

# Исследование технологии размерной лазерной обработки труднообрабатываемых материалов

Н. И. Анякин<sup>а</sup>, М. Наеби<sup>а</sup>, В. С. Коваленко<sup>а</sup>, В. В. Креницкий<sup>б</sup>,  
Р. О. Жук<sup>а</sup>, А. Н. Степура<sup>а</sup>, П. В. Кондрашев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
НИИ лазерной техники и технологии,  
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина, e-mail: [anyaikin@ukr.net](mailto:anyaikin@ukr.net); [v.kovalenko@kpi.ua](mailto:v.kovalenko@kpi.ua)

<sup>б</sup>Технический центр НАН Украины,  
ул. Покровская, 13, Киев-70, 04070, Украина, e-mail: [krem@nasu.kiev.ua](mailto:krem@nasu.kiev.ua)

Исследуется технологический процесс фрезерования различных материалов сфокусированным лазерным излучением с модулированной добротностью. Показано, что результат лазерного воздействия (глубина снимаемого припуска, шероховатость поверхности, ее химический состав) зависит от режимов обработки, теплофизических свойств обрабатываемого материала, причем качество обработки – от механизма разрушения и количества жидкой фазы, которая образовалась при лазерном нагреве.

*Ключевые слова:* лазерная технология, лазерная размерная обработка, лазерное фрезерование, труднообрабатываемые материалы.

УДК 621.9.048

## ВВЕДЕНИЕ

Применение (в качестве инструмента) сфокусированного лазерного излучения для реализации технологии фрезерования позволило создать универсальный процесс, благодаря которому возможно вести обработку практически любых материалов [1–5] (керамика, синтетические и естественные алмазы, твердые сплавы, стали и пр.). При лазерном фрезеровании (ЛФ), как при обычном сверхскоростном резании и электроискровой обработке, осуществляются:

- технология снятия припуска слой за слоем;
- постоянное заглубление в тело заготовки инструмента (в нашем случае – сфокусированного потока лазерного излучения, ограниченного условной каустической поверхностью, являющейся в пространстве гиперболоидом вращения, имеющем «малый» рабочий участок);
- соблюдение условия отсутствия пересечения телом инструмента (не рабочим участком) поверхности обрабатываемой заготовки;
- зависимость величины снимаемого припуска от свойств заготовки.

Для реализации технологии ЛФ обычно используются лазеры на алюмоиттриевом гранате (АИГ) с модулированной добротностью (длина волны излучения – 1,06 мкм, средняя мощность излучения  $P_m$  – до 100 Вт, частота следования импульсов  $n$  – до 50 кГц) [1–5]. Для реализации технологии ЛФ имеет определенную особенность. Так, одиночный импульс (длительность  $t_p$ –100–500 нс, мощность  $P_p$  – до 5 кВт) образует (путем испарения) в обрабатываемом материале лунку диаметром 10–200 мкм и глубиной от 1 до 100 мкм. При этом, как отмечено [3, 4], в процессе нагрева (в зоне действия лазерного излучения)

обрабатываемый материал претерпевает структурные и фазовые превращения. Часть образовавшейся жидкой фазы под действием паров плазмы, ударных волн выбрасывается из образовавшейся лунки и оседает на прилегающем участке, искажая не только обрабатываемую поверхность, но и обработанный участок, который вновь необходимо обрабатывать. Особенности ЛФ различных материалов посвящена данная работа.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на экспериментальном лазерном оборудовании в составе лазеров на АИГ с модулированной добротностью (средняя мощность излучения  $P_m$  в одномодовом режиме генерации – от 3 до 50 Вт), снабженных сервисными приспособлениями [5]. Перемещение сфокусированного излучения по поверхности образцов осуществляли 2-координатной системой сканирования RAZORSCAN-15 со сменными объективами. В качестве образцов использовали заготовки из сплава ВК8, стали 65Г, кубического нитрида бора, конструкционной керамики на основе карбида кремния. В процессе исследований изменялись скорость сканирования  $V_s$ , шаг между дорожками  $StepOX$  и частота следования импульсов (рис. 1). Естественно, при изменении  $V_s$  и  $n$  изменялись как расстояния  $StepOX$  между отдельными пятнами радиуса  $r_p$ , так и коэффициент их перекрытия. В каждой экспериментальной точке опыты дублировали 3 раза. Измерения результатов взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с мате-

