

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (05.09.02)

УДК 621.791.7

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-60-66

Термический коэффициент полезного действия при электронно-лучевой обработке конструкционных материалов

Е.В. Терентьев, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.Л. Гончаров, Ю.В. Санталова, А.И. Яхонтов

Приведены результаты исследований взаимосвязи термического коэффициента полезного действия (КПД) процесса электронно-лучевой сварки (ЭЛС) с теплофизическими свойствами материала и скоростью сварки.

Термический КПД получен расчетно-экспериментальным способом на основе измерения площадей проплавления и оценки энергетических затрат на плавление при известных параметрах режимов сварки. Исследование выполнено на серии микрошлифов сварных соединений титанового сплава 5В, стали 40Х13, дюралюмина Д16, бронзы БрХ1Цр и молибдена ЦМ2А. Показано, что при ЭЛС с глубоким проплавлением КПД возрастает с увеличением скорости сварки и уменьшением температуропроводности свариваемого материала, причем его экспериментальная зависимость от скорости сварки хорошо аппроксимируется логарифмической кривой.

Так, при ЭЛС с увеличением скорости сварки с 20 до 120 м/ч он возрастает для титанового сплава 5В — с 54 до 67%, для стали 40Х13 — с 46 до 63%, для дюралюмина Д16 — с 18 до 40%. Термический КПД бронзы (при скорости ЭЛС 30 м/ч) и молибдена ЦМ2А (при скорости 20 м/ч) составил в среднем 15%. Построение зависимости КПД от безразмерного параметра $vd/2a$ показало, что термический КПД для всех материалов может быть аппроксимирован единой логарифмической зависимостью.

Предложено эмпирическое соотношение, позволяющее установить термический КПД в зависимости от скорости сварки и температуропроводности материала.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, глубокое проплавление, скорость сварки, теплофизические свойства, термический КПД.

Для цитирования: Терентьев Е.В., Драгунов В.К., Слива А.П., Гончаров А.Л. Санталова Ю.В., Яхонтов А.И. Термический коэффициент полезного действия при электронно-лучевой обработке конструкционных материалов // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 60—66. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-60-66.

Thermal efficiency in electron beam processing of structural materials

E. V. Terent'ev, V. K. Dragunov, A. P. Sliva, A. L. Goncharov, Yu. V. Santalova, A. I. Yakhontov

The results of studying the interrelation that links the electron beam welding (EBW) thermal efficiency, thermophysical properties of the material, and welding speed are presented. Thermal efficiency was determined by a combined experimental and computational method based on measuring the penetration areas and evaluating the energy expenditure for melting with the known welding mode parameters. The study was carried out on a series of microsections prepared from welded joints of 5V titanium alloy, grade 40Kh13 steel, D16 duralumin, BrKh1 Tsr bronze, and TsM2A molybdenum. It is shown that in EBW with deep penetration, its thermal efficiency increases with increasing the welding speed and decreasing the welded material thermal diffusivity. The experimental dependence of the thermal efficiency on the welding speed is approximated with sufficient accuracy by a logarithmic curve. Thus, in increasing the EBW speed from 20 to 120 m/h, the thermal efficiency increases from 54% to 67% for 5V titanium alloy, from 46% to 63% for 40Kh13 steel, and from 18% to 40% for D16 duralumin. The thermal efficiency in welding bronze (at an EBW speed of 30 m/h) and in welding TsMA molybdenum (at a speed of 20 m/h) was 15% on the average. An analysis of the thermal efficiency curve versus the dimensionless parameter $vd/2a$ has shown that the thermal efficiency for all materials can be approximated by a single logarithmic dependence. An empirical relationship is proposed, using which the welding thermal efficiency can be determined as a function of welding speed and material thermal diffusivity.

Key words: electron beam welding, deep penetration, welding speed, thermophysical properties, thermal efficiency.

For citation: Terent'ev E.V., Dragunov V.K., Sliva A.P., Goncharov A.L., Santalova Yu.V., Yakhontov A.I. Thermal efficiency in electron beam processing of structural materials. Bulletin of MPEI. 2020;6:60—66. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-60-66.

Введение

Термический коэффициент полезного действия (КПД) η_t — важнейший параметр режимов сварки, использующийся при предварительных расчетах режимов и оценке эффективности использования тепловой энергии [1 — 4]. Известно, что он существенно зависит от теплофизических свойств материала, скорости сварки и параметров теплового источника [1 — 6].

