом, модель, выбранная для описания непрерывного нормально-кругового источника нагрева, позволяет построить распределение теплоты по трем осям координат в объеме двойного эллипсоидального тела (рис. 3).

Согласно модели двойного эллипсоида, распределение теплоты в любой точке с координатами (x, y, z) описывается следующими выражениями:

• при $z \geq 0$ (координата расположена внутри передней части эллипсоида)

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f E}{\pi a_f b c \sqrt{\pi}} \exp \left(-3 \frac{x^2}{a_f^2} \right) \left(-3 \frac{y^2}{b^2} \right) \left(-3 \frac{z^2}{c^2} \right);$$

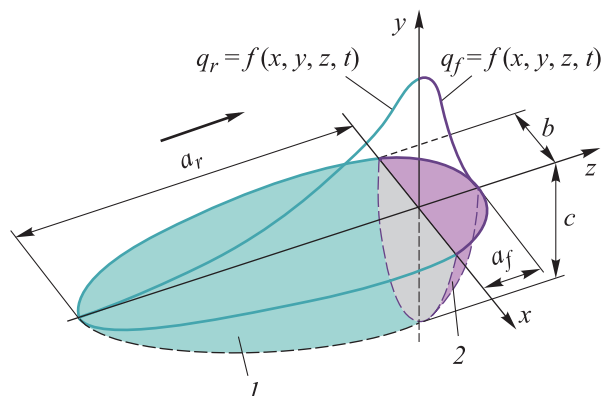


Рис. 3. Модель двойного эллипсоида для характеристики источника нагрева: 1 и 2 — задняя и передняя части эллипсоида; стрелка указывает направление движения источника нагрева

• при $z < 0$ (координата расположена внутри задней части эллипсоида)

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r E}{\pi a_r b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a_r^2}\right) \left(-3\frac{y^2}{b^2}\right) \left(-3\frac{z^2}{c^2}\right),$$

где f_f и f_r — коэффициенты пропорциональности, характеризующие распределение энергии в передней и задней частях эллипсоида; E — энергия источника нагрева; a_r и a_f — параметры, определяющие геометрические размеры передней и задней частей эллипсоида соответственно; b и c — ширина и глубина эллипсоида.

Коэффициенты пропорциональности вычисляли по следующим выражениям:

$$f_f = \frac{2}{1 + a_r/a_f};$$

$$f_r = \frac{2}{1 + a_f/a_r}.$$

Для обеспечения возможности чтения конфигурационного скрипта разработанной математической модели двойного эллипсоида применяли язык программирования Python. Неизменными при моделировании считали форму и размеры массивного тела, параметры режима дуговой наплавки, температуру внешней среды $T_{cp} = 293$ К и исходную температуру нагрева массивного тела $T = 293$ К.

Разработанная математическая модель позволила описать и построить температурные поля, характерные для максимальных температур нагрева биметаллической подложки, при формировании рабочего слоя КМ на основе

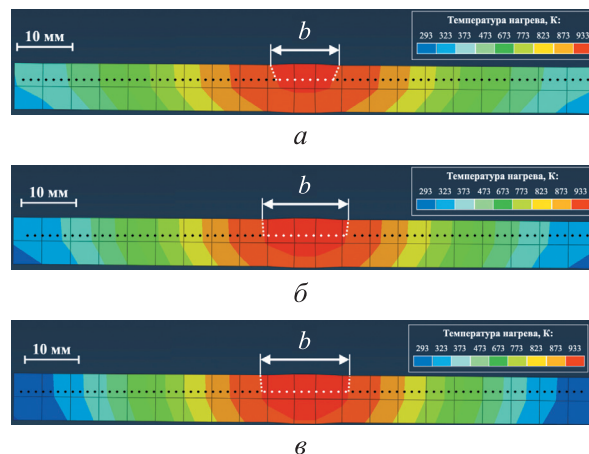


Рис. 4. Температурные поля, характерные для максимальных температур нагрева биметаллической подложки при погонной энергии $Q = 600$ (а), 720 (б) и 840 Дж/мм (в)

алюминия путем дуговой наплавки неплавящимся электродом в среде инертных газов, показанные на рис. 4. Видно, что с ростом погонной энергии закономерно увеличивается ширина наплавленного валика b , выделенного светлой пунктирной линией. При этом следует отметить, что согласно полученной математической модели процесс наплавки с погонной энергией $600...840$ Дж/мм приводит к проплавлению всей толщины промежуточного слоя из баббита Б83 и формированию наплавленного валика из КМ, характеризуемого постоянной глубиной проплавления, составляющей 3 мм.