риалами (глубина обработки  $H$  и высота микронеровностей  $Rz$  (рис. 1)) проводили с помощью инструментального микроскопа БМИ-1Ц и двойного микроскопа Линника МИС-11. Химический состав поверхности образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-6490 производства фирмы «JEOL Ltd.» (Япония), оснащенный энергодисперсионным спектрометром и волновыми спектрометрами. При этом измерения осуществлялись на каждом образце в 6 случайных точках, причем 3 из них выбирались на необработанном участке поверхности, а 3 – на участке, обработанном сфокусированным лазерным излучением. Параметры лазерного излучения определялись с помощью измерителей мощности ИМО-2, а временные параметры импульсов – фотодиодами ФД-7, включенными в фотодиодном режиме, сигналы которых регистрировались осциллографами С1-74, С1-55, С1-122А или поступали на вход аналогово-цифровых преобразователей.

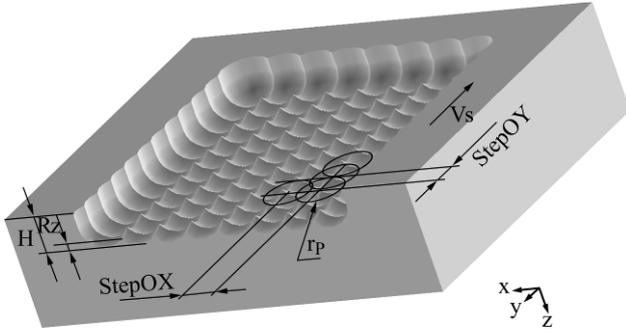


Рис. 1. Схема обработки образца.

Предварительные исследования технологии проводили с помощью вычислительных экспериментов. В качестве модели процесса использовали многомерное нелинейное нестационарное уравнение теплопроводности с нелинейной схемой учета фазовых переходов (1)–(5), заменяемое конечно-разностным аналогом и решаемое методом прогонки [6]. Результаты решения (картины температур, размеры зон плавления, испарения в разные моменты времени, тепловые истории) для разных условий обработки, разных обрабатываемых материалов выводились на экран ЭВМ:

$$c(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{HEAT}(x, y, z, t, T), \quad (1)$$

$$c_v(T) = c_v(T) + \delta Q_f(T - T_f), \quad (2)$$

$$T_{Start} = 25^{\circ}C, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (4)$$

$$Q_{HEAT}(x, y, z, t, T) = (1 - R(T)) W_p(x, y, t) \exp(-\alpha(T)z), \quad (5)$$

где  $c(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $\lambda(T)$  – зависимости теплоемкости, плотности и теплопроводности обрабатываемого материала от температуры  $T$ ;  $Q_{HEAT}(x, y, z, t, T)$  – источник нагрева;  $x, y, z, t$  – пространственные и временные координаты;  $c_v(T)$  – объемная теплоемкость,  $c_v(T) = c(T)\rho(T)$ ;  $\delta - \delta$  – функция Дирака;  $Q_f$  – скрытая теплота фазового превращения;  $T_{Start}$  – начальная температура обрабатываемой детали;  $HX, HY, HZ$  – габариты обрабатываемой детали;  $R(T)$ ,  $\alpha(T)$  – зависимости коэффициентов отражения и поглощения лазерного излучения от температуры  $T$ .

