

11. Vis̆niakov, N. Laser welding of copper-niobium microcomposite wires for pulsed power applications / N. Vis̆niakov, G. Mikalauskas, O. C̆erna'se'jus, J. S̆kamat // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2019. – Vol. 50, № 5. – P. 646–662.

12. Kapustynskiy, O. Optimization of the parameters of local laser treatment for the creation of reinforcing ribs in thin metal sheets / O. Kapustynskiy, N. Vi'sniakov, O. C̆erna's'ejus [at al.] : Proceedings of 24th International Conference «Mechanika-2019», May 2019, Kaunas, Lithuania.

УДК 624.042.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

А. И. Веремейчик, к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

Б. Г. Холодарь, к. т. н., доцент, старший научный сотрудник НИЧ, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: hbg@list.ru

Реферат

Исследована кинематика движения пятна нагрева при сканирующей лазерной закалке, теоретически определены размеры зон «пятно-промежуток» для различных скоростей движения лазерной головки. Для решения задачи теплопроводности используется метод мгновенно приложенного точечного источника (функций Грина) при соответствующем интегрировании воздействия по площади пятна нагрева. Разработан алгоритм и компьютерная программа расчета температурного поля, тепловых импульсов при сканирующей лазерной закалке сталей.

Ключевые слова: сканирующая закалка, температурное поле, лазер, пятно, луч.

SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD DURING SCANNING LASER QUENCHING

Abstract

The kinematics of the heating spot movement during scanning laser hardening is investigated, the sizes of the "spot-gap" zones are theoretically determined for different speeds of the laser head movement. The method of an instantly applied point source (Green's functions) is used to solve the problem of heat conductivity with the corresponding integration of the effect over the area of the heating spot. An algorithm and a computer program for calculating the temperature field, thermal pulses during scanning laser hardening of steels are developed.

Keywords: scanning hardening, temperature field, laser, spot, beam.

Введение

Воздействие движущегося теплового потока высокой интенсивности используется для модификации свойств материала в приповерхностной зоне. Задачей воздействия является целенаправленное изменение фазового состава

материала и его микроструктуры, что в свою очередь приводит к требуемому изменению механических свойств материала. При этом основным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит, прежде всего, от уровня и скорости нагрева и следующего за ним охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение [1].

Разработан алгоритм расчета и создана компьютерная программа для исследования тепловых процессов при лазерной закалке сталей движущимся источником нагрева со сканирующей системой, т. е. когда одновременно с движением ядра потока вдоль прямолинейной дорожки оно периодическим образом перемещается в поперечном направлении, двигаясь по траектории, которая представляет собой совокупность выходящих одна из другой последовательных поперечных линий, причем по условиям работы установки в точках этих линий интенсивность энергетического воздействия и скорость движения пятна может изменяться.

Некоторые результаты

Для лазерной обработки образцов применялся волоконный лазер непрерывного действия с максимальной мощностью 1 кВт. Технологический комплекс для лазерной закалки оборудован сканирующей системой, которая обеспечивает многократное перемещение пятна обработки по обрабатываемой поверхности с высокой частотой в направлении перпендикулярном направлению обработки [2]. Многократное перемещение лазерного пятна с высокой частотой обеспечивается применением системы двух дефлекторов (рисунок 1), которые согласованно совершают колебания во взаимно перпендикулярных направлениях.

