

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <https://t-s.today/>

2017, Том 4, №4 / 2017, Vol 4, No 4 <https://t-s.today/issues/vol4-no4.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/02TS417.pdf>

DOI: 10.15862/02TS417 (<http://dx.doi.org/10.15862/02TS417>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Дианов Х.А., Локтев Д.А., Людаговский А.В., Полухин В.А., Соколов В.С. Моделирование температурных полей при наплавке с использованием линейного источника тепла // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/02TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02TS417

For citation:

Dianov K.A., Loktev D.A., Lyudagovskii A.V., Polukhin V.A., Sokolov V.S. [Simulation of temperature fields during welding using a linear heat source] Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/02TS417.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/02TS417

УДК 539.3, 621.7

Дианов Харис Ахмятович

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Россия, Москва¹
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: dha@inbox.ru

Локтев Даниил Алексеевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Россия, Москва
Ассистент
Кандидат технических наук
E-mail: loktevdan@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=708990

Людаговский Андрей Васильевич

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Россия, Москва
Доктор технических наук, профессор
Старший научный сотрудник
E-mail: av1832@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=564054

Полухин Владимир Анатольевич

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Россия, Москва
Соискатель
E-mail: av1832@mail.ru

Соколов Валерий Серафимович

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Россия, Москва
Профессор
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: prtlokt@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=498210

Моделирование температурных полей при наплавке с использованием линейного источника тепла

¹ 125190, г. Москва, ул. Часовая, 22/2, ком. 177

Аннотация. В статье рассматривается тот факт, что при наплавке, в системе «покрытие-подложка», на границах раздела возможны зоны локального проплавления матрицы (основного металла). Наряду с процессами обеспечения прочности связи на границе сред отдельный интерес представляет изменение температур на поверхности наплавляемой основы и наличие зон проплавления, что весьма актуально при наплавке тонкостенных изделий.

Проведенный в исследовании анализ вычислений говорит о том, что при неизменном тепловом потоке и теплофизических свойствах покрытия и основы, температурные поля полностью зависят от времени действия источника и толщины наплавляемого слоя и детали.

Реализованный вычислительный алгоритм позволяет определять изменения температурных полей в пятне нагрева не только варьируя время действия источника и толщину наплавляемого слоя и подложки, но и включая изменения плотности тока, силы тока, напряжения, всей теплофизических величин. Как показали расчёты, удельный тепловой поток в пределах пятна крайне неравномерен. Наибольшее его значение приходится на центр пятна и его среднюю часть, по мере приближения к границе пятна он резко убывает. Поэтому температура в центре пятна отличается от температуры его границ. Чтобы расплавились все элементы покрытия и подложки, необходимо достижение определённой температуры по радиусу всего пятна.

Ключевые слова: теплофизические свойства; восстановление деталей; линейный источник тепла; моделирование нагрева; эквивалентная теплопроводность; температурное поле; время наплавки

На современном этапе развития технологий в области транспортного строительства, машиностроения, ремонта и модернизации отдельных блоков и целых конструкций на первый план выходят возможности восстановления первоначальных характеристик узлов, агрегатов, элементов объектов транспорта, инфраструктуры и т. д.

Одним из наиболее популярных методов восстановления геометрических и механических свойств металлических элементов, находящихся в непосредственном контакте с сопряженными частями объектов транспортного строительства, является наплавка. Поэтому построение математических моделей процессов, происходящих непосредственно при наплавке, следует признать актуальным и своевременным как с точки зрения фундаментальных основ механики твёрдого тела, так и с точки зрения инженерных приложений в области транспортного строительства.

В целом, полученные результаты и сделанные выводы могут быть полезны в области разработки новых и модернизации имеющихся технологических процессов в области ремонта и восстановления металлических элементов в ходе эксплуатации объектов транспортного строительства в условиях режимов различной интенсивности.

При наплавке, в системе «покрытие-подложка», на границах раздела возможны зоны локального проплавления матрицы (основного металла). Наряду с процессами обеспечения прочности связи на границе сред представляет интерес изменение температур на поверхности наплавляемой основы и наличие зон проплавления, что весьма актуально при наплавке тонкостенных изделий [1, 3, 5].