В литературе встречаются как эмпирические, так и теоретические способы определения термического КПД. В учебной литературе [3] приводится значение термического КПД для быстродвижущегося линейного источника теплоты, равный 48,4%, как предельно возможный при бесконечной скорости сварки, в то время как экспериментальные исследования показывают, что его значения существенно превышают 50% [7, 8]. Анализ моделей цилиндрического и плоского источников тепла доказывает возможность достижения значений КПД до 90% и более [9, 10].

При экспериментальном определении η_t используют следующее соотношение [3]:

$$\eta_t = vF_{np}S_{пл}/q_{эф}, \quad (1)$$

где v — скорость сварки; F_{np} — площадь поперечного сечения шва; $S_{пл}$ — теплосодержание расплавленного металла при температуре плавления; $q_{эф}$ — эффективная мощность пучка.

В работе [11] для ЭЛС предложено аппроксимировать зависимость глубины проплавления от скорости и мощности луча:

$$\eta_t = (S_{пл}\pi d)/4(A_1/(q_{эф}/v)^2 + A_2/(q_{эф}/v) + A_3), \quad (2)$$

где A_1 — A_3 — эмпирические коэффициенты, полученные из большого количества экспериментальных данных в диапазоне мощности луча от 1 до 8 кВт и скорости сварки от 3,6 до 28,8 м/ч.

По выражению (2) η_t зависит только от величины погонной энергии $q_{эф}/v$ и не зависит напрямую от ско-

рости сварки v . Это ведет к существенным ошибкам в расчете, поскольку одно и то же отношение $q_{эф}/v$ может быть получено в широких пределах скоростей сварки.

В публикации [12] дана экспериментальная зависимость термического КПД от скорости сварки, в соответствии с которой максимум достигается при скорости сварки около 15...20 м/ч. Повышение термического КПД объясняется тем, что с увеличением скорости сварки уменьшается доля теплоты, затрачиваемая на нагрев основного металла, а понижение КПД после достижения максимума обусловлено тем, что ширина шва по мере роста скорости сварки становится меньше диаметра источника тепла, и периферийная зона пучка тратит энергию лишь на подогрев околошовной зоны. Подобная зависимость термического КПД от скорости сварки формируется при сварке источниками с низкой концентрацией плотности мощности и большими относительными диаметрами источника теплоты. В условиях электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением, когда эквивалентный диаметр луча меньше 1 мм, такая картина маловероятна.

Таким образом, на сегодняшний день недостаточно экспериментальных данных о влиянии скорости сварки на термический КПД при ЭЛС с глубоким проплавлением, поэтому цель настоящей работы — получение экспериментальных зависимостей термического КПД от скорости ЭЛС для материалов с различными теплофизическими свойствами.

Методика

Для определения термического КПД использованы образцы сварных соединений титанового сплава 5В, стали 40Х13 и дюралюмина Д16, полученные с помощью ЭЛС без сквозного проплавления. Технология их изготовления описана в [13]. Режимы сварки даны в табл. 1. Толщина свариваемых пластин — 32, 27 и 20 мм.

Таблица 1

Параметры режимов ЭЛС

Материал	Ускоряющее напряжение U , кВ	Скорость сварки v , м/ч	Ток сварки I , мА	Глубина проплавления H , мм	Ширина шва $B_{ср}$, мм
Титановый сплав 5В	60	20	100	29,4	2,68
		40	135	26,8	2,16
		60	170	28,1	1,79
		90	215	26,4	1,63
		120	250	27,7	1,43
Сталь 40Х13		20	115	25,4	2,10
		60	200	24,8	1,52
		120	350	26,6	1,37
Дюралюмин Д16		20	65	17,1	2,34
		60	100	19,4	1,77
	120	140	16,0	1,90	

Расчет термического КПД по экспериментальным данным выполнен по (1). Для этого из каждого шва изготовлено по 3 микрошлифа в поперечном сечении на расстоянии около 10 мм друг от друга. Площадь поперечного сечения шва $F_{пр}$ получена на химически протравленных шлифах с помощью микроскопа Zeiss Observer Z1m с программным обеспечением AxioVision.

