



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-77-83>

УДК 621.373.826

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Е. Б. ШЕРШНЕВ

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (Гомель, Республика Беларусь)

Аннотация. Представлены результаты исследования лазерной обработки кристаллов природных и искусственных алмазов в технологиях микроэлектроники методом термической лазерной сепарации. Проведен анализ физико-химических явлений, наблюдаемых в результате теплового воздействия лазерного излучения на анизотропные материалы в различных кристаллографических направлениях. На основании критерия Гриффитса проанализирована механика хрупкого разрушения как результат формирования критических микромеханических напряжений, вызванных тепловым воздействием лазерного излучения. Решена нестационарная задача теплопроводности, рассчитаны температурные распределения в объеме материала, на основании которых получена информация об изменении упругих свойств кристаллов, приводящем к его управляемому разрушению в заданных направлениях. Результаты моделирования подтверждены экспериментально в процессе термической лазерной сепарации алмазного сырья путем формирования на заданной глубине в объеме кристалла локализованных областей критических термоупругих микронапряжений, являющихся исходной точкой линии управляемого разделения кристалла. Выявлены оптимальные режимы управляемого разделения кристаллов природных и искусственных алмазов при использовании лазера с диодной накачкой с длиной волны излучения 1064 нм.

Ключевые слова: лазерная обработка материалов, кристаллы алмаза, алмазы в электронных приборах, анизотропия упругих свойств.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шершнев, Е. Б. Особенности изготовления элементной базы высокотемпературной электроники лазерным излучением / Е. Б. Шершнев // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 77–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-77-83>.

FEATURES OF MANUFACTURING THE ELEMENT BASE OF HIGH-TEMPERATURE ELECTRONICS USING LASER RADIATION

EVGENY B. SHERSHNEV

Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the results of research on laser processing of natural and artificial diamond crystals in microelectronics technologies by thermal laser separation. An analysis of physical-chemical phenomena observed as a result of the thermal effect of laser radiation on anisotropic materials in various crystallographic directions is conducted. Based on the Griffiths criterion, the mechanics of brittle fracture as a result of the formation of critical micromechanical stresses caused by the thermal action of laser radiation are analyzed. The non-stationary problem of thermal conductivity was solved, temperature distributions in the volume of the material were calculated, on the basis of which information on the change of elastic properties of crystals leading to its controlled destruction in given directions was obtained. The simulation results were confirmed experimentally in the processes of thermal laser separation of rough diamonds by forming localized areas of critical thermoelastic microstresses at a given depth in the crystal volume, which are the starting point of the line of controlled crystal separation. Optimal modes of controlled separation of crystals of natural and artificial diamonds using a diode-pumped laser with a radiation wavelength of 1064 nm have been identified.

Keywords: laser processing of materials, diamond crystals, diamonds in electronic devices, anisotropy of elastic properties.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Shershnev E. B. (2025) Features of Manufacturing the Element Base of High-Temperature Electronics Using Laser Radiation. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 77–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-77-83> (in Russian).

Введение

Алмаз имеет существенные преимущества, например, перед Si и GaAs, как материал микроэлектроники, в частности, акусто- и оптоэлектроники. В приборах пикосекундной оптоэлектроники используется плазма носителей тока, генерированная мощным оптическим излучением. Высокая теплопроводность и электрическая прочность алмаза определяют большую стойкость к электрическому напряжению и импульсному току, т. е. позволяют создать достаточно высоковольтные и мощные приборы, детекторы элементарных частиц и прочие компоненты высокотемпературной электроники [1]. В настоящее время приборы на основе полупроводниковых алмазов становятся реальностью, поскольку промышленность освоила выпуск синтетических алмазов, стоимость которых не выше стоимости обычных полупроводниковых материалов.

Лазерная обработка имеет существенные преимущества перед традиционными механическими способами обработки кристаллов алмаза [2–4]. Преимуществом данной технологии является возможность получения узких резов с минимальной зоной термического влияния в сочетании с высокой производительностью процесса размерной обработки. Кроме того, благодаря возможности вариации параметров лазерного излучения такой процесс можно относительно легко автоматизировать. Особо важный раздел научных исследований – изучение особенностей лазерной обработки кристаллов алмазов в различных кристаллографических направлениях [4].