Согласно уравнению определения температурного поля от мгновенного линейного источника без теплоотдачи [16], процесс распространения теплоты от мгновенного распределённого источника с учётом τ_0 выразится:

$$dT = \frac{qdt}{c\rho \cdot \delta \cdot 4 \cdot \pi \cdot \omega \cdot (\tau + \tau_0)} e^{-\frac{r^2}{4 \cdot \omega \cdot (\tau + \tau_0)}}, \quad (1)$$

где: τ – время, прошедшее с момента введения теплоты нормального кругового источника.

Рассчитаем температурные поля в зависимости от толщины наплавляемого слоя и подложки, то есть на толщину матрицы за время действия источника 0,085 с. Принимаем толщину слоя эквивалентной толщине подложки от 0,01 мм до 0,04 мм, расчёты ведём без теплоотдачи.

Результат вычислений приведён в графике расчёта температурных полей в зависимости от толщины матрицы за время действия источника 0,085 с. (рис. 1).

На графике (рис. 1) наглядно видна зависимость температурных полей от толщины матрицы при одном показателе времени работы источника.

Чтобы достигнуть температурного поля, полученного при действии источника в течение времени 0,085 с и толщиной матрицы 0,01 мм, для матрицы толщиной 0,04 мм, расчётное значение времени составляет 0,34 с, то есть ровно в четыре раза больше, как и по толщине матрицы.

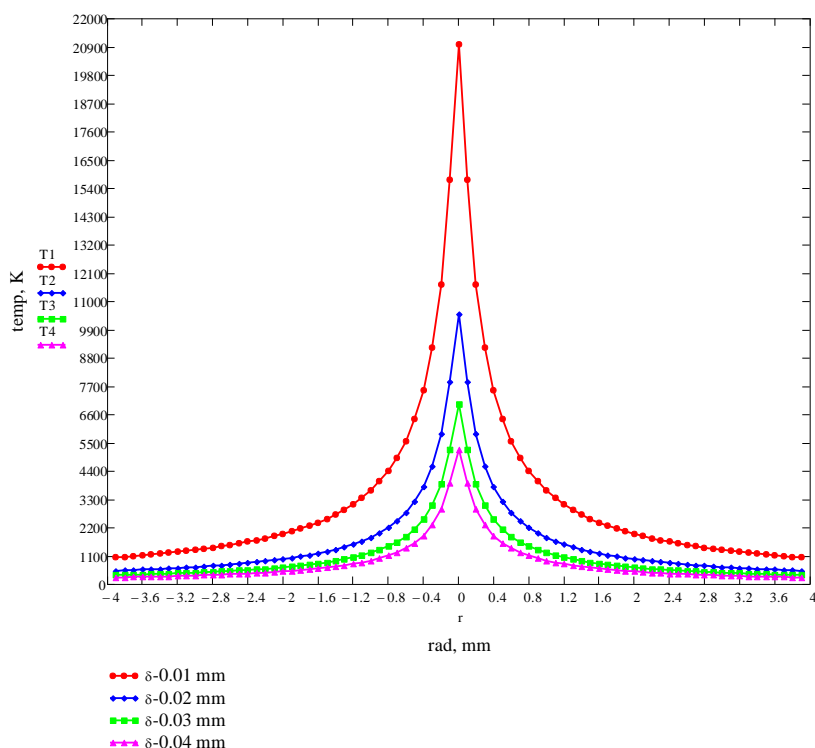


Рисунок 1. График расчёта температурных полей в зависимости от толщины матрицы за время действия источника 0,085 с (разработано авторами)

Анализ вычислений говорит о том, что при неизменном тепловом потоке и теплофизических свойствах покрытия и основы, температурные поля полностью зависят от времени действия источника и толщины наплавляемого слоя и детали.

Все расчёты произведены в среде Mathcad 15 и 16 [11]. Созданная программа позволяет вычислять изменения температурных полей в пятне нагрева не только изменяя время действия источника и толщину наплавляемого слоя и подложки, но и включая изменения плотности тока, силы тока, напряжения, всей теплофизических величин [8, 13].

Как показали расчёты, удельный тепловой поток q_2 в пределах пятна крайне неравномерен. Наибольшее его значение приходится на центр пятна и его среднюю часть [6, 7], по мере приближения к границе пятна он резко убывает. Поэтому температура в центре пятна отличается от температуры его границ. Чтобы расплавились все элементы покрытия и подложки, необходимо достижение определённой температуры по радиусу всего пятна [5, 12].