Валидация математической модели процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций. Валидация разработанной математической модели процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций заключалась в проведении серии экспериментов по нанесению композиционных валиков с матрицей из алюминиевого сплава АК12М2МгН на биметаллическую подложку системы сталь — баббит с целью подтверждения полученных расчетным методом результатов. Дуговую наплавку неплавящимся электродом в среде инертных газов осуществляли в соответствии с технологическими параметрами режима, указанными в табл. 1.

Чтобы определить геометрические размеры наплавленных валиков, образцы разрезали в поперечном направлении и последовательно шлифовали наждачной бумагой разной зернистости ($120, 240, 600, 1200, 1500$ и 3000), после

чего полировали для удаления царапин. Ширину наплавленного валика b , мм, и глубину проплавления h , мм, представляющую собой глубину расплавляемой поверхности биметаллической подложки, измеряли в программе Screen Ruler с учетом масштабного коэффициента.

Макроструктуры поперечных сечений наплавленных КМ валиков, полученных при погонной энергии $Q = 600, 720$ и 840 Дж/мм, приведены на рис. 5. Видно, что ранее отмеченная закономерность, заключающаяся в увеличении ширины наплавленного валика b с ростом погонной энергии, сохраняется. Глубина проплавления h в диапазоне погонной энергии $Q = 600 \dots 840$ Дж/мм изменяется в интервале $2,1 \dots 2,9$ мм, что связано с механическим воздействием дуги на сварочную ванну, пропорциональным квадрату силы тока, приводящим к вытеснению жидкого металла из-под основания сварочной дуги. При этом характерного для разработанной математической модели полного проплавления промежуточного слоя из баббита Б83 толщиной 3,0 мм по результатам эксперимента не наблюдается.

Результаты измерения геометрических размеров наплавленных валиков из КМ на основе

алюминиевого сплава АК12М2МгН, полученные экспериментальным путем, сопоставляли с таковыми, рассчитанными аналитически. Значения неопределенности или расхождения между ними определяли по формуле

$$P = 100 \left(\frac{S_M - S_3}{S_M} \right),$$

где S_M и S_3 — площади поперечного сечения наплавленного валика, определенные путем моделирования и эксперимента, мм².

Экспериментальные и расчетные результаты в виде геометрических характеристик наплавленных валиков, а также их неопределенность или расхождение в зависимости от погонной энергии, приведены в табл. 2. Видно, что неопределенность геометрических характеристик наплавленных валиков находится в диапазоне $3,3 \dots 30,0$ %. Причем наибольшие значения неопределенности (10,3 % по ширине и 30,0 % по глубине проплавления) характерны для валиков, сформированных при минимальной погонной энергии дуговой наплавки $Q = 600$ Дж/мм.