Теплосодержание расплавленного металла при температуре плавления $S_{пл}$ найдено с учетом температурной зависимости теплоемкости от температуры:

$$S_{пл} = \sum_{293}^{T_{пл}} c_T \Delta T + L_{пл},$$

где c_T — средняя теплоемкость в диапазоне температур ΔT .

Для сплавов 5В и Д16 не было найдено зависимостей удельной теплоемкости от температуры, поэтому с учетом близости теплоемкости сплавов и чистых металлов при комнатной температуре использованы данные для чистого титана и алюминия [14, 15]. Для стали 40Х13 зависимость удельной теплоемкости от температуры приведена только до 1073 К [16], поэтому для

более высоких температур взяты данные для чистого железа [17]. Зависимости удельной теплоемкости от температуры, задействованные в расчетах, изображены на рис. 1.

Для анализируемых сплавов в научно-технической литературе отсутствуют данные по удельной теплоте плавления, поэтому в расчетах применены значения для чистых веществ. Значения физических свойств металла указаны в табл. 2.

Эффективную мощность луча вычислим по формуле:

$$q_{эф} = UI\eta_{эф},$$

где U — ускоряющее напряжение; I — ток электронного пучка; $\eta_{эф}$ — эффективный КПД электронного пучка, равный 95%.

Таким образом, для каждого сечения на базе обработки площади шва рассчитан термический КПД.

Результаты исследования

Результаты определения термического КПД расчетно-экспериментальным способом представлены на рис. 2 в виде графиков зависимости η_r от скорости сварки v . Как следует из графиков, η_r сильно зависит как от свойств материала, так и от скорости сварки. Мак-

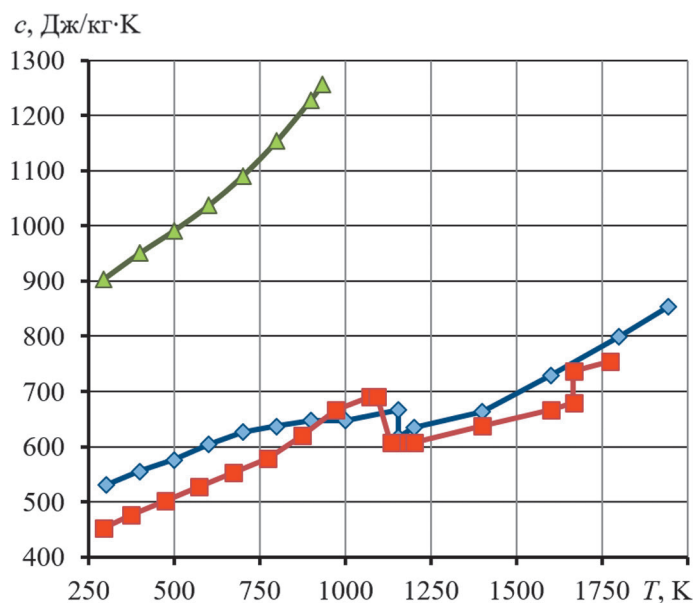


Рис. 1. Зависимость удельной теплоемкости материалов c от температуры T :

▲ — дюралюмин Д16; ◆ — титановый сплав 5В; ■ — сталь 40Х13

Таблица 2

Физические свойства металлов

Свойства	Титановый сплав 5В	Сталь 40Х13	Дюралюмин Д16
Плотность ρ , кг/м ³ при 300 К	4500 [15]	7870 [15]	2697 [15]
Удельная теплоемкость c , Дж/кг·К при 300 К	530,8 [14]	452 [16]	883 [16]
Удельная теплота плавления $L_{пл}$, Дж/кг	470000 [19]	270000 [19]	393000 [19]
Температура плавления $T_{пл}$, К	1944 [20]	1773 [18]	775 (солидус) [19]

