

УДК 539.12

ОБРАБОТКА СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ СТРУКТУР ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 532 НМ

Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, С.Ф. Ермаков, А.Е. Шершнев

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

PROCESSING OF SYNTHETIC DIAMOND STRUCTURES LASER RADIATION WITH A WAVE LENGTH OF 532 NM

E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov, S.F. Ermakov, A.E. Shershnev

F. Scorina Gomel State University

Выполнено численное моделирование процесса обработки кристаллов алмаза при воздействии лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Расчет формы лунки и температурных полей, формируемых в кристаллах алмаза в результате лазерного нагрева, осуществлен с использованием трёх вариантов моделирования: I – трехмерный анализ при воздействии лазерного излучения вдоль оси симметрии второго порядка (L_2), II – трехмерный анализ при воздействии лазерного излучения вдоль оси симметрии третьего порядка (L_3), III – трехмерный анализ при воздействии лазерного излучения вдоль оси симметрии четвертого порядка (L_4). Проведена экспериментальная проверка полученных результатов.

Ключевые слова: лазерная обработка, алмаз, графит, метод конечных элементов.

A numerical simulation of the processing of diamond crystals when exposed to laser radiation with a wavelength of 532 nm was performed. The calculation of the shape of the hole and temperature fields formed in diamond crystals as a result of laser heating was carried out using three modeling options: I – a three-dimensional analysis when exposed to laser radiation along a second-order symmetry axis (L_2), II – a three-dimensional analysis when exposed laser radiation along the axis of symmetry of the third order (L_3), III – three-dimensional analysis when exposed to laser radiation along the axis of symmetry of the fourth order (L_4). An experimental verification of the obtained results was carried out.

Keywords: laser treatment, diamond, finite element method.

Введение

Физические свойства кристаллов алмаза обеспечивают надёжную работу в критических условиях устройств, созданных на его основе, и делают перспективным применение данных кристаллов при создании новой техники [1].

В работах [2]–[5] проведено исследование особенностей лазерной обработки кристаллов алмазов при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1064 нм. В работе [6] проведено исследование особенностей локализации температурных полей и полей термоупругих напряжений, формируемых в кристаллах алмаза при воздействии лазерного излучения.

В данной работе представлены результаты трехмерного моделирования процесса формирования лунок в образцах при воздействии лазерного излучения с длиной волны 532 нм вдоль осей симметрии второго, третьего и четвертого порядка кристаллов алмаза и результаты экспериментальной проверки, полученных результатов с использованием сверхтвёрдого материала (СТМ) «Алмазот» ТУ РБ № 600 1245 13. 002 – 2002.

1 Моделирование

Лазерное воздействие на кристаллы алмаза приводит к значительному увеличению температуры, сопровождаемому фазовыми переходами. В соответствии с [3] в данной работе была

использована упрощенная схема превращений алмаза под воздействием лазерного излучения: алмаз \Rightarrow фазовый переход \Rightarrow графит \Rightarrow испарение. При этом полагалось, что стадия интенсивной графитизации кристаллов алмаза наступает по достижении обрабатываемым материалом температуры 2300 К.

Для анализа особенностей лазерной обработки кристаллов алмаза был использован метод конечных элементов [5].

Моделирование процесса фазового перехода алмаз – графит осуществлялось за счет циклической проверки условия достижения точками обрабатываемого материала температуры графитизации с последующим присвоением теплофизических свойств графита соответствующим областям конечно элементной модели. При этом учитывалась строгая ориентация гексагональных плоскостей графита параллельно плоскостям (111) кристаллов алмаза, независимо от ориентации падающего лазерного излучения.

При расчетах плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности алмаза и графита принимались равными соответственно: $\rho_a = 3520 \text{ кг/м}^3$, $\rho_g = 2300 \text{ кг/м}^3$; $C_a = 854 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $C_g = 994 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $\lambda_a = 427 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$, $\lambda_{g\perp} = 88 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$, $\lambda_{g\parallel} = 355 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$ [3]. Символом $\lambda_{g\perp}$ обозначен коэффициент теплопроводности графита в направлении, перпендикулярном гексагональным

граням, а символом λ_{\parallel} обозначен коэффициент теплопроводности графита в направлении, параллельном гексагональным граням.