Увеличение погонной энергии до 840 Дж/мм приводит к уменьшению неопределенности

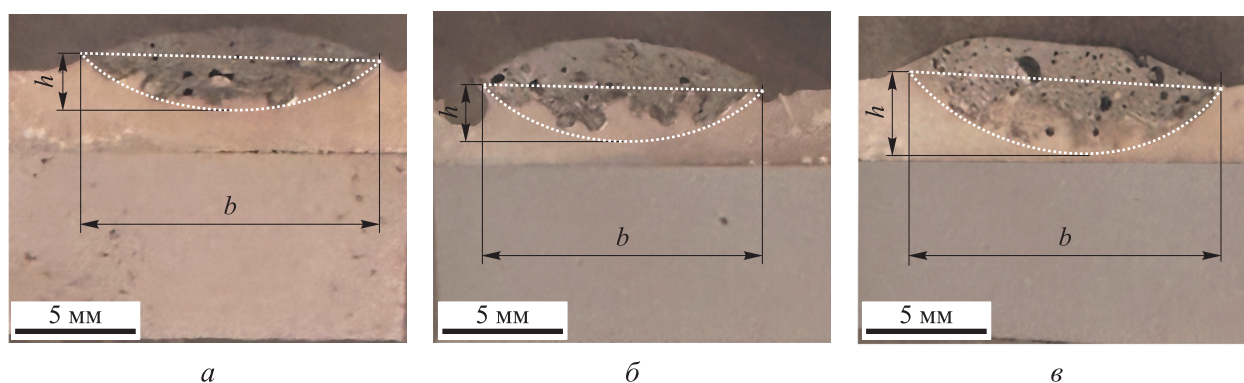


Рис. 5. Макроструктуры наплавленных КМ валиков при погонной энергии $Q = 600$ (а), 720 (б) и 840 Дж/мм (в)

Таблица 2

Значения геометрических характеристик наплавленного валика и их неопределенности при различных значениях погонной энергии дуговой наплавки

Погонная энергия Q , Дж/мм	Геометрические характеристики наплавленного валика, мм		Неопределенность P , % параметров	
	b	h	b	h
600	11,3/12,6	2,1/3,0	10,3	30,0
720	12,9/14,3	2,5/3,0	9,7	16,7
840	14,1/15,4	2,9/3,0	8,5	3,3

Примечание. В числителе дроби указаны экспериментальные значения, в знаменателе — расчетные.

геометрических размеров нанесенных валиков до удовлетворительных показателей. В частности, неопределенность значений для глубины проплавления снижается с 30,0 до 3,3 % (почти в 10 раз), а для ширины валика с 10,3 до 8,5 %. Это может быть обусловлено изменением соотношения между механизмами конвекции и излучения, определяющими характер взаимодействия массивного тела с внешней средой, при изменении погонной энергии дуговой наплавки.

Результаты расчета по предложенной математической модели показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными (при погонной энергии процесса 840 Дж/мм расхождение составило не более 10 %). Ее применение (благодаря определению характера температурно-временных условий, формы, размеров зон нагрева и геометрических характеристик наплавленных валиков) может упростить выбор параметров дуговой наплавки неплавящимся электродом в среде инертных газов рабочего слоя из КМ многослойных композиций. Следовательно, разработанную математическую модель можно рекомендовать для решения практических вопросов, возникающих при разработке технологических процессов дуговой наплавки.

Выводы

1. Проведено исследование температурно-временных условий процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций. С помощью ПК ABAQUS разработана математическая модель, позволяющая строить температурное поле и определять температуру нагрева любой точки биметаллической подложки системы сталь 20 — баббит Б83 при дуговой наплавке неплавящимся электродом в среде инертных газов рабочего слоя из КМ на основе сплава АК12М2МгН, содержащего 10 % масс. частиц ортофазы (Ti2NbAl) размером не более 100 мкм.

2. Валидация математической модели показала удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных (расхождение составило не более 10 % при погонной энергии дуговой наплавки 840 Дж/мм).

3. Применение разработанной модели позволит выбирать технологические параметры режима дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций, исключаяющие полное проплавление промежуточного слоя баббита и химическое взаимодействие между материалами подложки и рабочего слоя (сталью и алюминиевой матрицей КМ).