Далее рассмотрим возможность определения необходимого времени при заданной необходимой температуре всего анодного пятна по толщине наплавляемого слоя. При использовании в качестве наплавляемого слоя, например, порошковой композиции Fe-10 % V, самым тугоплавким элементом является V – ванадий. Температура его плавления $T_{пл} = 2193 \text{ K}$. Хотя температура плавления покрытия $T_{пок} \text{ Fe-10 \% V} = 1800 \text{ K}$. Для расчёта примем необходимую температуру по всей площади анодного пятна в размере 2200 K [14].

Для того чтобы рассчитать время наплавки слоёв, в работе [4] предложен нижеописанный способ.

За время наплавки слоя масса прогретой зоны подложки определяется через её плотность (сталь 40) и объём прогретого материала [15], который вычислим по формуле:

$$V_{\text{подл.}} = \pi R_{\text{эфф}}^2 \cdot \sqrt{4 \cdot \omega_{\text{подл.}} \cdot \tau}. \quad (2)$$

Тогда температуропроводность системы «покрытие-подложка» в зависимости от теплофизических величин покрытия и подложки [15] составит:

$$\omega_{\text{экв}} = \lambda_{\text{экв}} / (C_{\text{экв}} \cdot \rho_{\text{экв}}). \quad (3)$$

Потерями порошка при наплавке пренебрегаем, тогда толщина наплавляемого слоя:

$$\delta(\tau) = \frac{G_{\text{пор.}} \cdot \tau}{S_{\text{кр}} \cdot \rho_{\text{пок.}}}, \quad (4)$$

где: $G_{\text{пор}}$ – расход порошка; τ – время воздействия; $\rho_{\text{пок.}}$ – плотность наплавляемого покрытия.

Используя модель расчёта для определения времени наплавки толщины определённого слоя и всех слоёв [4], рассчитаем искомое время для неподвижного источника нагрева, приняв значение толщины покрытия 500 мкм и расход порошка 5 г/мин. , тогда из уравнения (4) определяем время наплавки таким источником – оно составит 1 с .

Если разбить покрытие на равные слои, соответствующие размеру зёрен порошка в 50 мкм формирующих цепочку-электрод, полагая в данном случае, что они равномерно накладываются друг на друга [7, 9], получим количество слоёв – 10 , время наплавки одного слоя соответственно будет равняться $\tau_{\text{сл}} = 0,1 \text{ с}$.

Толщина покрытия, таким образом, является дискретной величиной и зависит от времени наплавки одного слоя и количества слоёв. Время наплавки всех слоёв составит $\tau = \tau_{\text{сл}} \cdot n$, где n – количество слоёв. В данном случае τ будет меняться от 0 до 1 с .

Однако в работе [4] не учтён тот фактор, что при нагреве определённого слоя, температура предыдущего слоя достигла необходимых величин и при наплавке следующего слоя времени для её достижения необходимо намного меньше.

По этой причине предлагается иной способ расчёта для определения времени наплавки толщины определённого слоя и всех слоёв.

Для расчёта воспользуемся формулой для непрерывно действующего неподвижного источника теплоты, где скорость перемещения источника отсутствует. Для процесса электромагнитной наплавки он представляется как серия действующих друг за другом мгновенных источников в виде цепочек микро-электродов. Используя принцип наложения [9], представляется возможным найти расположение температур, в нашем случае непрерывно действующего источника, путём интегрирования температурных полей от отдельных источников [10].

Задача формулируется, как определение времени, необходимого для нагрева пятна радиусом $R_{\text{пят.нагр.}} = 4 \text{ мм} = 0,4 \text{ см}$, толщиной наплавляемого слоя δ_i -го сл., либо всех слоёв δ до температуры 2200 К, т. е. до температуры плавления всех элементов, входящих в состав покрытия и подложки. Толщина одного слоя, принята выше $\delta_{\text{сл}} = 50 \text{ мкм} = 0,005 \text{ см}$.

Для решения данной задачи воспользуемся параметрами ранее выбранного источника, теплофизические характеристики принимаем из [2].

