

Исследование обработки кристаллов алмаза лазерным излучением с длиной волны 266 нм

Е.Б. ШЕРШНЕВ, Ю.В. НИКИТЮК, С.И. СОКОЛОВ, А.Е. ШЕРШНЕВ

Выполнено численное моделирование процесса обработки кристаллов алмаза при воздействии лазерного излучения с длиной волны 266 нм. Расчет формы лунки и температурных полей, формируемых в кристаллах алмаза в результате лазерного нагрева, выполнен 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.

Numerical simulation of laser diamond crystals treatment with their graphitization when exposed to laser radiation was done. Calculation of temperature fields formed in diamond crystals as a result of laser heating was performed for four different options: I – the three-dimensional analysis of the action of laser radiation along the axis of symmetry (L_2), II – a three-dimensional analysis of the action of laser radiation along the axis of symmetry of the third order (L_3), III – a three-dimensional analysis of the action of laser radiation along the axis of symmetry of the fourth order (L_4), IV – three-dimensional analysis without graphitization when exposed to laser radiation. The obtained results can be used to optimize the laser treatment of diamond crystals.

Keywords: laser treatment, diamond, graphite, 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 термодинамических напряжений, формируемых в кристаллах алмаза при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1064 нм, 532 нм и 266 нм и показана эффективность использования лазерного излучения с длиной волны 266 нм.

В данной работе представлены результаты трехмерного моделирования процесса формирования лунок при воздействии лазерного излучения с длиной волны 266 нм вдоль осей симметрии второго, третьего и четвертого порядка кристаллов алмаза и результаты экспериментальной проверки, полученных результатов.

1. Физическая модель и постановка задачи для численного решения.

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 соответ-

ствующим 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 $\lambda_{g\parallel}$ 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 четырех 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 $P_0 = 1 \cdot 10^{12} \text{ Вт/м}^2$, радиус поперечного сечения лазерного пучка $R = 0,05 \text{ мм}$.

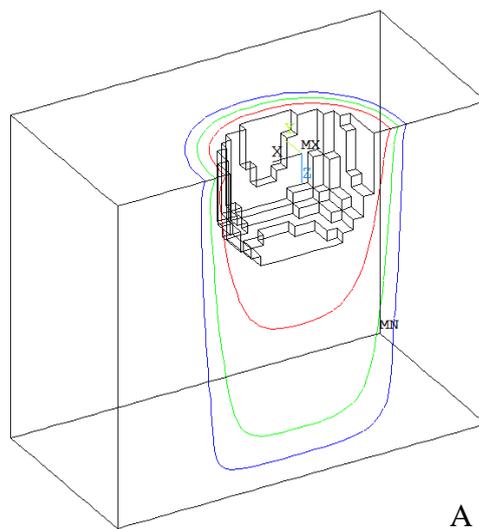
2. Результаты моделирования и эксперимента.

Как уже отмечалось, моделирование было выполнено в трёх различных вариантах: I – лазерный пучок направлен вдоль оси L_2 , II – лазерный пучок направлен вдоль оси L_3 , III – лазерный пучок направлен вдоль оси L_4 .

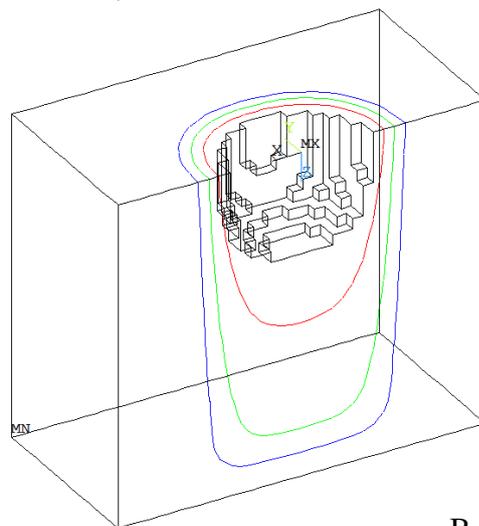
На рисунке 1 представлены распределения температурных полей, формируемых в кристаллах алмаза при лазерной обработке и расчётные формы лунок. Анализируя данные, приведенные на рисунках, видим, что локализация температурных полей в зоне лазерного воздействия для всех вариантов обработки почти не отличается, что в свою очередь приводит к практически одинаковым размерам лунок, формируемых лазерным излучением.