Расчет формы лунок и температурных полей, формируемых в кристаллах алмаза в результате лазерного нагрева, был выполнен для трех различных вариантов: I – трехмерный анализ при воздействии лазерного излучения вдоль оси симметрии второго порядка (L_2), II – трехмерный анализ при воздействии лазерного излучения вдоль оси симметрии третьего порядка (L_3), III – трехмерный анализ при воздействии лазерного излучения вдоль оси симметрии четвертого порядка (L_4).

Расчеты были выполнены с использованием следующих значений технологических параметров обработки: плотность мощности лазерного излучения $P_0 = 0,5 \div 1,5 \cdot 10^{12}$ Вт/м², радиус поперечного сечения лазерного пучка $R = 0,05$ мм. Результаты моделирования представлены в таблице 2.1 и на рисунках 2.1–2.3.

Таблица 2.1 – Результаты моделирования лазерной обработки кристаллов алмазов при воздействии лазерного излучения с длиной волны 532 нм

Плотность мощности лазерного излучения $P_0, 10^{12}$ Вт/м ²	0,5	0,75	1	1,25	1,5
I вариант					
Диаметр лунки на поверхности, мкм	380	390	390	380	380
Диаметр лунки на глубине, мкм	350	360	310	350	360
II вариант					
Ширина сверху, мкм	390	380	400	380	380
Ширина снизу, мкм	350	340	320	340	360
III вариант					
Ширина сверху, мкм	390	390	380	380	380
Ширина снизу, мкм	350	360	310	340	360

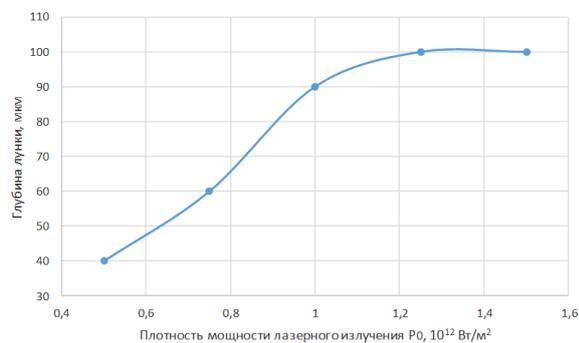


Рисунок 2.1 – Зависимость глубины лунки от плотности мощности лазерного излучения

Анализ результатов моделирования показал, что зависимость глубины лунки от плотности мощности лазерного излучения практически одинакова для всех трех вариантов обработки и носит нелинейный характер.

Представленные результаты объясняются более эффективным объемным поглощением кристаллом алмаза лазерного излучения с длиной волны 532 нм по сравнению с излучением с длиной волны 1064 нм. Такое лазерное воздействие приводит к снижению влияния анизотропии теплофизических свойств графита на геометрические параметры лунок, индуцированных лазерным излучением. Тем не менее расчётная форма лунки, образующейся при обработке вдоль оси L_4 , обладает асимметричностью относительно линии воздействия лазерного пучка.

2 Эксперимент

Проведение экспериментальных исследований лазерной обработки СТМ «Алмазот» проводилось с использованием лазера LS-2134Y (рисунок 2.4). Лазер LS-2134Y – лазер на АИГ:Nd³⁺ с электрооптической модуляцией добротности и преобразованием длины волны излучения 1064 нм в излучение с длиной волны 532 нм, работающий в частотном режиме. Основные характеристики лазера приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики лазера LS-2134Y

Наименование параметра, единица измерения	Номинальное значение
Длина волны генерируемого излучения, нм	1064, 532
Энергия импульса излучения, мДж	>250 >150
Частота повторения импульсов f, Гц	<15
Длительность импульса излучения по уровню 0,5, нс	<15
Диаметр пучка лазерного излучения, мм	<5
Энергетическая расходимость лазерного излучения по уровню 0,5, мрад	<3

Экспериментальные исследования проводились при различных режимах обработки: время обработки варьировалось от 10 до 120 с, частота повторения импульсов от 1 до 15 Гц, энергия импульса от 10 до 20 мДж.

Структуру поверхностей обработанных лазерным излучением образцов СТМ «Алмазот» исследовали на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (рисунок 2.5). Основные характеристики прибора приведены в таблице 2.3.

Анализ рисунков показывает, что с увеличением количества импульсов ширина зоны воздействия лазерного излучения практически не меняется, однако более явно проявляется форма лунки, при этом с увеличением энергии импульса ширина зоны воздействия лазерного излучения становится больше. С увеличением энергии импульсов наблюдается увеличение глубины лазерно-индуцированных лунок, при более высоких значениях энергии структура лунки характеризуется наличием сколов.

