

Научная статья

УДК 621.9.048.7

DOI 10.48012/1817-5457_2025_3_151-156

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ «В₄С-BN» В УСЛОВИЯХ КОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Ипатов Алексей Геннадьевич^{1✉}, Харанжевский Евгений Викторович²

¹Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

²УдГУ, Ижевск, Россия

¹Ipataw.al@yandex.ru

Аннотация. Разработка современных технологических процессов нанесения функциональных покрытий сопряжена с необходимостью апробации процесса структурообразования в условиях моделирования. Вопросы математического моделирования широко применяются в современном машиностроительном производстве и позволяют с высокой долей вероятности прогнозировать режимы, свойства и характеристики создаваемых объектов. В данном исследовании предложена математическая модель оплавления тонкого керамического слоя на основе карбонитридной порошковой композиции на поверхности стальной подложки. Реализуемая численная модель позволяет в широком диапазоне рассматривать процессы консолидации порошковых частиц между собой и формирование устойчивых адгезионных связей за счет переплава с металлической подложкой. Разрабатываемая модель является частным случаем селективного лазерного плавления в порошковых средах и в качестве основных зависимых переменных принимаются температура, пористость, удельная энтальпия. Проведены компьютерные расчеты модели сплавления одиночного трека из порошка керамической смеси В₄С-BN на стальной поверхности. Проведен анализ нестационарных тепловых полей, полей пористости, формы и размеров сплавленного трека. На основе анализа нестационарных тепловых полей, полей пористости получены энергетические и кинематические режимы, обеспечивающие формирование устойчивого керамического слоя с глубиной проплавления до 30 мкм и зоной активного перемешивания 5-15 мкм, толщиной порошкового слоя $h_0 = 30$ мкм. Параметры лазерной обработки: эффективный диаметр лазерного луча $D_0 = 30$ мкм, частота лазерной генерации $\nu = 20$ кГц, средняя мощность лазера $P_{cp} = 35$ Вт, длительность импульса $\tau_{imp} = 100$ нс, скорость лазерной обработки $v = 0,1$ м/с.

Ключевые слова: порошковая среда, консолидация частиц, математическая модель СЛП, теплофизические процессы, конвективное перемешивание.

Для цитирования: Ипатов А. Г., Харанжевский Е. В. Численная модель оплавления порошковой композиции «В₄С-BN» в условиях короткоимпульсной лазерной обработки // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3(83). С. 151-156. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_3_151-156.

Введение. Разработка инновационных технологических процессов формирования функциональных покрытий требует большого экспериментального и научного опыта, направленного на обоснование и поиск технологических режимов, материалов и их характеристик с целью формирования структур с желаемыми физико-механическими свойствами. Процессы оптимизации могут занять длительный период времени и зачастую незначительное изменение в технологических параметрах процесса могут привести к негативным характеристикам покрытия, что в дальнейшем потребует продолжения экспериментальных исследований. В результате оптимизации поиск решения приобретает сложную научную проблему. Одним из путей решения складывающейся проблемы

может стать компьютерное моделирование процессов формирования покрытия. За последнее время разработано множество функциональных покрытий на основе металлических и керамических соединений, которые обладают сложной структурой и уникальными свойствами [2, 5, 6]. В данной работе представлена численная модель оплавления порошковых частиц керамической композиции В₄С-BN, нанесенного на поверхность стальной подложки. В основу математического моделирования приняты результаты исследований авторов [3, 7]. Численная модель описывает порошковый слой, приближенный к сплошной среде, что позволяет прогнозировать структурообразование и свойства создаваемых покрытий значительно быстрее (существующие методы моделирования процессов оплавления

порошковых материалов описывают в приближении насыпки отдельных частиц) [3, 7].

Цель исследований: компьютерная реализация модели компактирования свободно насыщенного керамического порошкового слоя B_4C-BN на стальной основе.

Материал и методы исследований. Для разработки и реализации разрабатываемой модели были использованы программные комплексы на MatLab в связке с вычислительной средой Comsol Multiphysics 4.3.

Процесс лазерного оплавления керамической смеси B_4C-BN импульсным лазером является частным методом селективного лазерного плавления (СЛП). В реализуемой модели рассматривается отдельный трек порошкового слоя на стальной поверхности (рис. 1).