Температура плавления $T_{пл}$ алмаза лежит в диапазоне 3700–4000 °С. При микродеформации кристаллов алмаза в условиях высоких температур ($\sim 0,3T_{пл}$) может наблюдаться их хрупкое разрушение, обусловленное объемно-напряженным состоянием, концентрацией термоупругих напряжений, примесей и дефектов структуры. Для анализа возможности реализации метода термической лазерной сепарации (ТЛС) [5] в кристаллах алмаза с последующим образованием управляемой трещины необходима информация о распределении термоупругих напряжений в объеме обрабатываемого алмазного образца. Преимущество ТЛС в том, что эта технология лазерной резки без абляции и, следовательно, без пропила.

ТЛС представляет собой двухэтапный процесс. На первом на краю пластины лазером создается заранее определенная точка разрыва для инициирования образования трещины, или линия разрыва на поверхности пластины, чтобы направлять распространение трещины вдоль линии нарезки. Это достигается путем модификации материала импульсным абляционным лазером. Образование трещины и отделение слоя достигаются на втором этапе путем создания сжимающего напряжения нагреванием и растягивающего напряжения охлаждением определенной точки на поверхности пластины. Нагрев пластины достигается с помощью сфокусированного лазера инфракрасного диапазона (1064 нм), работающего в квазинепрерывном режиме, с последующим охлаждением нагретой зоны посредством струи водяного аэрозоля [5]. При этом алмаз обладает ярко выраженной «спайностью», поэтому геометрия трещины при фиксированных параметрах лазерного излучения зависит от кристаллографической плоскости, по которой она распространяется.

Анизотропия упругих свойств кристаллической решетки алмаза

Согласно классификации Браве, кристаллическая решетка алмаза соответствует кубической сингонии. Поэтому полагается, что его упругие свойства описываются тремя независимыми компонентами тензора модулей упругости Юнга, а именно: $\sigma_{11} = 1079$ ГПа, $\sigma_{12} = 124$ ГПа, $\sigma_{44} = 578$ ГПа [4]. Расчет полей термоупругих микронапряжений, возникающих в кристаллах алмаза в условиях лазерного воздействия, выполнялся вдоль трех осей симметрии: второго L_2 , третьего L_3 и четвертого L_4 порядков.

Значения локальной температуры кристалла характеризуют переход от квазихрупкого к вязкому виду разрушения. При этом в различных кристаллографических плоскостях предельное значение такой температуры отличается. Также установлено, что она ниже у синтетических алмазов, что объясняется высокой концентрацией примесей парамагнитного азота. При хрупком разрушении кристаллов происходит образование новых поверхностей. В этом случае ключевую роль играет свободная поверхностная энергия F , для значений которой характерна анизотропия

в зависимости от выбранной плоскости кристаллической решетки алмаза, как это представлено в табл. 1 [6].

Таблица 1. Значения свободной поверхностной энергии по различным плоскостям кристаллической решетки алмаза
Table 1. Values of free surface energy on different planes of the crystal lattice of a diamond

Плоскость	(100)	(110)	(111)	(210)	(211)	(221)	(311)	(320)	(321)	(332)
$F, \text{ Дж/м}^2$	18,4	13,0	10,6	16,4	15,0	12,2	16,6	15,3	14,3	11,7

В технологиях лазерной обработки материалов используется ряд критериев хрупкого разрушения, характеризующихся предельными значениями соответствующих физических величин и их коэффициентов. Существует классический критерий Гриффитса [7], согласно которому при достаточном значении микромеханического напряжения трещина развивается в плоскости, которой соответствует наименьшая поверхностная энергия. Таким образом, в случае раскалывания в вершине локальной области критических термоупругих микронапряжений (КТМ) образуется остаточное избыточное механическое напряжение, обусловленное взаимодействием на границе алмаз-расплав. Геометрическое место зоны КТМ можно установить на основании информации о распределении термоупругих микромеханических напряжений. В дальнейшем процесс раскалывания алмаза идет вдоль плоскости (111), для которой удельная поверхностная энергия минимальна (табл. 1.)