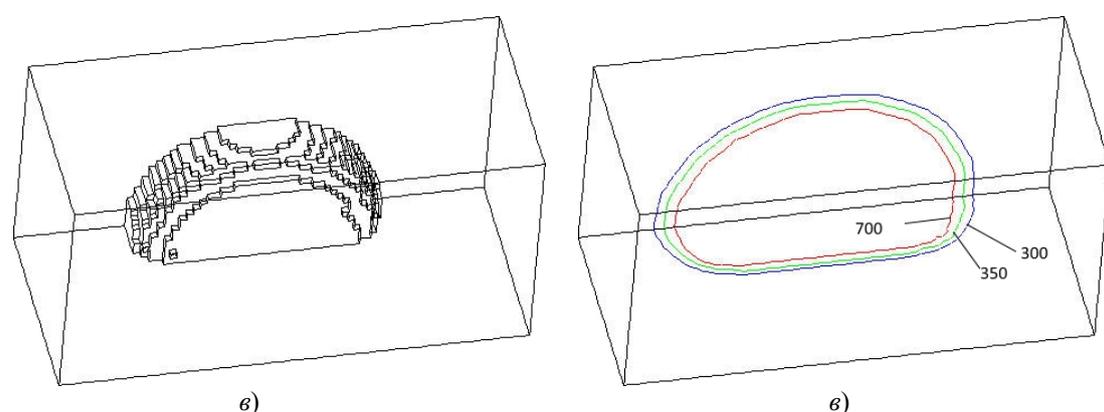
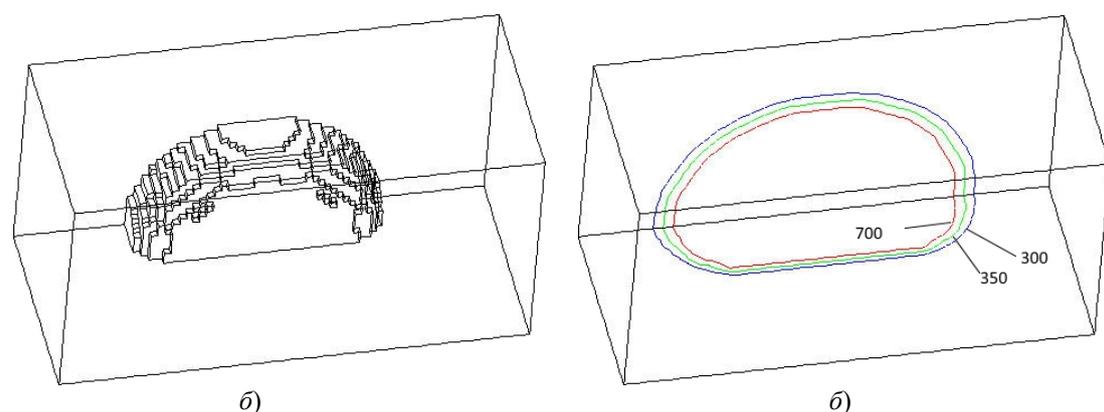
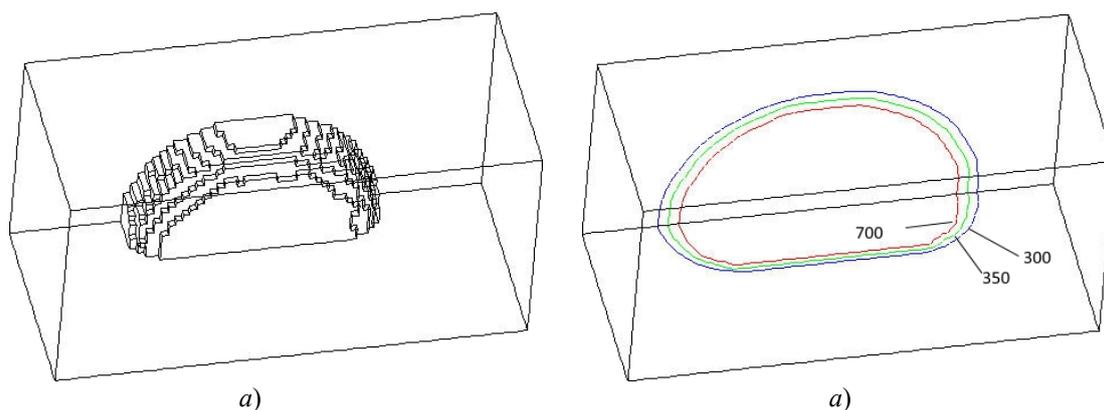