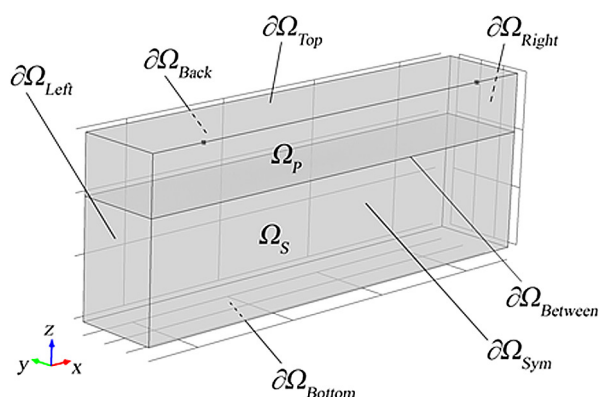


Рисунок 1 – Расчетная схема (Ω_p – трек порошкового слоя, Ω_s – стальная основа)

В ходе моделирования допущены упрощения [3]:

1. Модель сформулирована в приближении сплошной среды.

2. В модели не проводится прямой расчет конвекции расплавленного металла и влияния капиллярных сил на форму зоны оплавления.

3. Эффективный коэффициент теплопереноса учитывает вклад теплопереноса за счет конвекции только в зоне Ω_m расплава.

4. Эффект экранирования лазерного излучения плазменным факелом учитывается [4, 9].

5. Источник лазерного излучения рассматривался в модели как поверхностный тепловой источник.

6. Усадка порошка происходит только вдоль направления действия сил тяжести – вдоль оси аппликат z .

7. Граница $\partial\Omega_{Between}$ между порошковым слоем и подложкой неподвижна.

8. Коэффициент поглощения k лазерного излучения модели считается не зависящим от температуры [8, 10].

Для описания теплофизических процессов, происходящих в порошковой среде Ω_p , использовалась система дифференциальных уравнений в частных производных [3, 7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T), \quad (2)$$

$$\left[\overline{\Omega_m} \cap \varepsilon \leq \varepsilon_m : \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0, \quad (3a) \right.$$

$$\left. \overline{\Omega_m} \cap \varepsilon > \varepsilon_m : \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\varepsilon A \exp\left(-\frac{E_a(T)}{RT}\right), \quad (3b) \right.$$

$$\left. \Omega_m : \varepsilon(t + \Delta t) = \varepsilon_{mm} - \int_t^{t+\Delta t} \varepsilon_{mm}(t) A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dt, \quad (3c) \right.$$

$$\varepsilon_{mm} = \frac{\int \varepsilon d\Omega_m}{\int d\Omega_m} \quad (3d)$$

$$z = z_0 \left(\frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_{\bar{n}\bar{o}}} \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{\int_{z_B}^{z_B+z_0} \varepsilon dZ}{z_0}, \quad (5)$$

Используемые в условиях моделирования дифференциальные и интегральные уравнения определяют основные процессы, связанные с теплопроводностью в пористых средах (1), а также учитывают фазовые и структурные превращения (2), возникающие при интенсивном нагреве и охлаждении в условиях лазерной короткоимпульсной обработки [1, 10]. Кроме этого при моделировании особое внимание уделяется вопросам компактирования порошкового слоя при быстрых процессах нагрева и охлаждения. Система уравнений (3) дополнительно оценивает локальную пористость порошкового слоя. Локальная пористость формируемого покрытия определяется из 2 процессов [3, 4, 7]:

1. Формирование между порошковыми частицами перешейков, которые снижают пористость.

2. Уплотнение структуры покрытия под действием конвективного перемешивания жидких масс формирования газовых пор и их выхода из структуры.

Дополнительно вычисляется средняя плотность структуры по толщине порошкового слоя (уравнение 5), которая определяет положение рассматриваемого объема по оси z .

Первый механизм возникает по причине вязко-пластичного течения порошковой среды, находящейся под влиянием капиллярных сил [3, 7]. Второй (рис. 2,б) механизм уменьшения пористости – за счет образования и вывода газовых пор. Динамика изменения структуры и, следовательно, локальной пористости ε частиц порошка вычислялась численно с помощью метода фазового поля на масштабах отдельных частиц порошка и их конгломератов (рис. 2,а).