Литература

- [1] Памфилов Е.А., Капустин В.В., Шевелева Е.В. и др. Повышение износостойкости узлов скольжения технологических машин. *Вестник Машиностроения*, 2022, № 4, с. 38–42.
- [2] Peng B., Hang Z., Jie J. et. al. Evolution of interface and mechanical performance of Cu-xAl/1010 steel bimetal laminated composite. *J. Alloy. Compd.*, 2023, vol. 935-2, art. 168121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168121>
- [3] Perini M., Silvestri A.T. Multi-material bronze-steel plain bearings produced by laser-directed energy deposition. *Rapid Prototyp. J.*, 2024, vol. 30, no. 11, pp. 325–335, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2023-0382>
- [4] Xu F., Ding N., Li N. et. al. A review of bearing failure modes, mechanisms and causes. *Eng. Fail. Anal.*, 2023, vol. 152, art. 107518, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107518>
- [5] Leszczynska-Madej B., Madej M., Hrabia-Wisnios J. Effect of chemical composition on the microstructure and tribological properties of Sn-based alloys. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2019, vol. 28, no. 7, pp. 4065–4073, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04154-4>
- [6] Wu T.Z., Zhang S., Wang Z.Y. et. al. Wear behavior of graphite self-lubricating babbitt alloy composite coating on 20 steel prepared by laser cladding. *Eng. Fail. Anal.*, 2022, vol. 141, art. 106698, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106698>
- [7] Li R., Xue S., Hu F. et. al. Failure analysis of large babbitt alloy seal rings in hydrogen-cooled generators. *Eng. Fail. Anal.*, 2025, vol. 179, art. 109832, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109832>
- [8] Mikheev R.S., Kalashnikov I.E. Aluminium matrix hybrid composite materials reinforced with carbides and intermetallics. *E3S Web Conf.*, 2023, vol. 376, art. 01011, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601011>

- [9] Du A., Lattanzi L., Jarfors A.E.W. et. al. Role of matrix alloy, reinforcement size and fraction in the sliding wear behaviour of Al-SiCp MMCs against brake pad material. *Wear*, 2023, vol. 530-531, art. 204969, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204969>
- [10] Kalashnikov I.E., Mikheev R.S., Kobeleva L.I. et. al. Study of the structure of filler composite wire for surfacing wear-resistant layers. *Inorg. Mater.*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 456–463, doi: <https://doi.org/10.1134/S0020168524700717>
- [11] Karloopia J., Chauhan K., Katiyar J.K. et. al. Abrasive wear characteristics of in-situ synthesized Al-12%Si/TiB metal matrix composites under room temperature conditions. *Tribol. Int.*, 2025, vol. 212, art. 110980, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110980>
- [12] Mikheev R.S., Kalashnikov I.E., Bykov P.A. et. al. Investigation of the structure and properties of aluminum-matrix composite coatings for tribotechnical purposes formed on steel substrates. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2275, art. 012007, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2275/1/012007>
- [13] Liu J., Wu B., Wang Z. et. al. Microstructure and mechanical properties of aluminum-steel dissimilar metal welded using arc and friction stir hybrid welding. *Mater. Des.*, 2023, vol. 225, art. 111520, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111520>
- [14] Wu D., Cai X., Li H. et. al. Interface characteristics and mechanical behavior of aluminum alloy/ ultrahigh-strength steel plasma arc welded joint. *J. Mater. Res. Technol.*, 2025, vol. 34, pp. 1057–1067, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.101>
- [15] Bintoro S.R., Surojo E., Muhyat N. et. al. A comprehensive review on fusion arc welding of aluminum matrix composites: challenges, mechanisms, and advancements. *Results Eng.*, 2025, vol. 27, art. 106257, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106257>
- [16] Thongsong P., Raksat C., Wattanajitsiri V. et. al. Interpass temperature control for enhancing tribological and microstructural properties of multi-pass GTAW aluminum-clad SCM440 steel. *Results Eng.*, 2025, vol. 27, art. 107043, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107043>
- [17] Munoz-Escalona P., Walker A., Ogwu A. et. al. Comparison of empirical and predicted substrate temperature during surface melting of microalloyed steel using TIG technique and considering three shielding gases. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, vol. 477, pp. 179–183, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.014>
- [18] Mikheev R.S., Kalashnikov I.E. Using mathematical methods for analysis of temperature-time conditions of arc surfacing upon manufacturing of steel-aluminum compositions. *Inorg. Mater.*, 2022, vol. 58, no. 15, pp. 1594–1603, doi: <https://doi.org/10.1134/S0020168522150092>
- [19] Wang X., Zhang J., Tashiro S. et. al. Study of molten pool dynamics in keyhole TIG welding by numerical modelling. *J. Manuf. Process.*, 2024, vol. 119, pp. 827–841, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.113>
- [20] Thankappan K., Santhi J.R., Vijayalakshmi T.I. Comparative evaluation of machine learning models for predicting clad bead geometry in gas metal arc welding. *Knowl.-Based Syst.*, 2025, vol. 329-A, art. 114296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.114296>
- [21] Кузнецов Р.В. Некоторые проблемы унификации судовых редукторных передач. *Труды Крыловского государственного научного центра*, 2023, № 4, с. 101–108.
- [22] Rubino F., Tucci F., Caruso S. et. al. An integrated numerical approach to simulate the filler deposition and the shape distortions in gas metal arc welding. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2023, vol. 45, pp. 26–34, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.05.010>
- [23] Schaeueberg A.S., Rodriguez R.Q., Almeida D.T. et. al. Evaluating thermal gradient in GMAW welding process with a novel heat source model: numerical and experimental approach. *Eng. Struct.*, 2024, vol. 318, art. 118724, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118724>
- [24] Yi T., Li C., Wang X. et. al. Experimental and numerical simulation of plastic flow behavior in friction stir welding of 2519 aluminum alloy via TIG arc. *Mater. Today Commun.*, 2025, vol. 47, art. 113246, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113246>
- [25] Daadkhah A., Khorrami M.S., Kashani-Bozorg S.F. et. al. The effect of heat input on the residual stress distribution in gas-metal arc welding of carbon steel: Simulation and experimental methods. *J. Adv. Join. Process.*, 2025, vol. 12, art. 100333, <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100333>