Рисунок 2.2 – Расчетные формы лунок в результате лазерной обработки кристаллов алмазов: а) I вариант; б) II вариант; в) III вариант

Рисунок 2.3 – Расчетные формы температурных полей в результате лазерной обработки кристаллов алмазов: а) I вариант; б) II вариант; в) III вариант



Рисунок 2.4 – Лазер LS-2134Y



Рисунок 2.5 – Сканирующий электронный микроскоп VEGA II LSH

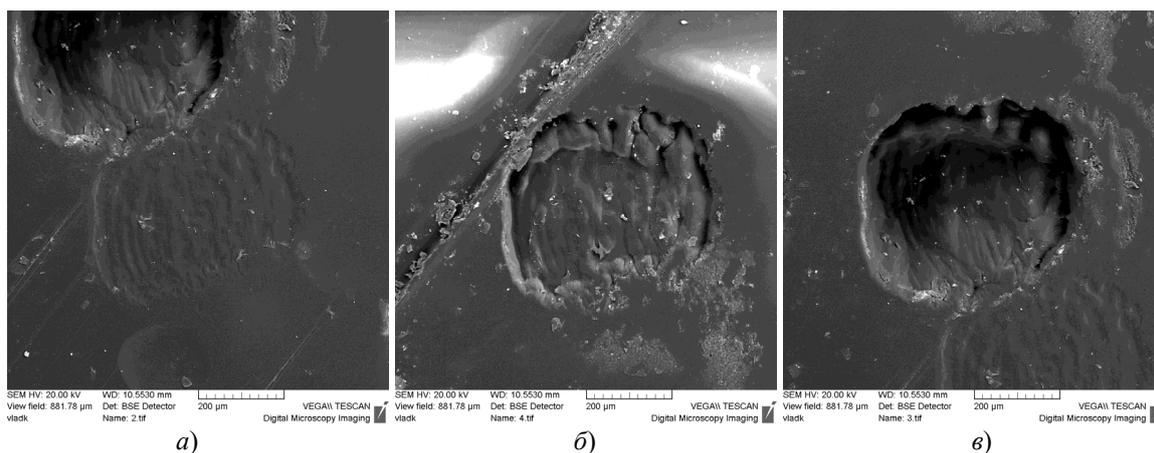


Рисунок 2.6 – Структура поверхности, образованной в СТМ «Алмазот» при воздействии лазерного излучения с длиной волны 532 нм с энергией в импульсе 15 мДж при различном количестве импульсов: а) 2 импульса; б) 3 импульса; в) 5 импульсов

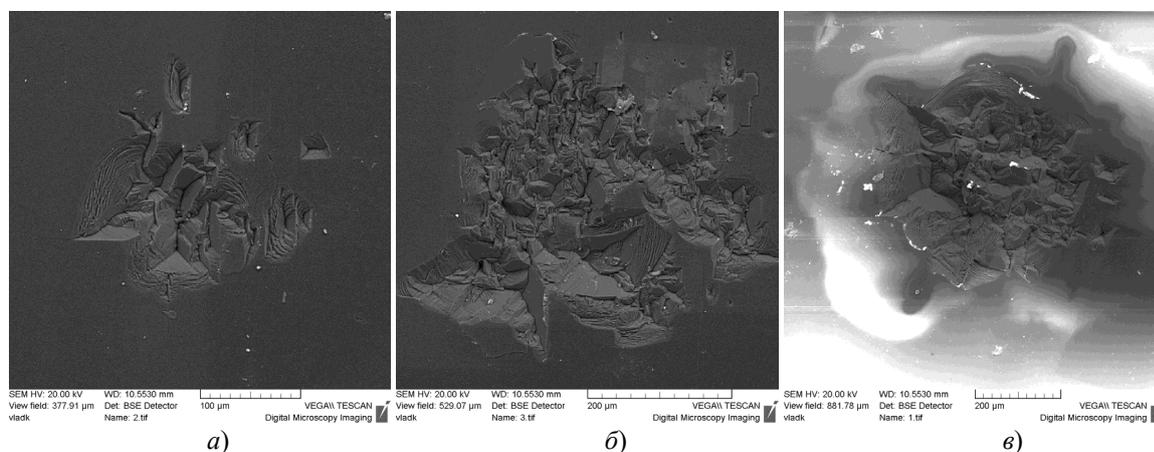


Рисунок 2.7 – Структура поверхности, образованной в СТМ «Алмазот» при воздействии 1 импульса лазерного излучения с длиной волны 532 нм при различной энергии импульса: а) 12,5 мДж; б) 17,5 мДж; в) 20 мДж