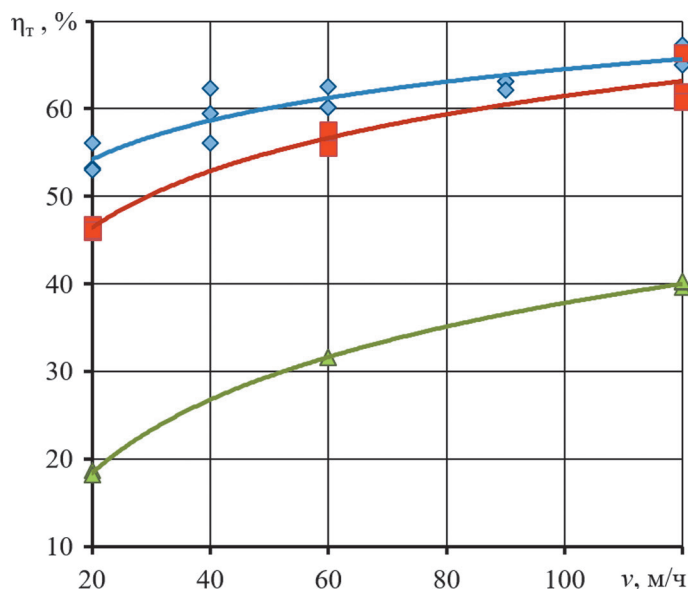


Рис. 2. Зависимость термического КПД η_t от скорости сварки ν для различных материалов:

▲ — дюралюмин Д16; ◆ — титановый сплав 5В; ■ — сталь 40Х13

симальное значение $\eta_t = 67\%$ получено для титанового сплава 5В при $\nu = 120\text{ м/ч}$, а минимальное $\eta_t = 18\%$ — для алюминиевого сплава при $\nu = 20\text{ м/ч}$. Следует отметить, что термический КПД непрерывно растет с увеличением скорости сварки, и максимум, достигнутый в [3], не обнаружен.

Обсуждение результатов

Известно, что при сварке распределенным источником теплоты с увеличением скорости сварки часть мощности луча на периферии будет расходоваться на подогрев основного металла, тем самым понижая КПД [12]. Отсутствие максимума на кривой $\eta_t(\nu)$ и уменьшение η_t при высоких скоростях сварки свидетельствуют о том, что при ЭЛС хорошо сфокусированным пучком практически вся мощность тратится на нагрев сварочной ванны. Таким образом, для ЭЛС с глубоким проплавлением термический КПД непрерывно возрастает с увеличением скорости сварки при условии, что диаметр пучка остается меньше ширины шва.

При наиболее часто используемых скоростях ЭЛС сложно добиться повышения термического КПД до значения 90%, теоретическая возможность которого показана в работах [9, 10]. В то же время очевидно, что модель линейного источника теплоты [21] также недостаточно точно отражает энергетический баланс при ЭЛС, особенно при высоких скоростях сварки, что связано с кратным завышением температуры вблизи действия линейного источника [22]. Таким образом, существующие аналитические модели тепловых процессов при сварке не позволяют объективно оценить термический КПД процесса ЭЛС.

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что чем выше теплопроводность материала, тем ниже

термический КПД, т. е. коэффициент теплопроводности, по сравнению со скоростью сварки, влияет на термический КПД противоположным образом. Использование панорамных снимков сварных соединений в поперечном сечении и режимов ЭЛС бронзы БрХ1Цр и молибдена ЦМ2А, опубликованных в [23, 24], позволяет вычислить термический КПД для указанных материалов. По результатам расчета термический КПД при ЭЛС со скоростью 20 м/ч молибдена ЦМ2А составляет 15%, а при ЭЛС бронзы БрХ1Цр со скоростью 30 м/ч — 12 и 17 %. Стоит отметить, что сварка бронзы БрХ1Цр проходила со сквозным проплавлением, поэтому часть энергии пучка была затрачена на нагрев подложки, что позволяет считать значения термического КПД несколько заниженными. Тем не менее, достигнутые результаты явно подтверждают уменьшение термического КПД с повышением теплопроводности.

В модели движущегося цилиндрического источника теплоты в бесконечной пластине для описания распределения тепловых полей используется безразмерный параметр $\nu d/2a$. Построение графика зависимости термического КПД от $\nu d/2a$ (рис. 3) доказывает, что полученные значения термического КПД для всех материалов можно описать единой логарифмической зависимостью вида:

$$\eta_t = A \ln(\nu d/2a) - B, \quad (3)$$

где A, B — эмпирические коэффициенты; a — теплопроводность.