- [26] Коновалов А.В. и др. *Теория сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 748 с.
- [27] Goldak J., Akhlaghi M. Computation welding mechanics. *Springer*, 2005. 322 p.
- [28] Wang Y., Li S., Zhang H. et. al. Study on the hydrogen diffusion behavior in pipeline girth welds based on segmented moving double ellipsoid heat source model. *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 2025, vol. 217, art. 105556, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105556>
- [29] Jafarzadegan M., Taghiabadi R., Mofid M.A. Using double ellipsoid heat source model for prediction of HAZ grain growth in GTAW of stainless steel 304. *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 31, art. 103411, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103411>
- [30] Zhu K., Liu W., Ai B. et. al. Analytical model for weld penetration prediction in finite plates with time-varying heat sources. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2026, vol. 256-1, art. 127921, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127921>
- [31] Qu H., Cai Y. Improved semantic segmentation method for weld penetration prediction of TIG welding with dual ellipsoid heat source. *Manuf. Lett.*, 2024, vol. 41-S, pp. 310–319, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.037>

References

- [1] Pamfilov E.A., Kapustin V.V., Sheveleva E.V. et al. Increase of wear resistance of technological machines sliding units. *Vestnik Mashinostroeniya*, 2022, no. 4, pp. 38–42. (In Russ.).
- [2] Peng B., Hang Z., Jie J. et. al. Evolution of interface and mechanical performance of Cu-xAl/1010 steel bimetal laminated composite. *J. Alloy. Compd.*, 2023, vol. 935-2, art. 168121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168121>
- [3] Perini M., Silvestri A.T. Multi-material bronze-steel plain bearings produced by laser-directed energy deposition. *Rapid Prototyp. J.*, 2024, vol. 30, no. 11, pp. 325–335, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2023-0382>
- [4] Xu F., Ding N., Li N. et. al. A review of bearing failure modes, mechanisms and causes. *Eng. Fail. Anal.*, 2023, vol. 152, art. 107518, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107518>
- [5] Leszczynska-Madej B., Madej M., Hrabia-Wisnios J. Effect of chemical composition on the microstructure and tribological properties of Sn-based alloys. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2019, vol. 28, no. 7, pp. 4065–4073, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04154-4>
- [6] Wu T.Z., Zhang S., Wang Z.Y. et. al. Wear behavior of graphite self-lubricating babbitt alloy composite coating on 20 steel prepared by laser cladding. *Eng. Fail. Anal.*, 2022, vol. 141, art. 106698, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106698>
- [7] Li R., Xue S., Hu F. et. al. Failure analysis of large babbitt alloy seal rings in hydrogen-cooled generators. *Eng. Fail. Anal.*, 2025, vol. 179, art. 109832, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109832>
- [8] Mikheev R.S., Kalashnikov I.E. Aluminium matrix hybrid composite materials reinforced with carbides and intermetallics. *E3S Web Conf.*, 2023, vol. 376, art. 01011, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601011>
- [9] Du A., Lattanzi L., Jarfors A.E.W. et. al. Role of matrix alloy, reinforcement size and fraction in the sliding wear behaviour of Al-SiCp MMCs against brake pad material. *Wear*, 2023, vol. 530–531, art. 204969, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204969>
- [10] Kalashnikov I.E., Mikheev R.S., Kobeleva L.I. et. al. Study of the structure of filler composite wire for surfacing wear-resistant layers. *Inorg. Mater.*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 456–463, doi: <https://doi.org/10.1134/S0020168524700717>
- [11] Karloopia J., Chauhan K., Katiyar J.K. et. al. Abrasive wear characteristics of in-situ synthesized Al-12%Si/TiB metal matrix composites under room temperature conditions. *Tribol. Int.*, 2025, vol. 212, art. 110980, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110980>
- [12] Mikheev R.S., Kalashnikov I.E., Bykov P.A. et. al. Investigation of the structure and properties of aluminum-matrix composite coatings for tribotechnical purposes formed on steel substrates. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2275, art. 012007, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2275/1/012007>
- [13] Liu J., Wu B., Wang Z. et. al. Microstructure and mechanical properties of aluminum-steel dissimilar metal welded using arc and friction stir hybrid welding. *Mater. Des.*, 2023, vol. 225, art. 111520, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111520>