Постановка задачи и моделирование

Распределение температур, сформированное лазерным тепловым источником, можно получить, решив нелинейную осесимметричную задачу теплопроводности (т. е. решив в цилиндрической системе координат). За счет изменения положения фокуса лазерного луча существует возможность формировать тепловой источник как на поверхности обрабатываемого объекта, так и в его объеме. Математическое моделирование представленной задачи сводится к решению классического дифференциального уравнения теплопроводности параболического типа

$$\rho c \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad}(T(\vec{r}, t))) = f(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где ρ – плотность; c – теплоемкость; T – термодинамическая температура; t – время; λ – коэффициент теплопроводности; \vec{r} – вектор координат x, y, z (при этом z направлена вдоль оси лазерного излучения); $f(\vec{r}, t)$ – интенсивность тепловыделения (плотность мощности тепловых источников) в момент времени t .

Применительно к случаю ТЛС представляет интерес моделирование лазерной обработки равномерно движущимся тепловым источником

$$f(\vec{r}, t) = P_0 \exp \left[\frac{-(x - vt)^2}{A^2} - \frac{-(y)^2}{B^2} - \gamma z \right], \quad (2)$$

где P_0 – плотность мощности в центре зоны термического воздействия с учетом отражения на заданной длине волны; v – скорость сканирования; A, B – полуоси эллиптического гауссова пучка; γ – коэффициент поглощения среды.

Задачи (1), (2) имеют известное решение, различные вариации которого представлены в [8–10]. Кроме того, задачи допускают численное решение, основанное на построении конечно-разностной схемы. Для решения задачи теплопроводности использовался модуль `pde-toolbox` компьютерной системы автоматизации MATLAB [11]. При этом можно варьировать размеры обрабатываемого образца, его физические характеристики, такие как плотность, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, плотность мощности, локализация теплового источника (создается лазерным излучением), температура и условия теплообмена с окружающей средой, граничные и начальные условия. Средства графической визуализации MATLAB позволяют получить изображение распределения температуры (при лазерном излучении 1,06 мкм) в любом сечении образца в плоскости z и схему направления тепловых потоков в произвольный момент времени, как это продемонстрировано рис. 1.

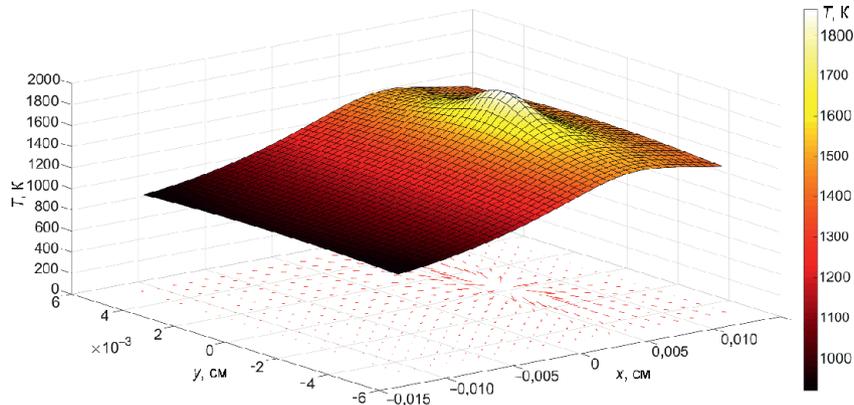


Рис. 1. Распределение температур в сечении образца при плотности мощности теплового источника $2 \cdot 10^6$ Вт/см²
Fig. 1. Temperature distribution in the sample cross-section at the power density of a thermal source of $2 \cdot 10^6$ W/cm²

При определении термоупругих микронапряжений будем пренебрегать инерционными членами в уравнении движения, что соответствует рассмотрению установления «стационарного» напряженного состояния как некоторой последовательности равновесных состояний. Для исследуемой системы характерна квазистатическая модель термоупругости, т. е. напряженное состояние наступает значительно быстрее, чем термодинамическое равновесие. Это следует из того, что скорость распространения упругих колебаний (скорость звука) в материале значительно превышает скорость движения теплового фронта. Отметим, что даже при внезапном изменении температуры на границе упругого полупространства погрешность в определении величины термоупругих, связанная с пренебрежением инерционными эффектами, оказывается несущественной. Величину термоупругих механических микронапряжений σ_{ij} можно определить, используя формулу [12]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\alpha\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{L} \int_0^L T(\vec{r}, t) d\vec{r}, \quad (3)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹; μ, λ – коэффициенты Ламе.