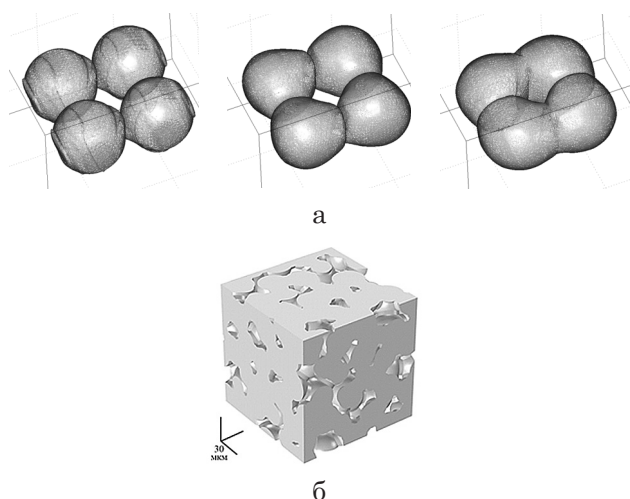


Рисунок 2 – Консолидация порошковых частиц за счет формирования перешейков (а), компактирования структуры под действием формирования и вывода газовых пор (б)

Моделирование реализовано в два этапа. На первом выполнены компьютерные модели сплавления одиночного трека из порошка смеси B_4C -BN с используемым на практике режимом лазерной обработки с равномерным распределением мощности лазера по времени ($P_{\text{ср}} = 35$ Вт). При нагреве порошка непрерывным лазером достигались температуры, превышающие температуру плавления керамической смеси B_4C -BN, и происходило жидкофазное сплавление порошка со стальной подложкой. На 2-м этапе рассматривалось послойное нанесение порошкового слоя на поверхность 1-го слоя.

Результаты численного моделирования

Численная модель лазерного плавления позволяет рассчитывать высокотемпературное сплавление порошка керамической смеси B_4C -BN высокочастотным импульсным лазером. Был проведен компьютерный расчет сплавления смеси (B_4C 60 вес. % – BN 40 вес.%) с используемыми на практике режимами лазерной обработки. Высота начальной насыпки порошка составила: $h_0 = 30$ мкм. Параметры лазерной обработки: эффективный диаметр лазерного луча $D_0 = 30$ мкм, частота лазерной генерации ν

$= 20$ кГц, средняя мощность лазера $P_{\text{ср}} = 35$ Вт, длительность импульса $\tau_{\text{имп}} = 100$ нс, скорость лазерной обработки $v = 0,1$ м/с. При исследуемых параметрах лазерной обработки из рассчитываемой модели получены такие характеристики процесса сплавления и получаемого покрытия:

1) При исследуемом режиме лазерной обработки наблюдались высокие скорости нагрева и охлаждения и высокие температурные градиенты вблизи зоны воздействия лазерного луча, как в течение лазерного импульса, так и в период между импульсами (рис. 3).

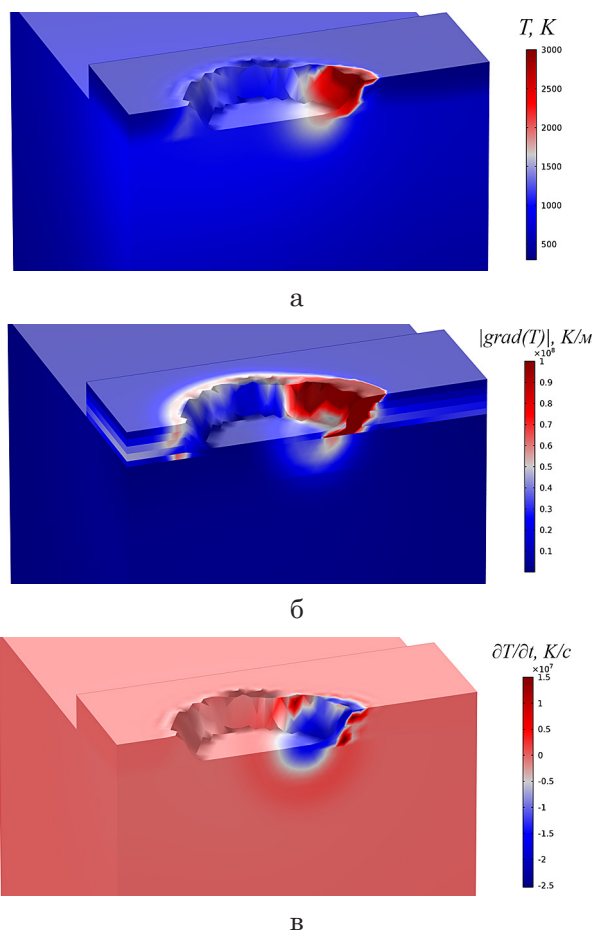


Рисунок 3 – Поле температуры T (а); поле абсолютного значения градиента температуры T (б); скорость охлаждения в период релаксации между импульсами (в)

При исследуемом режиме лазерной обработки температуры достигали температур плавления материала T , однако между импульсами тепловое поле успевало релаксировать до температур, меньших температуры плавления керамической смеси B_4C -BN.