При описании зависимости плотности мощности сфокусированного лазерного излучения  $W_p(x, y, t)$  от пространственных координат  $x, y$  использовали теоретическое распределение интенсивности потока (мода  $TEM_{00}$ ), который описывается как

$$W_p(x, y, t) = \frac{2P(t)}{\pi \cdot r_p^2} \exp\left(-\frac{2 \cdot \left( (x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 \right)}{r_p^2}\right), \quad (6)$$

где  $P(t)$  – зависимость мощности излучения от времени;  $r_p$  – радиус пятна фокусировки на уровне  $\exp^2$ ;  $x_c, y_c$  – текущие координаты оси сфокусированного лазерного луча.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим процесс взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с модулированной добротностью с исследуемыми материалами. При этом отметим, что при увеличении частоты следования импульсов  $n$ , несмотря на увеличение средней мощности излучения  $P_m$ , одновременно растет и длительность лазерных импульсов  $\tau_p$ , что ведет к снижению их пиковой мощности  $P_p$  (рис. 2).

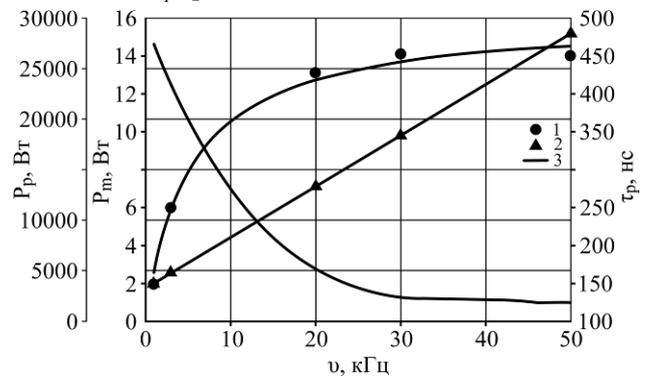


Рис. 2. Зависимости энергетических параметров лазерного излучения от частоты модуляции: 1 – измеренная зависимость средней мощности излучения от частоты модуляции; 2 – измеренная зависимость длительности импульса от частоты модуляции; 3 – рассчитанная пиковая мощность импульса.

Несомненно, при сохранении остальных условий обработки ( $V_s, r_p, StepOX$ ) данное явление

ние сказывается на размерах испаренного слоя, жидкой ванны и пр. В качестве примера рассмотрим результат воздействия лазерного излучения на обрабатываемый материал (рис. 3–5) для случаев, когда частота модуляции равняется 3 и 50 кГц. При этом мощность отдельного импульса достигает  $2,45 \cdot 10^4$  и  $1,17 \cdot 10^3$  Вт, а его длительность – 150 и 480 нс соответственно (рис. 2). Так, на рис. 3 приведены рассчитанные зависимости плотности мощности лазерного излучения  $W_p(t)$  и температуры  $T(z, t)$  от времени  $t$ , которые возникают в образце из твердого сплава ВК8 при обработке сфокусированным лазерным излучением с модулированной добротностью, сфокусированным в пятно с  $r_p = 0,025$  мм и перемещающимся со скоростью  $V_s = 50$  мм/с с различной частотой модуляции, а на рис. 4 – распределения температур в образце (для данных условий обработки) в момент действия лазерного импульса.

Как и ожидалось, снижение  $P_p$  ведет к уменьшению размеров зоны испарения. Кроме того, для обоих случаев обработки процесс испарения поверхности происходит и после завершения действия отдельного импульса. Также при обработке с высокой частотой следования импульсов ( $n = 50$  кГц), несмотря на высокую теплопроводность обрабатываемого материала, температура обрабатываемого участка поверхности постоянно увеличивается, что связано с малым временем между импульсами ( $2 \cdot 10^{-5}$  с). Естественно, импульсы с большей  $P_p$  (при низкой частоте следования) испаряют больший объем обрабатываемого материала (рис. 4а), обеспечивая большую производительность выполняемой операции. Несмотря на малую длительность импульса и высокую плотность мощности сфокусированного лазерного излучения в пятне фокусирования, в процессе обработки образуется значительное количество жидкой фазы (рис. 4, 5), которая вытесняется из одиночной лунки парами эрозионной плазмы. В последующем, осаждающаяся на обрабатываемой поверхности, застывшая расплав будет искажать профиль группового скрайба, что ведет к ухудшению качества обработки (рис. 5).