Используя (3), можно построить распределение (поле) механических микронапряжений σ в любом сечении образца на основании пространственного распределения температур (рис. 2). Распространение трещины сопровождается разрывом ковалентных связей и высвобождением упругой энергии, величина которой определяется значением микромеханического напряжения.

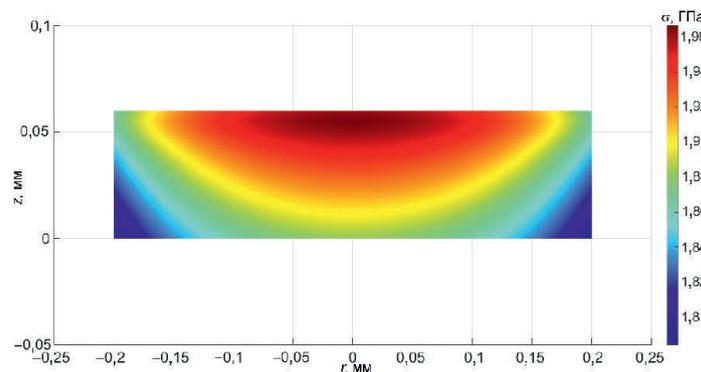


Рис. 2. Распределение механических микронапряжений σ в сечении образца, сформированных лазерным излучением 1,06 мкм при плотности мощности теплового источника $2 \cdot 10^6$ Вт/см²
Fig. 2. Distribution of mechanical microstresses σ in the cross-section of the sample formed by laser radiation of 1.06 μ m at the power density of the heat source $2 \cdot 10^6$ W/cm²

Управляемое термораскалывание алмаза сводится к локальному управляемому лазерному нагреву по требуемому контуру, режим которого инициирует появление трещины в кристалле, которая следует за лазерным лучом по поверхности материала. Лазерное скрайбирование обеспечивает возможность достаточно точного разделения алмазных пластин.

Результаты исследований и их обсуждение

Основа технологии управляемого лазерного термораскалывания алмаза – зарождение первичной микротрещины и дальнейшее управление ее развитием посредством лазерного излучения и охлаждающего потока аэрозоля (хладагента) (рис. 3). Микротрещина зарождается на первоначальном дефекте, который искусственно формируется с использованием импульсного лазера по механизму абляции. Затем эту микрообласть подвергают воздействию лазерного излучения специальной геометрии (например, в виде эллипса). Хладагент из форсунки попадает на нагретую после прохода лазерного излучения область поверхности, вызывая избыточное микромеханическое термонапряжение для создания управляемой микротрещины.

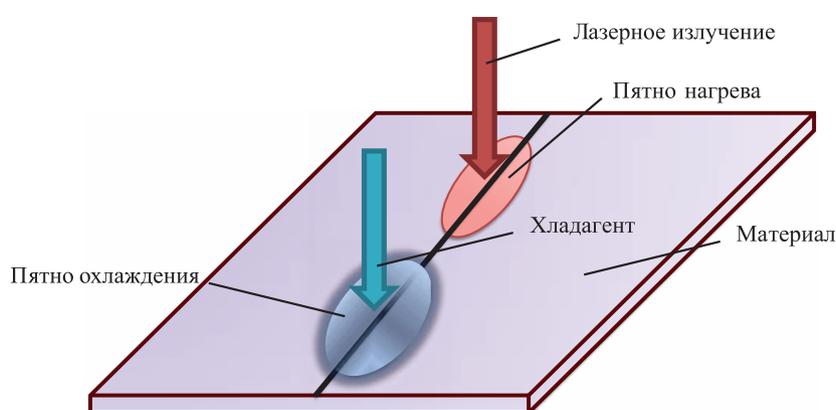


Рис. 3. Схема процесса управляемого лазерного термораскалывания алмаза
Fig. 3. Scheme of the process of controlled laser thermal cleavage of diamond

В результате анализа данных, полученных в процессе компьютерного моделирования, установлено, что термоиндуцированное микромеханическое напряжение σ_{33} достигает максимального значения не на поверхности пластины, где оно в силу граничных условий равно нулю, а на определенной глубине (0,5–0,8 мм), что приводит к формированию необходимой для начала разделения материала локализованной области КТМ. Данные моделирования использовались при подборе технологических режимов формирования зоны КТМ с целью получения направленного профиля исходной области управляемого раскалывания при высокой скорости обработки.