2) Нестационарные поля скорости кристаллизации $v_{\text{кр}}$ между импульсами. Данный параметр чрезвычайно важен для получения функциональных покрытий с исследуемыми в проекте свойствами, поскольку необходимые структурные фазы покрытия могут быть получе-

ны только при высоких скоростях кристаллизации $v_{кр}$. При исследуемом режиме лазерной обработки скорость кристаллизации $v_{кр} \sim 0,2-0,4$ м/с. При неправильно подобранных параметрах лазерной обработки тепловое поле между импульсами не успевает релаксировать до температур, меньших температуры плавления керамической смеси B_4C-BN . В таком случае импульсную обработку можно рассматривать как псевдоднепрерывную лазерную обработку, что не позволит получать покрытия с исследуемыми в проекте свойствами.

3) Остаточная пористость покрытия ε , размеры и форма сплавленного трека (рис. 4). Качественное покрытие должно обладать остаточной пористостью, близкой к нулю. При исследуемом режиме лазерной обработки средняя остаточная пористость $\varepsilon_{cp} = 0,04-0,05$. Ширина сплавленного трека составила $b_{tr} = 90$ мкм. Толщина покрытия в модели составила $h = 5$ мкм, толщина $h = 2-8$ мкм наблюдалась в лабораторных исследованиях, что подтверждает адекватность используемой компьютерной модели.

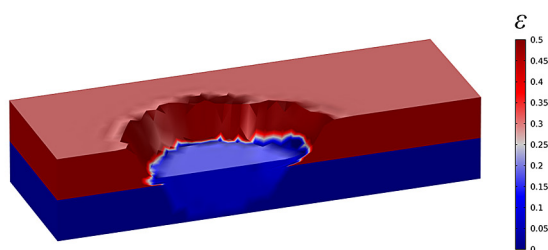


Рисунок 4 – Локальная пористость сплавленного трека во время лазерной обработки порошка керамической смеси B_4C-BN

4) Глубина проплавления в подложку $h_m \sim 30$ мкм; глубина активного конвективного перемешивания керамического покрытия с подложкой $h_{sub} \sim 5-15$ мкм.

Выводы. Разработана математическая модель теплопереноса и усадки керамических порошков при высокотемпературном воздействии высокочастотного лазерного излучения. Математическая модель численно реализована с помощью метода конечных элементов, построена компьютерная модель сплавления порошка керамической смеси B_4C-BN . Проведены компьютерные расчеты модели сплавления одиночного трека из порошка керамической смеси B_4C-BN . Проведен анализ нестационарных тепловых полей, полей пористости, формы и размеров сплавленного трека.

На основе анализа нестационарных тепловых полей, полей пористости получены энерге-

тические и кинематические режимы, обеспечивающие формирование устойчивого керамического слоя с глубиной проплавления до 30 мкм и зоной активного перемешивания 5-15 мкм, толщиной порошкового слоя $h_0 = 30$ мкм. Параметры лазерной обработки: эффективный диаметр лазерного луча $D_b = 30$ мкм, частота лазерной генерации $\nu = 20$ кГц, средняя мощность лазера $P_{cp} = 35$ Вт, длительность импульса $\tau_{imp} = 100$ нс, скорость движения лазерного луча $v = 0,1$ м/с.

Полученные результаты имеют высокий научный потенциал и могут быть использованы при разработке функциональных покрытий на основе керамических материалов.