Так как ранее описано, что для расчёта кругового источника возможно воспользоваться формулой для расчёта температурных полей от линейного непрерывно действующего источника [16]:

$$dT = \frac{q d\tau}{\delta \cdot c\rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau)} e^{-\frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau}} \quad (5)$$

Интегрируем от 0 до τ и вводим замену из $z = \frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau}$, тогда:

$$T = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \delta} \int_{\frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau}}^{\infty} \frac{e^{-z}}{z} dz = -\frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \delta} \cdot Ei \left(-\frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau} \right), \quad (6)$$

где: Ei – интегральная показательная функция.

Используя формулу (21) получаем:

$$Ei \left(-\frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau} \right) = -\frac{T \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta}{q} \quad (7)$$

Значение аргумента $\left(-\frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau} \right)$ находим по таблице для интегральной показательной функции $Ei(x)$ [17].

Рассчитаем время наплавки первого слоя, остальные данные вводим в таблицу (5), при расчётах не учитываем прогрев подслоя.

$$Ei \left(-\frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau} \right) = -\frac{T \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta}{q} = \frac{2200 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 0,72 \cdot 0,005}{1680} = -0,00059$$

Значение $-\frac{R_{\text{пят.нагр.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot \tau}$ находим по таблице для интегральной показательной функции $Ei(x)$ [17], оно равно 5,9.

Время для наплавки первого слоя составит:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{R_{\text{пят.наг.}}^2}{4 \cdot \omega \cdot 6} = \frac{0,4^2}{4 \cdot 0,09 \cdot 5,9} = 0,075 \text{сек.}$$

Время наплавки на количество наплавляемых слоёв при толщине слоя 50 мкм представлены в таблице.

Таблица

Зависимость времени наплавки от количества наплавляемых слоёв (составлена авторами)

количество слоёв	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
толщина, мкм	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
время наплавки до T 2200 К, с	0,075	0,087	0,098	0,1	0,106	0,112	0,114	0,119	0,120	0,122

График соотношения необходимого времени работы источника теплоты для получения температурного поля значением 2200 К по всему диаметру пятна, в зависимости от толщины слоя и количества слоёв представлено на рис. 2.

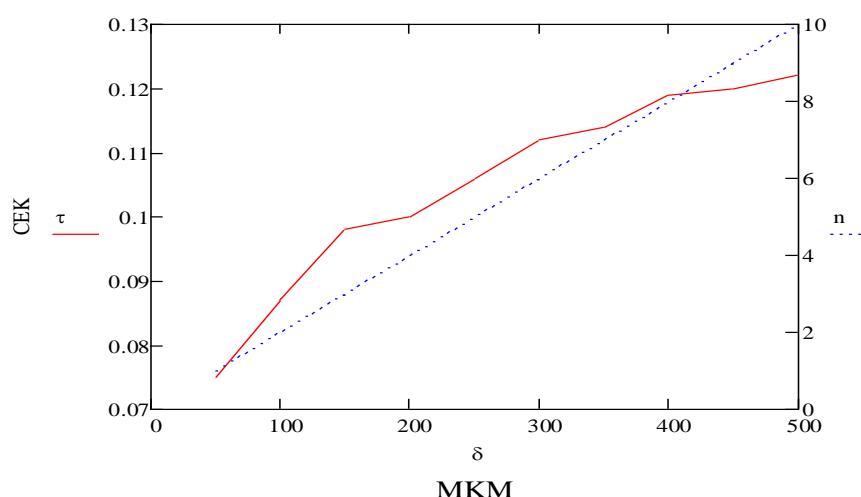


Рисунок 2. Зависимость необходимого времени работы источника теплоты для получения температурного поля значением 2200 К по всему диаметру пятна (разработано авторами)

Процесс наплавки тел подвижным нормальным круговым источником рассматривается с использованием принципа наложения аналогично как для линейного подвижного источника теплоты.