Аппроксимация полученных результатов дает следующие коэффициенты: $A = 0,13$ и $B = 0,58$. Коэффициент достоверности аппроксимации составил $R_2 = 0,93$. Полученное уравнение позволяет с удовлетворитель-

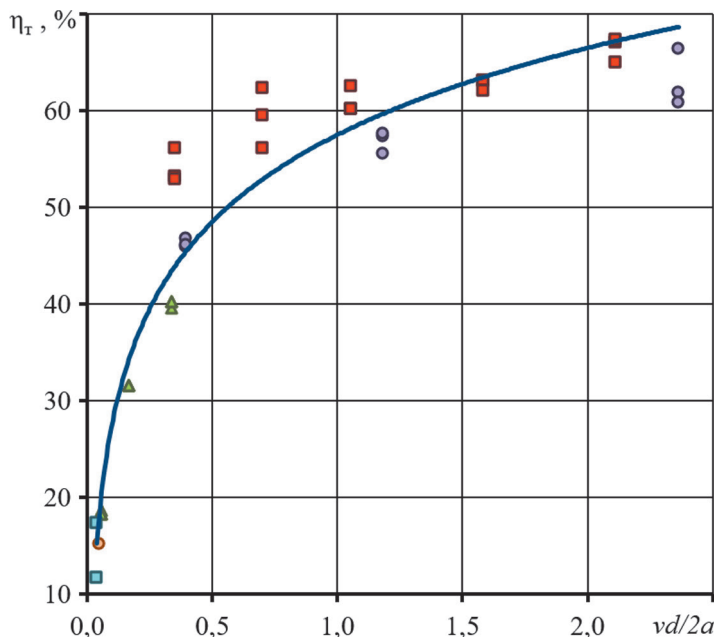


Рис. 3. Зависимость термического КПД η_t от отношения скорости сварки к коэффициенту теплопроводности $vd/2a$:

▲ — дюралюмин Д16; ■ — титановый сплав 5В; ● — сталь 40Х13; ■ — бронза БрХ1Цр; ● — молибден ЦМ2А

ной точностью оценить термический КПД процесса ЭЛС с глубоким проплавлением на основе скорости сварки и коэффициента теплопроводности.

Отметим основные факторы, снижающие точность определения термического КПД расчетно-экспериментальным способом. Во-первых, для промышленных сплавов в литературе недостаточно данных о теплофизических свойствах, что вынуждает использовать приблизительные зависимости удельной теплоемкости от температуры, данные о скрытой теплоте плавления для чистых металлов, и не учитывать для полиморфных металлов скрытую теплоту фазовых превращений в твердом состоянии. Во-вторых, эффективный КПД при расчете всегда принимали равным 95%, хотя в зависимости от режимов ЭЛС и внешних условий его значение может существенно отличаться [23]. При уточнении коэффициентов в (3) основной задачей является получение достоверных зависимостей коэффициента

теплопроводности от температуры и структурного состояния сплава.

Заключение

Установлено, что при ЭЛС с глубоким проплавлением термический КПД непрерывно увеличивается для всех сплавов. При ЭЛС с ростом скорости сварки с 20 до 120 м/ч термический КПД возрастает: для титанового сплава 5В — с 54 до 67%, для стали 40Х13 — с 46 до 63%, для дюралюмина Д16 — с 18 до 40%.

Повышение теплопроводности сплавов ведет к снижению термического КПД, что не отражается в моделях быстро движущихся источников.

Предложено соотношение, устанавливающее взаимосвязь между термическим КПД, теплопроводностью и скоростью ЭЛС в условиях глубокого проплавления.

Литература

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985.
2. Зуев И.В., Углов А.А., Янчук Л.М. О связи параметров режима сварки с геометрией шва // Сварочное производство. 1974. № 2. С. 7—9.
3. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. М.: Изд-во МЭИ, 1998.
4. Мьякишев Ю.В., Богословская М.К. Тепловая эффективность формирования шва при электронно-лучевой и трехфазной сварках // Вестник МЭИ. 2016. № 2. С. 12—14.

References

1. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. Lazernaya i Elektronno-luchevaya Obrabotka Materialov. M.: Mashinostroenie, 1985. (in Russian).
2. Zuev I.V., Uglov A.A., Yanchuk L.M. O Svyazi Parametrov Rezhima Svarki s Geometriey Shva. Svarochnoe Proizvodstvo. 1974;2:7—9. (in Russian).
3. Zuev I.V. Obrabotka Materialov Kontsentrirrovannymi Potokami Energii. M.: Izd-vo MEI, 1998. (in Russian).
4. Myakishev Yu.V., Bogoslovskaya M.K. Teplovaya Effektivnost' Formirovaniya Shva pri Elektronno-luchevoy i Trekhfaznoy Svarkakh. Vestnik MEI. 2016; 2:12—14. (in Russian).