Список источников

1. Борисов В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. Москва: Металлургия, 1987. 224 с.
2. Волков К. Г., Ипатов А. Г. Методика упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания наплавкой металлокерамических материалов // Воронежский научно-технический вестник. 2024. Т. 1. № 1(47). С. 3-10. DOI 10.34220/2311-8873-2024-3-10. EDN BZTBWS.
3. Гордеев Г. А. Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Гордеев Георгий Андреевич, 2020. 189 с. EDN YWZNYS.
4. Гордеев Г. А., Кривилев М. Д., Анкудинов В. Е. Численное моделирование лазерной обработки металлических порошковых материалов методом конечных элементов // Вестник Удмуртского университета. Физика. Химия. № 3. 2014. С. 15-22.
5. Ипатов А. Г., Волков К. Г., Малинин А. В. Керамические антифрикционные покрытия подшипниковых сопряжений турбокомпрессоров ДВС // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2024. № 4. С. 33-38. DOI 10.31044/1684-2561-2024-0-4-33-38. EDN RZBJSF.
6. Ипатов А. Г., Харанжевский Е. В. Эффект безызносности в трибосопряжениях, легированных висмутом // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 1(81). С. 162-167. DOI 10.48012/1817-5457_2025_1_162-167. EDN JYSMDO.
7. Gordeev G. A. [et al.]. Optimization of processing parameters in laser sintering of metallic powders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012; 27: 012079.
8. King W. E. [et al.]. Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. Applied Physics Reviews. 2015; 2(4): 041304.1-26.
9. Kostenkov, S. N., Kharanzhevskii, E. V., Krivilev, M. D. Determination of characteristics of laser radiation interaction with nanocomposite powder materials. Physics of metals and metallography. 2012; 113(1): 93-97.
10. Krivilyov M. D., Mesarovic S. D., Sekulic D. P. Phase-field model of interface migration and powder consolidation

in additive manufacturing of metals. Journal of Materials Science. 2017; 52(8): 4155-4163.

References

1. Borisov V. T. Teoriya dvuxfaznoj zony metallicheskoj slitki. Moskva: Metallurgiya, 1987. 224 s.
2. Volkov K. G., Ipatov A. G. Metodika uprochneniya detalej dvigatelej vnutrennego sgoraniya naplavkoj metallokeramicheskix materialov // Voronezhskij nauchno-tekhnicheskij vestnik. 2024. T. 1. № 1(47). S. 3-10. DOI 10.34220/2311-8873-2024-3-10. EDN BZTBWS.
3. Gordeev G. A. Modelirovanie teplofizicheskix processov v poroshkax metallov pri selektivnom lazernom plavlenii: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk / Gordeev Georgij Andreevich, 2020. 189 s. EDN YWZNYS.
4. Gordeev G. A., Krivilev M. D., Ankudinov V. E. Chislennoe modelirovanielazernoj obrabotki metallicheskih poroshkovyx materialov metodom konechnyx elementov // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Fizika. Khimiya. № 3. 2014. S. 15-22.
5. Ipatov A. G., Volkov K. G., Malinin A. V. Keramicheskie antifrikcionnyye pokrytiya podshipnikovyx sopryazhenij turbokompressorov DVS // Remont. Vossta-

novlenie. Modernizaciya. 2024. № 4. S. 33-38. DOI 10.31044/1684-2561-2024-0-4-33-38. EDN RZBJSF.

6. Ipatov A. G., Xaranzhevskij E. V. E'ffekt bezyznosnosti v tribosopryazheniyax, legirovannyx vismutom // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2025. № 1(81). S. 162-167. DOI 10.48012/1817-5457_2025_1_162-167. EDN JYSMDO.

7. Gordeev G. A. [et al.]. Optimization of processing parameters in laser sintering of metallic powders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012; 27: 012079.

8. King W. E. [et al.]. Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. Applied Physics Reviews. 2015; 2(4): 041304.1-26.

9. Kostenkov, S. N., Kharanzhevskii, E. V., Krivilev, M. D. Determination of characteristics of laser radiation interaction with nanocomposite powder materials. Physics of metals and metallography. 2012; 113(1): 93-97.

10. Krivilyov M. D., Mesarovic S. D., Sekulic D. P. Phase-field model of interface migration and powder consolidation in additive manufacturing of metals. Journal of Materials Science. 2017; 52(8): 4155-4163.