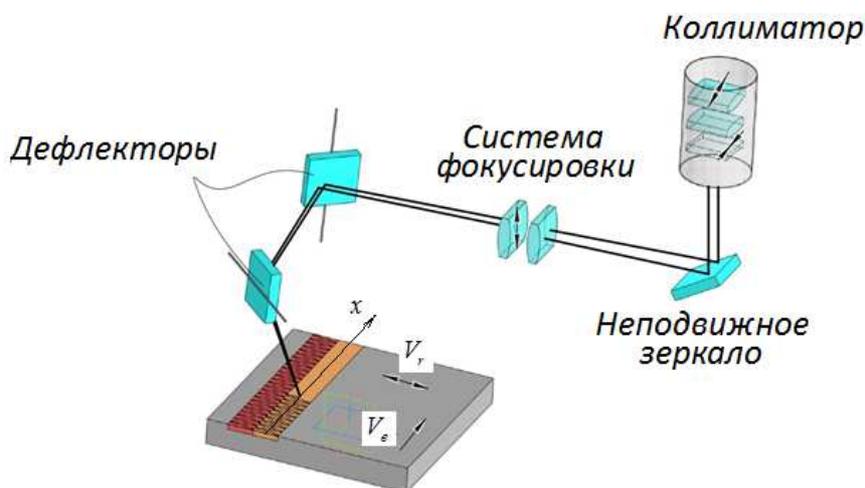


Рисунок 1 – Схема сканирующей системы

Разработанная программа учитывает, что при поверхностной обработке излучением волоконного лазера со сканирующей лазерный луч головкой производится отклонение лазерного излучения после прохождения нескольких поперечных линий, т. е. обрабатываемая дорожка представляет собой последовательность зон, состоящих из участков непосредственного нагружения (пятно воздействия) и “ненагруженных” промежутков. Такой способ при малом радиусе кругового ядра лазера дает возможность создавать в материале тепловое

поле определенной интенсивности при заданной номинальной мощности установки, что учтено при разработке программы.

В качестве исходных кинематических данных для расчетов принимались скорость движения лазерной головки вдоль дорожки, длина и ширина дорожки, число поперечных линий на пятне сканирования и частота повторений прохождения двух взаимосвязанных линий. По этим данным определен период времени, соответствующий возврату оси луча в точку с фиксированной поперечной координатой. Задаваемое на установке для лазерной закалки число линий N_{lin} может быть нечетным или четным (во время испытаний число линий соответствовало значениям 7 и 10), поэтому на пятне сканирования уместается целое или полуцелое число периодов поперечного движения луча, равное $N_{lin}/2$. В связи с тем, что оплавление поверхности обрабатываемого материала происходит в круге определенного радиуса, а не только в точках попадания оси луча лазера, при небольших скоростях движения головки лазера происходит непрерывное слияние зон обработки «пятно + промежуток», поэтому уточнение ситуации может быть проведено только при достаточно больших скоростях движения лазерной головки, когда пятна и промежутки между ними явным образом выделяются. Это дает возможность определить продольную составляющую скорости сканирования, которая является одинаковой для любых скоростей движения лазерной головки при одном и том же числе линий на пятне и частоте их прохождения.

При составлении программы вычислений температурных полей предполагается, что наличие постоянной продольной и периодической поперечной скоростей сканирования позволяет считать ось луча при сканировании движущейся вдоль дорожки по некоторой зигзагообразной линии.

С точки зрения кинематики движение оси луча можно представить, как сумму продольного переносного (вдоль оси x) и относительного продольного и поперечного движений, причем скорость переносного движения совпадает со скоростью лазерной головки (рисунок 1).

Для определения продольной относительной скорости были проведены эксперименты по нагружению плоского стального образца размерами $200 \times 20 \times 7$ мм со скоростью перемещения головки, равной $V_e = 20000$ мм/мин. На рисунке 2 показан след от воздействия на некотором участке дорожки.



Рисунок 2 – Обработанный образец

Несмотря на то, что к концу дорожки след становится более оплавленным за счет общего повышения температуры образца с течением времени воздействия, при большом числе образовавшихся зон обработки можно с достаточной точностью определить длину одной зоны L'_z , как отношение общей длины дорожки ($L_z \approx 198$ мм) к числу этих зон ($N = 18$).

Известно, что центр пятна должен вернуться после прохода пятна в точку с координатой $y = 0$, то при числе линий на пятне $N_{lin} = 7$, соответствующему 3,5 периодам $T_{laz} = 1/f$, $f = 220$ Гц, по формуле для длины зоны

$$L'_z = (V_e + V_r) \frac{N_{lin}}{2} T_{laz} + (V_e - V_r) k T_{laz}, \quad (1)$$

подбираем число k , которое должно быть полуцелым.

Принимаем из опыта при скорости $V_e = 20000$ мм/мин = $100/3$ см/с длину зоны в пределах $L'_z = 1,04 \dots 1,1$ см. Находим, что в выбранном интервале такое число k существует. На рисунке 3 приведена зависимость числа k от длины зоны «пятно + промежуток» L'_z .