Отметим, что в процессе лазерного нагрева сплава ВК8 происходит ряд превращений. Так, при температуре  $1494^\circ\text{C}$  имеет место плавление связки (Co), в дальнейшем (при  $2720^\circ\text{C}$ ) происходят плавление и диссоциация WC. Затем, с ростом количества поступающей энергии и соответственно температуры, наблюдаются плавление W и испарение Co и наконец – испарение самого вольфрама. С учетом высоких температур фазовых превращений и высоких энтальпий фазовых переходов [7, 8] процесс лазерной обра-

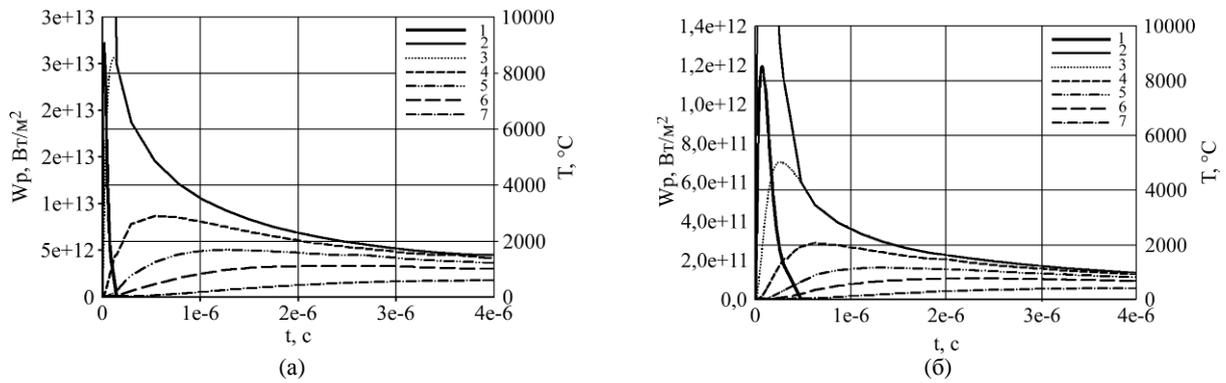
ботки данного материала требует значительных затрат энергии.

Как отмечалось выше, хаотично застывшая жидкая фаза на обработанном участке (образованная при обработке тугоплавких материалов, металлов) искажает ее профиль (рис. 5). При этом величина микронеровностей, образованных застывшим расплавом, может быть соизмерима с размерами испаренного слоя (рис. 5а). В случае, когда увеличивается  $n$ , то есть снижается  $P_p$ , и соответственно уменьшаются объем испаренного слоя и количество жидкой фазы (рис. 3б, 4б), качество обработки увеличивается (снижается шероховатость поверхности). Однако величина снимаемого припуска (глубина испаренного слоя) значительно меньше, чем в случае обработки с меньшей частотой.