Заключение

1. Разработана и предложена программа, позволяющая вычислять изменения температурных полей в пятне нагрева с учётом времени действия источника, толщины наплавляемого слоя и подложки, изменения энергетических параметров.
2. Предложено рассматривать распределение температур на пятне нагрева с учётом наплавляемого слоя с введением коэффициента сосредоточенности в момент введения теплоты нормально-круговым источником при процессе электромагнитной наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барковский Ю.Б., Горохова М.Н., Ретюнских В.Н. Электромагнитная наплавка и поверхностное пластическое деформирование // Технология металлов, № 12, 2007. – С. 34-36.
2. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» // ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с.
3. Бышов Д.Н., Чурилов Д.Г., Горохов А.А. Методы нанесения металлопокрытий электромагнитной наплавкой // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, № 3 (15), 2012. – С. 66-68.
4. Жаткин С.С., Никитин В.И., Паркин А.А. Моделирование нагрева системы «покрытие-подложка» при плазменной порошковой наплавке Stellite 190 сканирующей дугой // Известия Самарского государственного технического университета, 2009. – С. 279-283.
5. Кожуро Л.М., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л. Теплофизические процессы при нанесении покрытий ферромагнитными порошками в электромагнитном поле // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки, № 9, 2007. – С. 64-70.
6. Локтев А.А. Удар вязкоупругого тела по упругой изотропной пластинке // Механика композиционных материалов и конструкций, Т. 13, N 3, 2007. – С. 170-178.
7. Локтев А.А. Уругоупругая модель взаимодействия цилиндрического ударника и пластинки // Письма в Журнал технической физики, Т. 33, № 16, 2007. – С. 72-77.
8. Локтев А.А., Бахтин В.Ф., Черников И.Ю., Локтев Д.А. Методика определения внешних дефектов сооружений путем анализа серии его изображений в системе мониторинга // Вестник МГСУ, №3, 2015. – С. 7-16.
9. Локтев А.А., Залетдинов А.В. Определение точек взаимодействия прямых и отраженных волн в пластинке // Вестник МГСУ, № 4, 2010. – С. 303-308.
10. Loktev A.A., Loktev D.A. Transverse impact of a ball on a sphere with allowance for waves in the target // Technical Physics Letters, Т. 34, № 11, 2008. – С. 960-963.
11. Локтев А.А., Локтев Д.А. Метод определения расстояния до объекта путем анализа размытия его изображения // Вестник МГСУ, № 6, 2015. – С. 140-151.
12. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочения деталей машин: Учебное пособие // Мн.: УП «Технопринт», 2000. – 268 с.
13. Пулька Ч.В., Шаблий О.Н., Барановский В.Н., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я. Пути совершенствования технологии индукционной наплавки тонких стальных дисков // Автоматическая сварка, № 5-6 (742), 2015. – С. 64-67.
14. Петров Г.Л., Тумарёв А.С. Теория сварочных процессов: Учебное пособие // М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.
15. Рыкалин Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке // М.: МАШГИЗ, 1951. – 291 с.
16. Фролов В.В., Винокуров В.А., Волченко В.Н., Парахин В.А., Арутюнова И.А. Теоретические основы сварки: Учебное пособие // М.: Высшая школа, 1970. – 592 с.
17. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы) // М.: Наука, 1964. – 344 с.

Dianov Kharis Akhmyatovich

Russian university of transport (MIIT), Russia, Moscow
E-mail: dha@inbox.ru

Loktev Daniil Alexeevich

Moscow state university of civil engineering (national research university), Russia, Moscow
E-mail: loktevdan@yandex.ru

Lyudagovskii Andrei Vasil'evich

Russian university of transport (MIIT), Russia, Moscow
E-mail: avl832@mail.ru

Polukhin Vladimir Anatol'evich

Russian university of transport (MIIT), Russia, Moscow
E-mail: avl832@mail.ru

Sokolov Valerii Serafimovich

Russian university of transport (MIIT), Russia, Moscow
E-mail: prtlokt@yandex.ru

Simulation of temperature fields during welding using a linear heat source

Abstract. The article discusses the fact that in surfacing in the system "coating-substrate", zones of local melting of the matrix (base metal) are possible. Along with the processes of ensuring the strength of the connection at the boundary of the medium, the change in the temperatures on the surface of the deposited base and the presence of penetration zones is interested, which is very important for surfacing thin-walled products.

The computational analysis carried out in the study suggests that, with the heat flow and the thermophysical properties of the coating and substrate unchanged, the temperature fields are completely dependent on the time of action of the source and the thickness of the deposited layer and part.

Implemented computational algorithm allows to determine the changes of temperature fields in the spot of heating is not only varying the time of operation of the source and the thickness of the deposited layer and the substrate, but including the change in current density, current strength, voltage, all thermophysical quantities. As calculations have shown the specific heat flow within the spot is not highly uniform. Its largest value occurs at the center of the spot and the middle part, the closer to the edge of the stain sharply decreases. Therefore, the temperature at the center of the spot differs from the temperature of its boundaries. To melt all the elements of the coating and the substrate, it is necessary to achieve a certain temperature along the radius of the entire spot.