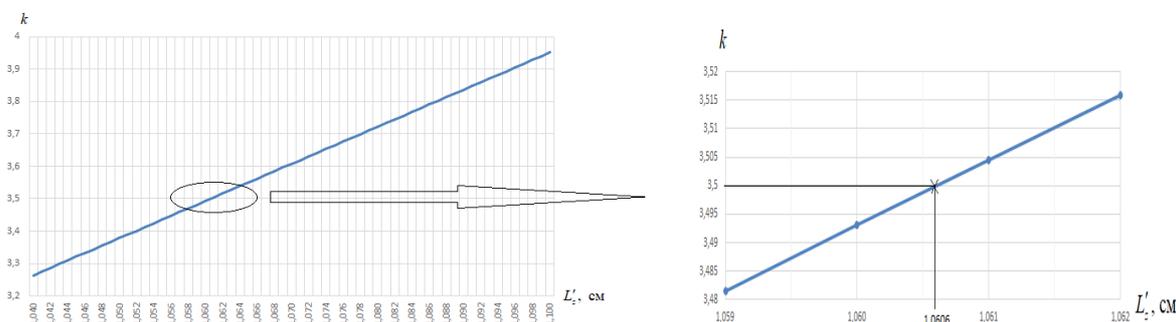


Рисунок 3 – Зависимость числа k от длины зоны «пятно + промежуток» L'_z при $V_e = 20000$ мм/мин

По результатам расчета находим: $k = 3,5 = 7/2 = N_{lin} / 2$. При расчетах принято

$$V_{rx} = \frac{2LongX \cdot f}{N_{lin}}, \quad V_{ry} = 2LongY \cdot f, \quad (2)$$

где $LongX = 2,25$ мм, $LongY = 4$ мм – продольный и поперечный размеры пятна сканирования, м.

По результатам расчета получено $V_{ry} = 176$ см/с, $V_{rx} = 14.14$ см/с.

Абсолютная скорость при движении по пятну при $V_e = 20000$ мм/мин

$$V_{ap} = V_e + V_{rx} = 47.48 \text{ см/с.}$$

Абсолютная скорость возвратного движения по промежутку между пятнами

$$V_{av} = V_e - V_{rx} = 19.19 \text{ см/с.}$$

Таким образом, найденное значение V_r можно принять как достаточно обоснованное и использовать его для режимов с другими значениями скорости переносного движения.

Для различных скоростей переносного движения определено число N_z зон на образце длиной 198 мм в зависимости от длины пятна воздействия L_p и длины возвратного движения L_v , длина зоны «пятно + промежуток» L'_z . Некоторые результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета количества зон

№ п/п	V_e , мм/мин	L_p , см	L_v , см	L'_z , см	N_z
1	300	0,23295	-0,21705	0,01591	1244,6
2	400	0,23561	-0,21439	0,02121	933,4
3	600	0,24091	-0,20909	0,03182	746,7
4	1000	0,25152	-0,19848	0,05300	373,4
5	2000	0,27803	-0,17197	0,10606	186,7
6	5000	0,35758	-0,0924	0,26515	74,7
7	8000	0,4371	-0,01288	0,4242	46,7
8	9000	0,4636	0,01364	0,4773	41,5
9	10000	0,4902	0,04015	0,5303	37,3
10	20000	0,7553	0,3053	1,0606	18,7

Знак «-» в L_v показывает, что следующее пятно накладывается на предыдущее, При $V_e = 8484$ мм/мин пятна не накладываются друг на друга и $L_v = 0$.

На рисунке 4 приведена зависимость размеров пятна и промежутка в зависимости от скорости переносного движения. Все зависимости имеют линейный характер.