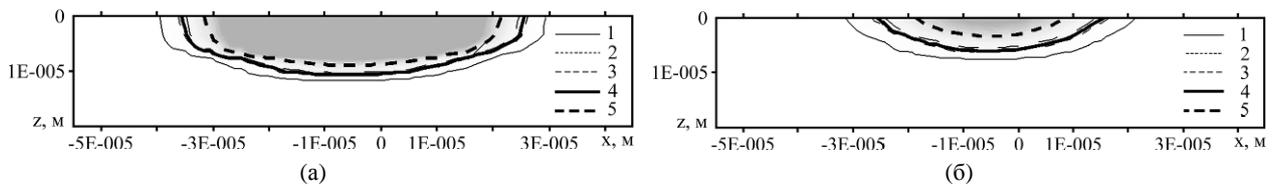
В отличие от твердого сплава ВК8, претерпевающего при лазерной обработке наносекундными импульсами фазовые переходы плавление-испарение, нагрев сверхтвердого инструментального материала на основе кубического нитрида бора (боразона) при атмосферном давлении и окружающей атмосфере имеет ряд особенностей. Так, согласно [8, 9], медленное окисление боразона начинается при температуре свыше  $2000^\circ\text{C}$ , а его переход в гексагональный нитрид бора происходит при  $2500^\circ\text{C}$  и возможен при давлении свыше 4053 МПа. В обычных условиях при нагреве (температура  $2700\text{--}3000^\circ\text{C}$ ) боразон разлагается в гексагональный нитрид бора (порошок), который, в свою очередь, при дальнейшем нагреве разлагается на бор и азот, что значительно облегчает его лазерную обработку. Так, на рис. 6–7 приведены результаты вычислительных экспериментов, посвященные исследованию процесса нагрева боразона сфокусированным лазерным излучением с различными параметрами.

Как и в предыдущем случае (рис. 3, 4), процесс разрушения обрабатываемого материала продолжается и после завершения действия лазерного излучения (рис. 5, 6). Причем благодаря более низкой, чем у ВК8, плотности и теплоемкости (при приблизительно равной теплопроводности) и несмотря на более высокую удельную теплоту диссоциации, процесс обработки эффективнее.

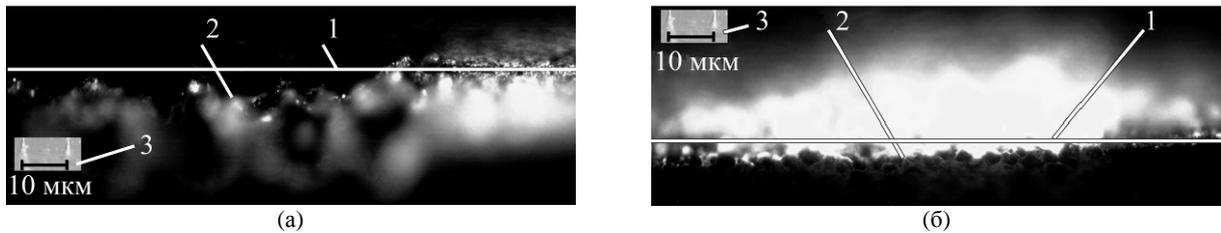
Отсутствие жидкой фазы, которая образуется в процессе разрушения инструментального материала на основе кубического нитрида бора, сказывается на профиле обработанной поверхности (рис. 8). Так, при одинаковых режимах обработки образованная в процессе фрезерования поверхность заготовки из кубического нитрида бора, в отличие от обработанной поверхности сплава ВК8 (рис. 5), имеет «регулярный» вид и



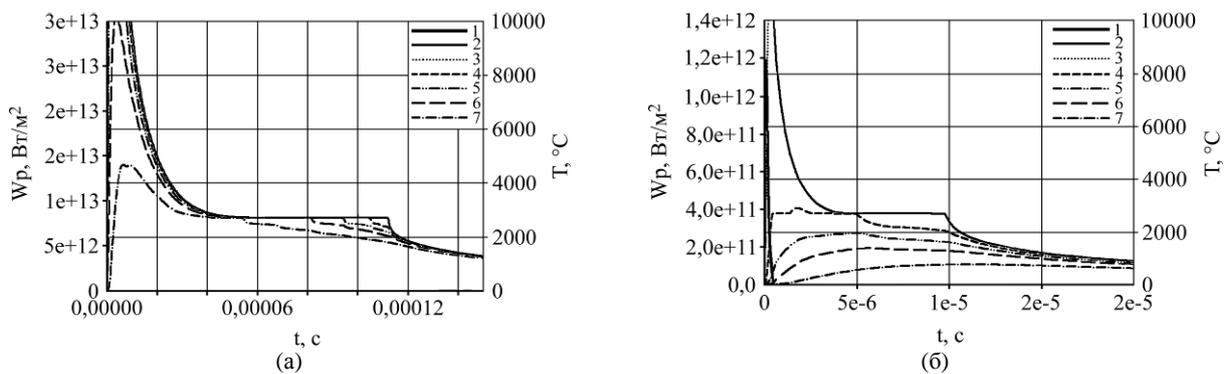
**Рис. 3.** Зависимости плотности мощности лазерного излучения и температуры образца из BK8 от времени для различных условий обработки ( $r_p = 0,025$  мм,  $V_s = 50$  мм/с): (а) –  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс; (б) –  $P_p = 1,17 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 480$  нс; 1 – зависимость  $W_p(t)$ ; 2 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 0$  мм; 3 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 4$  мкм, 8 мкм; 4 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 16$  мкм; 5 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 24$  мкм; 6 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 36$  мкм; 7 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 44$  мкм.