Экспериментальные исследования проводились на модернизированной лазером с диодной накачкой RL10Q установке ЭМ-260, предназначенной для обточки и распиловки алмазного сырья. Входящий в состав установки твердотельный лазер квазинепрерывного действия RL10Q представляет собой источник лазерного излучения с длиной волны 1064 нм, работающий в режиме модуляции добротности резонатора, состоящий из источника питания и управления и излучателя. Номинально лазер работает в режиме генерации основной поперечной моды (TEM₀₀) при частоте повторения импульсов 0–20 кГц. Поляризация выходного излучения – линейная, вертикальная, 100:1. Диаметр пучка на выходном зеркале (по уровню 0,1 мощности излучения) – 0,6 мм, расходимость – не более 2,6 мрад. Средняя мощность лазерного излучения при частоте следования импульсов 5 кГц – 7,5 Вт. Длительность импульса лазерного излучения при частоте следования импульсов 5 кГц – 3 мкс. Потребляемая мощность – не более 600 Вт. Глубина обработки составляла ~250 мкм. Опытным путем был подобран параметр $\beta/2 = 0,210$ рад – наклон поверхности стенки реза относительно вертикали, позволяющий сформировать ширину реза на поверхности от 100 до 250 мкм. Значение параметра «минимум кривых» (количество контуров в последнем слое обработки) было установлено равным единице для формирования V-образного профиля реза.

Формирование локализованной области КТМ в кристаллах алмаза СТМ «Алмазот» с применением модернизированной установки ЭМ-260 (использующей лазерный источник с диодной накачкой) позволяет при достаточной глубине получать исходную микротрещину с линейными размерами до 100 мкм.

Заключение

1. Выполнено численное моделирование процесса термической лазерной сепарации лазерного термораскалывания кристаллов алмаза излучением с длиной волны 1064 нм. Результаты моделирования верифицированы экспериментально для следующих технологических режимов: частота следования лазерных импульсов 1–15 Гц, энергия в импульсе 10–20 мДж, длительность импульса – до 15 нс. Время лазерной обработки при указанных условиях составляло 10–120 с.

2. Анизотропия теплофизических и механических свойств кристаллов алмаза позволяет производить его обработку методом термической лазерной сепарации в разных кристаллографических направлениях с различной эффективностью. Это может быть использовано для расширения номенклатуры изделий электронной техники.

Список литературы

1. Синтетические алмазы СТМ «Алмазот» – результаты исследований и некоторые применения / Н. М. Казючич [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию каф. физики полупроводников и наноэлектроники, г. Минск, 12–13 окт. 2016 г. Минск: Изд. центр Бел. гос. ун-та, 2016. С. 62–67.
2. Изнашивание монокристаллов алмаза / А. М. Бочаров [и др.]. Минск: Беларуская навука, 1996.
3. Коваленко, В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. Киев: Техника, 1987.
4. Митягин, А. Ю. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной электроники / А. Ю. Митягин, А. А. Алтухов, А. Ю. Митягина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2009. № 1. С. 53–58.
5. Advances in Thermal Laser Separation: Process Monitoring in a Kerf-Free Laser-Based Cutting Technology to Ensure High Yield / М. С. Baretto [et al.] // Procedia CIRP 74. 2018. P. 645–648.
6. Шкадов, А. И. Физические основы лазерной обработки алмазов / А. И. Шкадов. Смоленск, 1997.
7. Назаров, С. А. Критерий Гриффитса для трещины отрыва с нелинейными эффектами в концевых зонах / С. А. Назаренко, О. Р. Полякова // Доклады Академии наук. 1994. Т. 335, № 2. С. 182–184.
8. Решение уравнения теплопроводности цилиндрического стержня / Т. Ж. Мазаков [и др.] // Вестник Казахского университета технологии и бизнеса. 2020. № 1. С. 13–21.
9. Оптимизация параметров лазерной обработки алмазов / В. А. Емельянов [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. 2022. Т. 53, № 4. С. 30–36.
10. Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения / В. А. Емельянов [и др.] // Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. Естественные науки. 2022. Т. 132, № 3. С. 117–120.
11. Дьяконов, В. П. MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2012.
12. Ненахов, Е. В. Оценки температурных напряжений в моделях динамической термоупругости / Е. В. Ненахов, Э. М. Карташов // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Естественные науки. 2022. № 1. С. 88–106.