Keywords: thermal properties; restoration of parts; the linear source of heat; simulation of heat; equivalent conductivity; temperature field; the time of surfacing

REFERENCES

1. Barkovskii Yu.B., Gorokhova M.N., Retyunskikh V.N. (2007). Electromagnetic surfacing and surface plastic deformation. *Technology of metals*, 12, pp. 34-36. (in Russian).
2. Bukhmirov V.V., Rakutina D.V., Solnyshkova Yu.S. (2009). Spravochnye materialy dlya resheniya zadach po kursu «Teplomassoobmen». [*Reference materials for solving*

- problems at the rate "Heat and Mass Transfer".] Ivanovo: GOU VPO "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin", p. 102.*
3. Byshov D.N., Churilov D.G., Gorokhov A.A. (2012). Methods of applying metal coatings with electromagnetic surfacing. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University. P.A. Kostycheva*, 3(15), pp. 66-68. (in Russian).
 4. Zhatkin S.S., Nikitin V.I., Parkin A.A. (2009). Modeling the heating of the "coating-substrate" system with the plasma powder surfacing Stellite 190 with a scanning arc. *Izvestiya of the Samara State Technical University*, pp. 279-283. (in Russian).
 5. Kozhuro L.M., Kheifets M.L., Gretsii N.L. (2007). Thermophysical processes in the application of coatings with ferromagnetic powders in an electromagnetic field. *Bulletin of the Polotsk State University*, 9, pp. 64-70. (in Russian).
 6. Loktev A.A. (2007). Impact of a viscoelastic body on an elastic isotropic plate. *Mechanics of composite materials and structures*, 3(13), pp. 170-178. (in Russian).
 7. Loktev A.A. (2007). The elastic-plastic model of interaction between a cylindrical drummer and a plate. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 16(33), pp. 72-77. (in Russian).
 8. Loktev A.A., Bakhtin V.F., Chernikov I.Yu., Loktev D.A. (2015). Methodology for determining external defects of structures by analyzing a series of its images in a monitoring system. *Vestnik MGSU*, 3, pp. 7-16. (in Russian).
 9. Loktev A.A., Zaletdinov A.V. (2010). Determination of points of interaction of straight and reflected waves in a plate. *Vestnik MGSU*, 4, pp. 303-308. (in Russian).
 10. Loktev A.A., Loktev D.A. (2008). Transverse impact of a ball on a sphere with allowance for waves in the target. *Technical Physics Letters*, 11(34), pp. 960-963.
 11. Loktev A.A., Loktev D.A. (2015). Method for determining the distance to an object by analyzing the blurring of its image. *Vestnik MGSU*, 6, pp. 140-151. (in Russian).
 12. Mrochek Zh.A., Kozhuro L.M., Filonov I.P. (2000). Progressivnye tekhnologii vosstanovleniya i uprocheniya detalei mashin. [*Progressive technologies for the restoration and strengthening of machine parts.*] Minsk: UE "Technoprint", p. 268.
 13. Pul'ka Ch.V., Shablii O.N., Baranovskii V.N., Senchishin V.S., Gavrilyuk V.Ya. (2015). Ways to improve the technology of induction hardfacing of thin steel disks. *Automatic welding*, 5-6(742), pp. 64-67. (in Russian).
 14. Petrov G.L., Tumarev A.S. (1977). Teoriya svarochnykh protsessov. [*Theory of welding processes.*] Moscow: High school, p. 392.
 15. Rykalin N.N. (1951). Raschety teplovykh protsessov pri svarke. [*Calculations of thermal processes during welding.*] Moscow: MASHGIZ, p. 291.
 16. Frolov V.V., Vinokurov V.A., Volchenko V.N., Parakhin V.A., Arutyunova I.A. (1970). Teoreticheskie osnovy svarki. [*Theoretical basis of welding.*] Moscow: High school, p. 592.
 17. Yanke E., Emde F., Lesh F. (1964). Spetsial'nye funktsii (Formuly, grafiki, tablitsy). [*Special functions (Formulas, graphs, tables).*] Moscow: The science, p. 344.