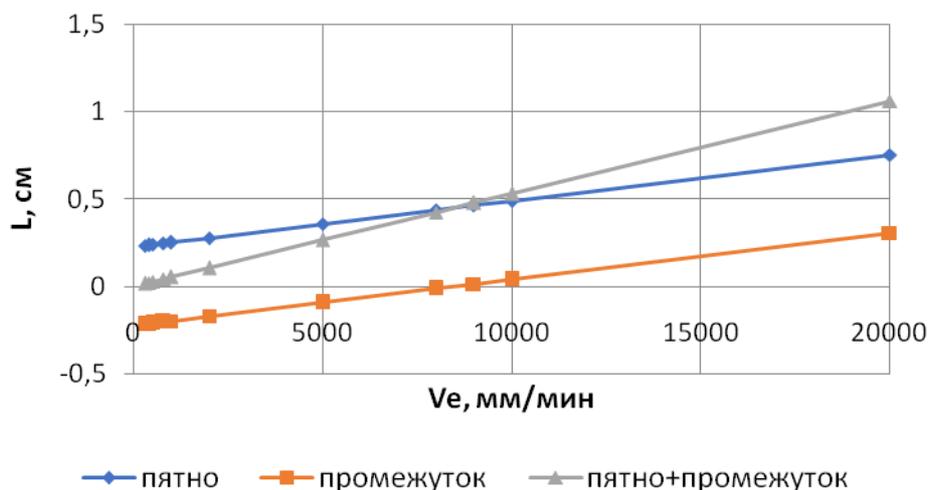


Рисунок 4 – Зависимости размеров пятна и промежутка от скорости переносного движения

Для источника нагрева, расположенного в точке $A(x, y, z)$, приращение температуры над исходным уровнем температуры тела в данной точке $A_0(x_0, y_0, z_0)$ в заданный момент времени t определяется выражением [3]

$$T(r, t) = \frac{Q}{8(\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right],$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, Дж; $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время, с; $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ – расстояние от источника тепла до рассматриваемой точки, м (рисунок 5).

Исходная температура принята равной нулю.

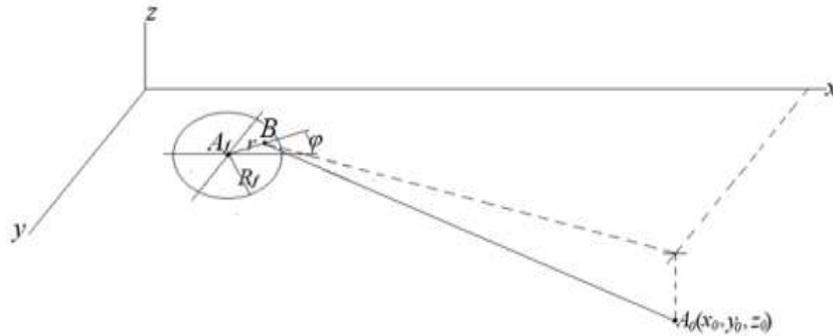


Рисунок 5 – Расстояние между точкой пятна и точкой A_0 тела

Поскольку источник излучения создает не точечный, а распределенный по некоторому закону поток, то величину Q можно представить в виде интеграла

$$\int q_0 \cdot f(a, t) da, \quad (4)$$

где q_0 – максимальная интенсивность потока, $f(a, t)$ – закон его распределения по площади a пятна нагрева в зависимости от текущего значения времени t , Функция $f(a, t)$ представима в виде произведения

$$f(a, t) = f(a) \cdot f(t). \quad (5)$$

В качестве $f(a)$ можно выбрать различные приближенные представления, в частности используются равномерный по площади или распределенный по гауссовому закону поток.

Поскольку тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности

$$T_s(r, t) = \int \left\{ \int T(r, t) ds \right\} d\xi, \quad (6)$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения $\xi_0=0$, S – переменная интегрирования по поверхности.

Распределение интенсивности воздействия по площади ядра подчинено гауссовому закону $q = q_0 \exp(-\gamma r^2)$, где r – расстояние от оси луча, γ – коэффициент сосредоточенности потока, Поскольку при этом r меняется от нуля до бесконечности, при решении задач зона ядра потока ограничивается некоторым радиусом R_f , так что выражение для q можно записать в виде $q = q_0 \exp\left(-\left(r/R_f\right)^2\right)$ [4].