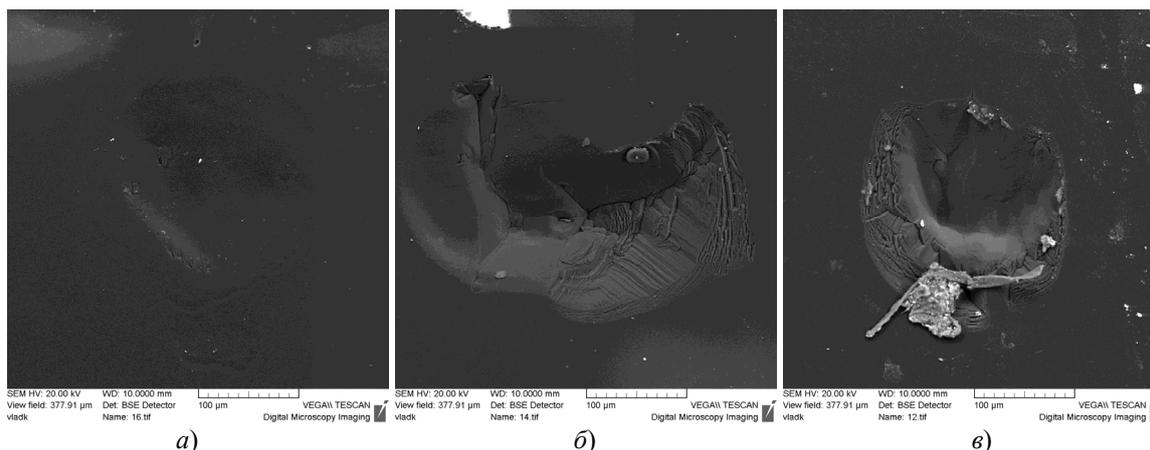


Рисунок 2.8 – Структура поверхности, образованной в СТМ «Алмазот» при воздействии импульса лазерного излучения с длиной волны 532 нм с частотой 1 Гц в течение 1 минуты при различной энергии импульса: а) 10 мДж; б) 15 мДж; в) 20 мДж

На рисунках 2.6–2.8 представлены результаты экспериментальных исследований.

Таблица 2.3 – Характеристика сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH

Наименование параметра, единица измерения	Номинальное значение
Источник электронов	Вольфрамовый катод с термоэлектронной эмиссией
Разрешение в режиме высокого вакуума (SE) в режиме переменного вакуума (BSE)	3,0 нм при 30 кВ 3,5 нм при 30 кВ;
Увеличение	от 4 до 1 000 000
Ускоряющее напряжение	от 200 В до 30 кВ (с шагом 10 В)
Ток пучка электронов	от 1 пА до 2 мкА

Заключение

Выполнено компьютерное моделирование процесса формирования лунок при обработке кристаллов алмазов под действием лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Проведены эксперименты по обработке кристаллов СТМ «Алмазот» лазерным излучением с длиной волны 532 нм. Выявлены особенности формирования лунок при различных параметрах лазерной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митягин, А.Ю. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной техники / А.Ю. Митягин, А.А. Алтухов, А.Б. Митягина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – №1. – С. 53–58.
2. Физические основы лазерной обработки алмазов: в 15 кн.: учеб. пособие для ВТУЗов / А.И. Шкадов; под ред. А.М. Бочарова. – Смоленск, 1997. – Кн. 3: Физические основы лазерной обработки алмазов. – 288 с.
3. Dependence of the diamond laser processing efficiency on crystallographic directions / S.V. Shalupaev, E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, V.V. Sviridova // SPIE. – 2001. – Vol. 4358. – P. 329–333.
4. Шершнев, Е.Б. Моделирование лазерной обработки кристаллов алмаза / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2011. – № 6 (69). – С. 164–168.
5. Особенности формирования термоупругих полей при лазерной обработке кристаллов алмаза / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнев, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 1 (22). – С. 38–40.
6. Особенности применения лазерного излучения с длинами волн 1064 нм, 532 нм и 266 нм для обработки кристаллов алмаза / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнев, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1 (30). – С. 22–24.
7. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 212 с.

Поступила в редакцию 12.11.18.