5. **Зуев И.В., Родякина Р.В., Волков Д.Е.** Методика расчета режимов ЭЛС с учетом экспериментальных значений термического КПД // Сварочное производство. 1996. № 2. С. 27—29.
6. **Зуев И.В., Родякина Р.В.** Тепловая эффективность процесса электронно-лучевого нагрева // Доклады АН. 1994. Т. 339. № 3. С. 316—318.
7. **Зуев И.В., Буруис Д., Родякина Р.В.** Термический КПД электронно-лучевой сварки // Концентрированные потоки энергии в обработке и соединении материалов: Тезисы докл. Всесоюз. науч. конф. Пенза, 1991. С. 4.
8. **Родякина Р.В.** Экспериментальное и расчетное определение оптимальной области параметров режима процесса электронно-лучевой сварки на основе минимума тепловложения: дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во МЭИ, 1996.
9. **Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д.** О предельных значениях теплового коэффициента полезного действия при глубоком проплавлении металлов излучением // Доклады АН СССР. 1989. Т. 307. № 5. С. 1115—1118.
10. **Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д., Малюта Д.Д., Себрант А.Ю.** Воздействие лазерного излучения на материалы. М.: Наука, 1989.
11. **Зуев И.В., Родякина Р.В., Пиголкин Г.М.** Определение тепловой эффективности электронно-лучевой сварки по величине работы формирования шва // Сварочное производство. 1997. № 7. С. 12—18.
12. **Березовский Б.М.** Термический КПД процесса проплавления металла поверхностной сварочной дугой // Автоматическая сварка. 1979. № 10. С. 18—21.
13. **Dragunov V.K. e. a.** Analytical Methods of Electron Beam Power Evaluation for Electron-beam Welding with Deep Penetration // IOP Conference Series: Materials Sci. and Eng. 2019. V. 681 (1). P. 012011
14. **Цвиккер У.** Титан и его сплавы. М.: Metallurgiya, 1979.
15. **Зиновьев В.Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Metallurgiya, 1989.
16. **Зубченко А.С. и др.** Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2003.
17. **Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements.** Ohio: Metals park, 1983.
18. **Казанцев Е.И.** Промышленные печи. М.: Metallurgiya, 1975.
19. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1978.
20. **Бабичев А.П. и др.** Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991.
21. **Неровный В.М., Коновалов А.В., Якушин Б.Ф., Макаров Э.Л., Куркин А.С.** Теория сварочных процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
22. **Терентьев Е.В.** Повышение качества формирования сварных соединений при электронно-лучевой сварке неповоротных стыков со сквозным проплавлением
5. **Zuev I.V., Rodyakina R.V., Volkov D.E.** Metodika Rascheta Rezhimov ELS s Uchetom Eksperimental'nykh Znacheniy Termicheskogo KPD. Svarochnoe Proizvodstvo. 1996;2:27—29. (in Russian).
6. **Zuev I.V., Rodyakina R.V.** Teplovaya Effektivnost' Protsessa Elektronno-lucheвого Nagreva. Doklady AN. 1994;339;3:316—318. (in Russian).
7. **Zuev I.V., Buruis D., Rodyakina R.V.** Termicheskiy KPD Elektronno-luchevoy Svarki. Konsentrirovannyye Potoki Energii v Obrabotke i Soedinenii Materialov: Tezisy Dokl. Vsesoyuz. Nauch. konf. Penza, 1991:4. (in Russian).
8. **Rodyakina R.V.** Eksperimental'noe i Raschetnoe Opredelenie Optimal'noy Oblasti Parametrov Rezhima Protsessa Elektronno-luchevoy Svarki na Osnove Minimuma Teplovlozheniya: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: Izd-vo MEI, 1996. (in Russian).
9. **Arutyunyan R.V., Bol'shov L.A., Vasil'ev A.D.** O Predel'nykh Znacheniyakh Teplovogo Koeffitsienta Poleznogo Deystviya pri Glubokom Proplavlenii Metallov Izlucheniem. Doklady AN SSSR. 1989;307;5:1115—1118. (in Russian).
10. **Arutyunyan R.V., Bol'shov L.A., Vasil'ev A.D., Malyuta D.D., Sebrant A.Yu.** Vozdeystvie Lazernogo Izlucheniya na Materialy. M.: Nauka, 1989. (in Russian).
11. **Zuev I.V., Rodyakina R.V., Pigolkin G.M.** Opredelenie Teplovoy Effektivnosti Elektronno-luchevoy Svarki po Velichine Raboty Formirovaniya Shva. Svarochnoe Proizvodstvo. 1997;7:12—18. (in Russian).
12. **Berezovskiy B.M.** Termicheskiy KPD Protsessa Proplavleniya Metalla Poverkhnostnoy Svarochnoy Dugoy. Avtomaticheskaya Svarka. 1979;10:18—21. (in Russian).
13. **Dragunov V.K. e. a.** Analytical Methods of Electron Beam Power Evaluation for Electron-beam Welding with Deep Penetration. IOP Conference Series: Materials Sci. and Eng. 2019;681 (1):012011
14. **Tsvikker U.** Titan i Ego Splavy. M.: Metallurgiya, 1979. (in Russian).
15. **Zinov'ev V.E.** Teplofizicheskie Svoystva Metallov pri Vysokikh Temperaturakh. M.: Metallurgiya, 1989. (in Russian).
16. **Zubchenko A.S. i dr.** Marochnik Staley i Splavov. M.: Mashinostroenie, 2003. (in Russian).
17. **Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements.** Ohio: Metals park, 1983.
18. **Kazantsev E.I.** Promyshlennyye Pechi. M.: Metallurgiya, 1975. (in Russian).
19. **Chirkin V.S.** Teplofizicheskie Svoystva Materialov Yadernoy Tekhniki. M.: Atomizdat, 1978. (in Russian).
20. **Babichev A.P. i dr.** Fizicheskie Velichiny. M.: Energoatomizdat, 1991. (in Russian).
21. **Nerovnyy V.M., Konovalov A.V., Yakushin B.F., Makarov E.L., Kurkin A.S.** Teoriya Svarochnykh Protsessov. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2016. (in Russian).
22. **Terent'ev E.V.** Povyshenie Kachestva Formirovaniya Svarnykh Soedineniy pri Elektronno-luchevoy Svarke Nepovorotnykh Stykov so Skvoznym Proplavleniem:

нием: дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

23. **Ластовирия В.Н., Крылов К.А., Леонов А.В.** О зависимости потерь мощности на излучение из пароплазменного кратера при электронно-лучевой сварке от параметров его формы // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Материалы III Международ. конф. М.: Изд-во МЭИ, 2020. С. 74—82.

Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2014. (in Russian).

23. **Lastoviry a V.N., Krylov K.A., Leonov A.V.** O Zavisimosti Poter' Moshchnosti na Izluchenie iz Paroplazmennogo Kratera pri Elektronno-luchevoy Svarke ot Parametrov Ego Formy. Elektronno-luchevaya Svarka i Smezhnye Tekhnologii: Materialy III Mezhdunar. Konf. M.: Izd-vo MEI, 2020:74—82. (in Russian).

Сведения об авторах:

Терентьев Егор Валериевич — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ»

Драгунов Виктор Карпович — доктор технических наук, проректор по научной работе, заведующий кафедрой технологии металлов НИУ «МЭИ»

Слива Андрей Петрович — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ», e-mail: SlivaAP@mpei.ru

Гончаров Алексей Леонидович — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ»

Санталова Юлия Владимировна — студент (магистрант), техник кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ»

Яхонтов Александр Игоревич — студент (магистрант), техник кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ»

Information about authors:

Terent'ev Egor V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Metal Technology Dept., NRU MPEI

Dragunov Viktor K. — Dr.Sci. (Techn.), Vice-Rector for Research, Head of Metal Technology Dept., NRU MPEI

Sliva Andrey P. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Metal Technology Dept., NRU MPEI, e-mail: SlivaAP@mpei.ru

Goncharov Aleksey L. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Metal Technology Dept., NRU MPEI

Santalova Yuliya V. — Student (Master's Degree), Technician of Metal Technology Dept., NRU MPEI

Yakhontov Aleksandr I. — Student (Master's Degree), Technician of Metal Technology Dept., NRU MPEI

Работа выполнена при поддержке: Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в рамках государственного задания № FSWF-2020-0023)

The work is executed at support: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (as Part of a State Task No. FSWF-2020-0023)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 08.10.2020

The article received to the editor: 08.10.2020