Поскольку при движении луча по дорожке предполагается изменение потока во времени, то множитель q_0 следует записать в виде $q_0 \cdot F(t)$, где функция времени $F(t)$ должна описывать фактический закон изменения интенсивности потока и, таким образом, должна быть введена в подынтегральное выражение (4) при значениях $0 \leq F(t) \leq 1$. Эту функцию далее представляем в виде произведения $F(t) = Coef(t) \cdot G_f(t)$ так, чтобы функция $Coef(t)$ учитывала изменение

общей мощности источника (например, ее отключение до значения $F(t) = 0$ на участках промежутка между пятнами), а $G_f(t)$ – изменение мощности при нахождении оси луча вблизи продольных краев дорожки. Необходимость введения функции $G_f(t)$ связана с тем, что возле краев дорожки относительная скорость поперечного движения луча принимает значения, близкие к нулю и равные ему, что в реальных условиях работы установки вызывает возможность значительного перегрева материала.

Если рассматривать вопрос об определении температуры для точек, находящихся на достаточном удалении от оси луча источника, то внутренний интеграл в (6) можно определить, относя при этом все энергетическое воздействие к оси луча, и для определения расстояния между источником и рассматриваемой точкой использовать приведенное выше в (3) определение этого расстояния. Однако учитывая наличие достаточно большой зоны оплавления вдоль линий пятна воздействия на поверхности образца, более правильным будет воспользоваться расчетной схемой, приведенной на рисунке 5, которая учитывает, что каждая точка ядра потока имеет не только свой уровень интенсивности воздействия, но и свое расстояние до рассматриваемой точки A_0 с координатами x_0, y_0, z_0 .

При этом подынтегральное выражение в (6) включает в себя экспоненциальную переменную составляющую Ψ с аргументом, зависящим от времени, координат выделенной точки A_0 и окружающих ее точек, которые могут быть взяты дополнительно в прилегающем к ней объеме материала, текущих координат точки A_f оси луча и положения точки B внутри ядра потока (переменные r и φ на рисунке 5):

$$\Psi = \exp \left[- \left(\frac{r^2 \left(1 + \frac{4a \cdot s}{R_f^2} \right) + \left((x_k - x_f)^2 + (y_k - y_f)^2 + z_k^2 - 2r(x_{0f} \cos \varphi + y_{0f} \sin \varphi) \right)}{4a \cdot s} \right) \right], \quad (7)$$

Где $s = t_k - t_f$; $x_{0f} = x_0 - x_f$; $y_{0f} = y_0 - y_f$; x_k, y_k, z_k – координаты точки, выделенной внутри объема вокруг точки A_0 , м.

В формуле (7) подстрочным индексом « f » отмечено значение координат оси луча на поверхности образца в текущий момент времени t_f . Само интегрирование по времени t_f должно производиться от начального момента $t_0 = 0$ до заданного конечного t_k значения $t_k \geq t_f$ и, таким образом, будет учитывать смещение оси потока вдоль дорожки и соответствующий общий разогрев тела. Окончательно вместо (6), с учетом сделанных выше определений, получаем расчетную формулу в виде

$$T = \frac{q_0}{8\rho c (\pi a)^{3/2}} \int_0^s \int_0^{R_f} \int_0^{2\pi} \frac{F \cdot \Psi}{s^{3/2}} r dr d\varphi ds, \quad (8)$$

где F и Ψ отражают временные и пространственные характеристики воздействия теплового потока. Наличие внутри подынтегрального выражения тригонометрических функций вызывает необходимость в одновременном численном

интегрировании по r и φ и в связи с этим заметно увеличивает длительность проведения вычислений. Как сам интеграл (6), так и его внутренние интегралы в программе вычисляются по методу Симпсона.

Заключение

Разработана программа для исследования тепловых процессов в зоне действия лазерного луча при сканирующей закалке. В программе предусмотрена возможность проведения вычислений уровня температуры одновременно для нескольких точек, располагающихся в прилегающем к точке A_0 объеме материала. Кроме того, программа позволяет определять тепловые импульсы, импульсы структуризации и время структуризации в выбранных точках и сечении дорожки [5], что расширяет возможность прогнозирования результатов термообработки и позволяет оценить, какая часть тепловой энергии расходуется на структурообразование материала в зоне термического влияния. Результаты расчета на каждом шаге времени выводятся в файл *Rezultat.dat*. В начальной части файла для контроля ввода исходных данных выводятся наименования и пояснения к ним для основных параметров материала, режима нагружения и организации вывода, а также их числовые значения. Изменение координат x_f , y_f точки A_f по времени выводится дополнительно также в отдельный файл *CoordXY.dat*.