Поступила 05.02.2025

Принята в печать 06.03.2025

References

1. Kazyuchits N. M., Rusetsky M. S., Naumchik E. V., Kazyuchits V. N. (2016) Synthetic diamonds STM “Almazot” – Research Results and Some Applications. *Materials and Structures of Modern Electronics: Collection of Scientific Papers of the VII International Scientific Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Department of Physics of Semiconductors and Nanoelectronics, Minsk, Oct. 12–13*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University. 62–67 (in Russian)
2. Bocharov A. M., Klimovich A. F., Starovoytov A. S., Snezhkov V. V. (1996) *Wear of Diamond Single Crystals*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. (in Russian).
3. Kovalenko V. S., Romanenko V. V., Oleshchuk L. M. (1987) *Low-Waste Laser Beam Cutting Processes*. Kiev, Technics Publ. (in Russian).

4. Mityagin A. Yu., Altukhov A. A., Mityagina A. Yu. (2009) Technology and Equipment for Processing Diamond Materials of Modern Electronics. *Technology and Design in Electronic Equipment*. (1), 53–58 (in Russian).
5. Barreto M. C., Roedera G., Steinhoffa M., Schellenbergera M., Bauer A. (2018) Advances in Thermal Laser Separation: Process Monitoring in a Kerf-Free Laser-Based Cutting Technology to Ensure High Yield. *Procedia CIRP* 74. 645–648.
6. Shkadov A. I. (1997) *Physical Principles of Laser Processing of Diamonds*. Smolensk (in Russian).
7. Nazarov S. A., Polyakova O. R. (1994) Griffiths Criterion for a Tensile Crack with Nonlinear Effects in the End Zones. *Reports of the Academy of Sciences*. 335 (2), 182–184 (in Russian).
8. Mazakov T. Zh., Dzhomartova Sh. A., Ziyatbekova G. Z., Toykenov G. Ch., Arshidinova M. T., Mazakova A. T. (2020) Solution of the Heat Conduction Equation of a Cylindrical rod. *Bulletin of the Kazakh University of Technology and Business*. (1), 13–21 (in Russian).
9. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. (2022) Optimization of Laser Processing of Diamonds. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 53 (4), 30–36 (in Russian).
10. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Kupo A. N., Sokolov S. I. (2022) Study of the Influence of Impurities on the Processes of Formation of Synthetic Diamond in the Zone of Thermal Influence of Laser Radiation. *News of the Francisk Skorina Gomel State University. Natural Sciences*. 132 (3), 117–120 (in Russian).
11. Dyakonov V. P. (2012) *MATLAB. A Complete Tutorial*. Moscow, DMK Press Publ. (in Russian).
12. Nenakhov E. V., Kartashov E. M. (2022) Estimates of Temperature Stresses in Models of Dynamic Thermoelasticity. *Bauman Moscow State Technical University Bulletin. Natural Sciences*. (1), 88–106 (in Russian).

Received: 5 February 2025

Accepted: 6 March 2025

Сведения об авторе

Шершнеv Е. Б., д-р техн. наук, доц., зав. каф. общей физики, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,
Гомель, ул. Советская, 102, кор. 5
Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины
Тел.: +375 0232 50-38-17
E-mail: esherhnev@gsu.by
Шершнеv Евгений Борисович

Information about the author

Shershnev E. B., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of General Physics, Francisk Skorina Gomel State University

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovetskaya St., 102, Bld. 5
Francisk Skorina
Gomel State University
Tel.: +375 0232 50-38-17
E-mail: esherhnev@gsu.by
Shershnev Evgeny Borisovich