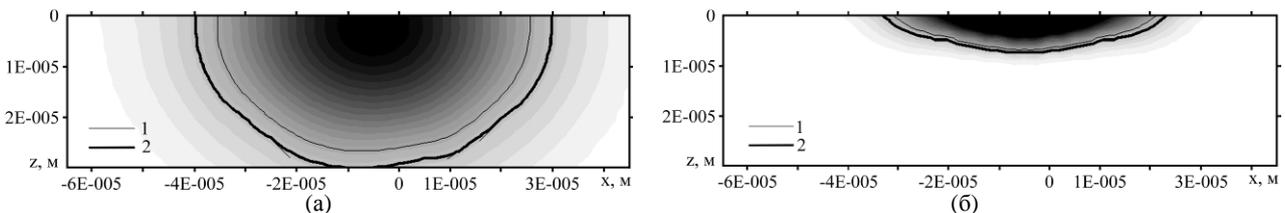
**Рис. 4.** Распределение температур в образце из BK8 при обработке лазерными импульсами ( $r_p = 0,025$  мм,  $V_s = 50$  мм/с): (а) –  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс, частота следования  $n = 3$  кГц; (б) –  $P_p = 1,17 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 480$  нс,  $n = 50$  кГц; 1 – изотерма плавления Co; 2 – изотерма диссоциации WC; 3 – изотерма плавления W; 4 – изотерма испарения Co; 5 – изотерма испарения W.



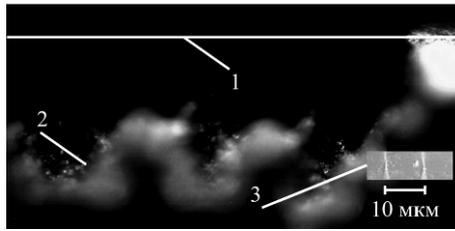
**Рис. 5.** Профиль обработанной поверхности сплава BK8 для различных режимов обработки ( $r_p = 0,025$  мм,  $V_s = 50$  мм/с,  $StepOX = 0,02$  мм): (а) –  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс, частота следования  $n = 3$  кГц; (б) –  $P_p = 1,17 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 480$  нс,  $n = 50$  кГц; 1 – необработанный участок; 2 – обработанный участок; 3 – шкала.



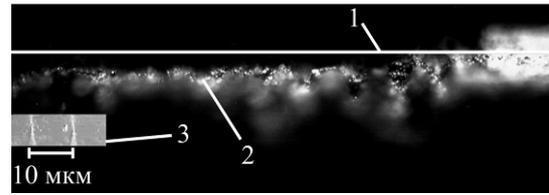
**Рис. 6.** Зависимости плотности мощности лазерного излучения и температуры образца из эльбора от времени для различных условий обработки ( $r_p = 0,025$  мм,  $V_s = 50$  мм/с): (а) –  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс; (б) –  $P_p = 1,17 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 480$  нс; 1 – зависимость  $W_p(t)$ ; 2 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 0$  мм; 3 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 4$  мкм, 8 мкм; 4 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 16$  мкм; 5 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 24$  мкм; 6 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 36$  мкм; 7 –  $T(z, t)$ , когда  $z = 44$  мкм.