- [14] Wu D., Cai X., Li H. et. al. Interface characteristics and mechanical behavior of aluminum alloy/ ultrahigh-strength steel plasma arc welded joint. *J. Mater. Res. Technol.*, 2025, vol. 34, pp. 1057–1067, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.101>
- [15] Bintoro S.R., Surojo E., Muhayat N. et. al. A comprehensive review on fusion arc welding of aluminum matrix composites: challenges, mechanisms, and advancements. *Results Eng.*, 2025, vol. 27, art. 106257, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106257>
- [16] Thongsong P., Raksat C., Wattanajitsiri V. et. al. Interpass temperature control for enhancing tribological and microstructural properties of multi-pass GTAW aluminum-clad SCM440 steel. *Results Eng.*, 2025, vol. 27, art. 107043, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107043>
- [17] Munoz-Escalona P., Walker A., Ogbu A. et. al. Comparison of empirical and predicted substrate temperature during surface melting of microalloyed steel using TIG technique and considering three shielding gases. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, vol. 477, pp. 179–183, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.014>
- [18] Mikheev R.S., Kalashnikov I.E. Using mathematical methods for analysis of temperature–time conditions of arc surfacing upon manufacturing of steel-aluminum compositions. *Inorg. Mater.*, 2022, vol. 58, no. 15, pp. 1594–1603, doi: <https://doi.org/10.1134/S0020168522150092>
- [19] Wang X., Zhang J., Tashiro S. et. al. Study of molten pool dynamics in keyhole TIG welding by numerical modelling. *J. Manuf. Process.*, 2024, vol. 119, pp. 827–841, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.113>
- [20] Thankappan K., Santhi J.R., Vijayalakshmi T.I. Comparative evaluation of machine learning models for predicting clad bead geometry in gas metal arc welding. *Knowl.-Based Syst.*, 2025, vol. 329-A, art. 114296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.114296>
- [21] Kuznetsov R.V. Some unification issues of ship reduction gears. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2023, no. 4, pp. 101–108. (In Russ.).
- [22] Rubino F., Tucci F., Caruso S. et. al. An integrated numerical approach to simulate the filler deposition and the shape distortions in gas metal arc welding. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2023, vol. 45, pp. 26–34, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.05.010>
- [23] Schaeberg A.S., Rodriguez R.Q., Almeida D.T. et. al. Evaluating thermal gradient in GMAW welding process with a novel heat source model: numerical and experimental approach. *Eng. Struct.*, 2024, vol. 318, art. 118724, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118724>
- [24] Yi T., Li C., Wang X. et. al. Experimental and numerical simulation of plastic flow behavior in friction stir welding of 2519 aluminum alloy via TIG arc. *Mater. Today Commun.*, 2025, vol. 47, art. 113246, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113246>
- [25] Daadkhah A., Khorrami M.S., Kashani-Bozorg S.F. et. al. The effect of heat input on the residual stress distribution in gas-metal arc welding of carbon steel: Simulation and experimental methods. *J. Adv. Join. Process.*, 2025, vol. 12, art. 100333, <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100333>
- [26] Konovalov A.V. et al. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 748 p. (In Russ.).
- [27] Goldak J., Akhlaghi M. *Computation welding mechanics*. Springer, 2005. 322 p.
- [28] Wang Y., Li S., Zhang H. et. al. Study on the hydrogen diffusion behavior in pipeline girth welds based on segmented moving double ellipsoid heat source model. *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 2025, vol. 217, art. 105556, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105556>
- [29] Jafarzadegan M., Taghiabadi R., Mofid M.A. Using double ellipsoid heat source model for prediction of HAZ grain growth in GTAW of stainless steel 304. *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 31, art. 103411, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103411>
- [30] Zhu K., Liu W., Ai B. et. al. Analytical model for weld penetration prediction in finite plates with time-varying heat sources. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2026, vol. 256-1, art. 127921, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127921>
- [31] Qu H., Cai Y. Improved semantic segmentation method for weld penetration prediction of TIG welding with dual ellipsoid heat source. *Manuf. Lett.*, 2024, vol. 41-S, pp. 310–319, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.037>