Список цитированных источников

1. Веремейчик, А. И. Некоторые аспекты определения температурных полей при термоупрочнении металлоизделий / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Перспективные материалы и технологии / Антанович А. А. [и др.] ; под ред. В. В. Рубаника. – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – Гл. 18. – С. 218–237.
2. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // Весн. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443.
3. Рыкалин, Н. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Веремейчик, А. И. Температурное поле в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным по прямоугольной площадке потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Фундаментальные и прикладные задачи механики : материалы Междунар. науч. конф., Москва, 6–9 дек. 2022 г. : в 2 ч. / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана ; сост.: П. М. Шкапов, А. И. Игнатов. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. – Ч. 1. – С. 66–71.
5. Веремейчик, А. И. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Весн. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 318–330.

References

1. Veremejchik, A. I. Nekotorye aspekty opredeleniya temperaturnykh polej pri ter-mouprochnenii metalloizdelij / A. I. Veremejchik, V. M. Hvisevich, B. G. Holodar' // Perspektivnye materialy i tekhnologii / Antanovich A. A. [i dr.] ; pod red. V. V. Rubanika. – Minsk : IVC Minfina, 2023. – Gl. 18. – S. 218–237.
2. Devojno, O. G. Modelirovanie poverhnostnoj zakalki s ispol'zovaniem skaniruyushchego optovolokonnoho lazera / O. G. Devojno, V. V. Zharskij, A. P. Pilipchuk // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. Navuk. – 2018. – T. 63, № 4. – S. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>

3. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov / N. N. Rykalin [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 496 s.

4. Veremejchik, A. I. Temperaturnoe pole v poluprostranstve pri nagreve dvizhushchimsya istochnikom s ravnomerno-raspredelennym po pryamougol'noj ploshchadke potokom / A. I. Veremejchik, B. G. Holodar' // Fundamental'nye i prikladnye zadachi mekhaniki : materialy Mezhdunar. nauch. konf., Moskva, 6–9 dek. 2022 g. : v 2 ch. / Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. N. E. Baumana ; sost.: P. M. SHkapov, A. I. Ignatov. – M. : MGTU im. N. E. Baumana, 2023. – CH. 1, – С. 66–71.

5. Veremejchik, A. I. Modelirovanie teplovyh processov v poluprostranstve pri nagreve dvizhushchimsya istochnikom s ravnomerno-raspredelennym teplovym potokom / A. I. Veremejchik, B. G. Holodar' // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi, Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2023. – T. 68, № 4. – S. 318–330.

УДК 669.79

ВЫПЛАВКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

***В. А. Калинин**, к. т. н., доцент, доцент кафедры машины и технология литейного производства, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: kvlad@bntu.by*

***А. А. Андрушевич**, к. т. н., доцент, доцент кафедры машины и технология металлов, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: andru49@mail.ru*

***Л. П. Долгий**, к. т. н., заведующий научно - исследовательской инновационной лабораторией литейных технологий, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail : dolgi@bntu.by*

***С. В. Марцева** Старший преподаватель кафедры экономики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail : dolgi@bntu.by*

Реферат

В работе рассмотрены преимущества индукционной плавки в среде вакуума, обеспечивающие получение высоколегированных сплавов на основе тугоплавких компонентов, свободных от вредных примесей с заданными свойствами. Рассмотрены процессы, происходящие в сплавах при плавке, выдержке и разливе. Получаемые сплавы в первую очередь планируется использовать в качестве защитных покрытий композиционных материалов. К числу указанных сплавов относятся тугоплавкие износостойкие сплавы, например, системы Cu – Ti и высокоэнтропийные сплавы, представляющие собой композиции, содержащие от 5 до 13 элементов с примерно равными концентрациями. Представлена структура получаемого материала и распределение элементов по сечению слитка.

Ключевые слова: Индукционная плавка, футеровка, дегазация, рафинирование, композиционные материалы, сложнолегированные тугоплавкие сплавы, высокоэнтропийные сплавы.