Выявленные особенности формирования температурных полей и форм лунок, индуцированных лазерным излучением, объясняются эффективным объемным поглощением кристаллом алмаза лазерного излучения с длиной волны 266 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. При этом следует отметить, что расчётная форма лунки, образующейся при обработке вдоль оси L_4 , обладает чётко выраженной асимметричностью относительно линии воздействия лазерного пучка.

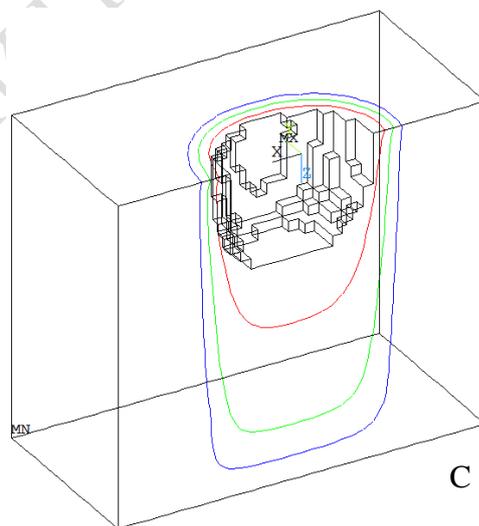
Обработка кристаллов СТМ «Алмазот» производилась с помощью лазера Lotis LS-2137, работающего на длине волны 266 нм. Фокусирующая линза имела фокусное расстояние равное 5 мм. На рисунке 2 представлена лунка, образованная в СТМ «Алмазот» при воздействии лазерного излучения с длиной волны 266 нм.



A



B



C

А – I вариант обработки, В – II вариант обработки, С – III вариант обработки

Рисунок 1 – Расчётные формы лазерно-индуцированных лунок и распределение температур кристалле алмаза, К

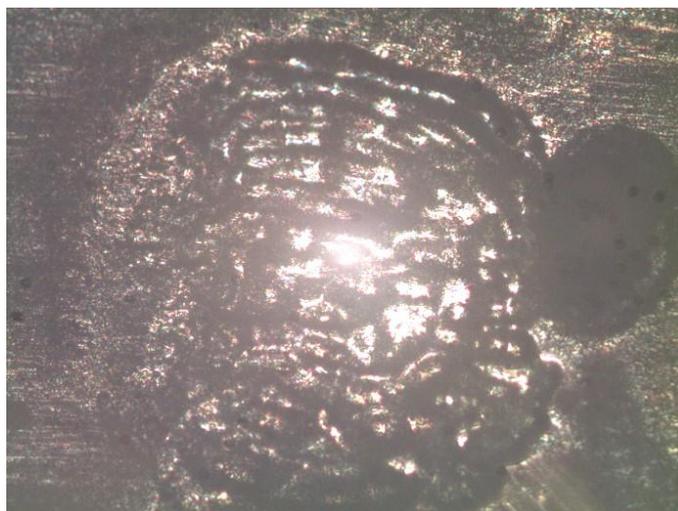


Рисунок 2 – Вид лунки, образованной в СТМ «Алмазот» при воздействии лазерного излучения с длиной волны 266 нм

Заключение. Выполнено компьютерное моделирование процесса формирования лунок при обработке кристаллов алмазов под действием лазерного излучения с длиной волны 266 нм и проведена их экспериментальная проверка. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации процесса лазерной обработки кристаллов алмаза.

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. Shalupaev, S.V. 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 им. Ф. Скорины. – 2011. – № 6 (69). – С. 164–168.
5. Шершнев, Е.Б. 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. Шершнев, Е.Б. 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.