Сведения об авторах:

А. Г. Ипатов^{1✉}, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>;

Е. В. Харанжевский², доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-1525-2169>

¹Удмуртский ГАУ, 426069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 9

²УдГУ, 426034, Россия, Ижевск, ул. Университетская, 1

¹ipatow.al@yandex.ru

Original article

NUMERICAL MODEL OF MELTING OF THE POWDER COMPOSITION B₄C-BN UNDER THE CONDITIONS OF SHORT-PULSE LASER PROCESSING

Alexey G. Ipatov^{1✉}, **Evgeniy V. Kharanzhevsky**²

¹Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

²Udmurt State University, Izhevsk, Russia

¹ipatow.al@yandex.ru

Abstract. The development of modern technological processes for applying functional coatings is associated with the need to test the process of structure formation under modeling conditions. The issues of mathematical modeling are widely used in modern mechanical engineering production and allow with a high degree of probability to predict the modes, properties and characteristics of the created objects. This study proposes a mathematical model of melting of a thin ceramic layer based on a carbonitride powder composition on the surface of a steel substrate. The numerical model provides an opportunity to consider in a wide range the processes of consolidation of powder particles with each other and the formation of stable adhesive bonds due to remelting with a metal substrate. The developed model is a special case of selective laser melting in powder media and the temperature, porosity, specific enthalpy are taken as the main dependent variables. Computer calculations of the model of melting of a single track of B₄C-BN ceramic mixture powder on a steel surface were conducted. The analysis of non-stationary thermal fields, porosity fields, shape and size of the melted track was carried out. Based on the analysis of non-stationary thermal fields, porosity fields, the energy and kinematic modes were obtained ensuring the formation of a stable ceramic layer with a penetration depth of up to 30 μm and an active mixing zone of 5-15 μm, a powder layer thickness of $h_0 = 30$ μm. Laser processing parameters: effective laser beam diameter $D_b = 30$ μm, laser generation frequency $\nu = 20$ kHz, average laser power $P_{cp} = 35$ W, pulse duration $\tau_{imp} = 100$ ns, laser processing speed $v = 0.1$ m/s.

Key words: powder medium, particle consolidation, mathematical model of selective laser melting, thermophysical processes, convective mixing.

For citation: Ipatov A. G., Kharanzhevsky E. V. Numerical model of melting of the powder composition B_4C-BN under the conditions of short-pulse laser processing. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 3 (83): 151-156. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_3_151-156.

Authors:

A. G. Ipatov¹✉, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>;

E. V. Kharanzhevsky², Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1525-2169>

¹Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

²Udmurt State University, 1 Universitetskaya St., Izhevsk, Russia, 426034

¹ipatow.al@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена после рецензирования 26.08.2025;

принята к публикации 04.09.2025.

The article was submitted 19.08.2025; approved after reviewing 26.08.2025; accepted for publication 04.09.2025.

Научная статья

УДК 621.314.222.6:004.94

DOI 10.48012/1817-5457_2025_3_156-165

ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10/0,4 КВ В MATLAB SIMULINK

Лансберг Александр Александрович

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Россия

lansbergaa@vk.com

Аннотация. Компьютерное моделирование является одним из наиболее достоверных способов исследования нагрузочных и аварийных режимов работы трансформаторов. Наиболее функциональным инструментом моделирования является программный комплекс MATLAB Simulink. В большинстве работ не приводятся сведения по обоснованию электрических параметров компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ и оценке их достоверности. Цель исследования – обосновать параметры компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink и оценить их достоверность. С использованием литературных источников были определены электрические параметры для наиболее часто используемых силовых трансформаторов 10/0,4 кВ сельских электрических сетей. Это трансформаторы конструкции ТМ с номинальными напряжениями 10/0,4 кВ и мощностью от 63 кВА до 630 кВА, со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 . Достоверность рассчитанных параметров была оценена путем сравнения потерь холостого хода и короткого замыкания, полученным по результатам моделирования, с табличными, а также путем моделирования режимов устойчивых коротких замыканий на выводе 0,4 кВ трансформатора и сравнения значений токов аварийных режимов с расчетными по методу симметричных составляющих. Выявлено, что при компьютерном моделировании аварийных режимов на выводе 0,4 кВ трансформатора значения тока однофазного короткого замыкания, рассчитанные с использованием метода симметричных составляющих, по сравнению с результатами моделирования отличаются не более чем на 1 %, а для двухфазного и трехфазного коротких замыканий – не более чем на 4 %. При этом потери холостого хода и короткого замыкания, полученные в ходе моделирования, отличаются от паспортных значений не более чем на 1 %. Результаты исследования показали, что рассчитанные параметры силовых трансформаторов 10/0,4 кВ могут использоваться для моделирования режимов их работы в программном комплексе MATLAB Simulink.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, компьютерная модель, силовой трансформатор, короткое замыкание, потери холостого хода, потери короткого замыкания.

Для цитирования: Лансберг А. А. Параметры силовых трансформаторов для компьютерной модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3 (83). С. 156-165. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_3_156-165.