Статья поступила в редакцию 18.12.2025

Информация об авторах

ЭГАМБЕРДИЕВ Сардор Алишер угли — инженер по САПР. ООО «Летит» (127015, Москва, Российская Федерация, Вятская ул., д. 27, стр. 11, e-mail: autogadd@yandex.ru).

КОНОВАЛОВ Алексей Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

МИХЕЕВ Роман Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mikheev@bmstu.ru).

КАЛАШНИКОВ Игорь Евгеньевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, д. 49, e-mail: kalash2605@mail.ru).

КОБЕЛЕВА Любовь Ивановна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, д. 49, e-mail: likob@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Эгамбердиев С.А., Коновалов А.В., Михеев Р.С., Калашников И.Е., Кобелева Л.И. Исследование температурно-временных условий процесса дуговой наплавки рабочего слоя многослойных композиций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 86–97.

Please cite this article in English as:

Egamberdiev S.A., Konovalov A.V., Mikheev R.S., Kalashnikov I.E., Kobeleva L.I. Study of temperature-time conditions of arc surfacing process of the working layer of multilayer composites. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 86–97.

Information about the authors

EGAMBERDIEV Sardor Alisher ugli — CAD Engineer. LLC Letit (127015, Moscow, Russian Federation, Vyatskay St., Bldg. 27, Block 11, e-mail: autogadd@yandex.ru).

KONOVALOV Alexey Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Welding, Diagnostics and Specialized Robotics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

MIKHEEV Roman Sergeevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Welding, Diagnostics and Specialized Robotics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mikheev@bmstu.ru).

KALASHNIKOV Igor Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of Strength and Plasticity of Metallic and Composite Materials and Nanomaterials. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences (119334, Moscow, Russian Federation, Leninskiy Prospect, Bldg. 49, e-mail: kalash2605@mail.ru).

KOBELEVA Lubov Ivanovna — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Strength and Plasticity of Metallic and Composite Materials and Nanomaterials. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences (119334, Moscow, Russian Federation, Leninskiy Prospect, Bldg. 49, e-mail: likob@mail.ru).