**Рис. 7.** Распределение температур в образце из эльбора при обработке лазерными импульсами ( $r_p = 0,025$  мм,  $V_s = 50$  мм/с): (а) –  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс, частота следования  $n = 3$  кГц; (б) –  $P_p = 1,17 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 480$  нс,  $n = 50$  кГц; 1 – изотерма диссоциации NB; 2 – изотерма плавления В.

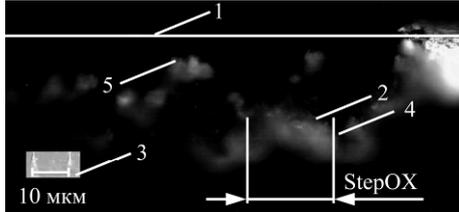


(a)

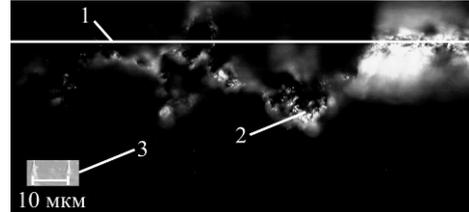


(б)

**Рис. 8.** Профиль обработанной поверхности кубического нитрида бора для различных режимов обработки ( $r_p = 0,025$  мм,  $V = 50$  мм/с,  $StepOX = 0,02$  мм): (а) –  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс, частота следования  $n = 3$  кГц; (б) –  $P_p = 1,17 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 480$  нс,  $n = 50$  кГц; 1 – необработанный участок; 2 – обработанный участок; 3 – шкала.

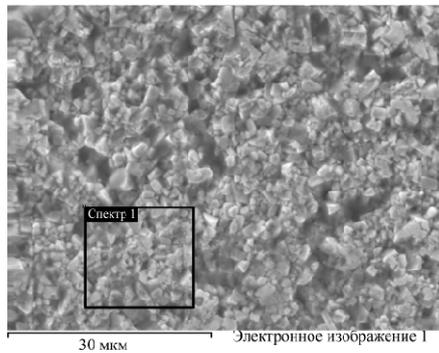


(a)

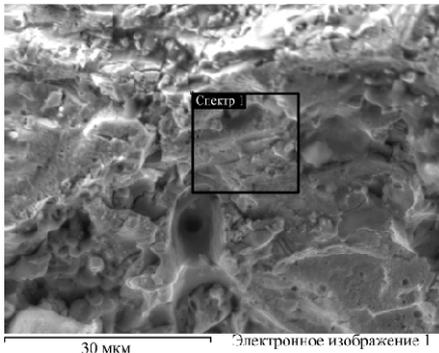
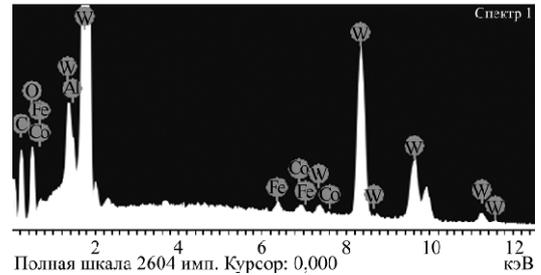


(б)

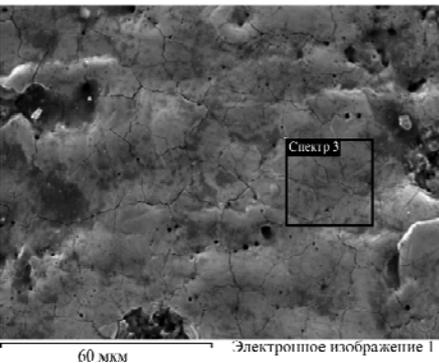
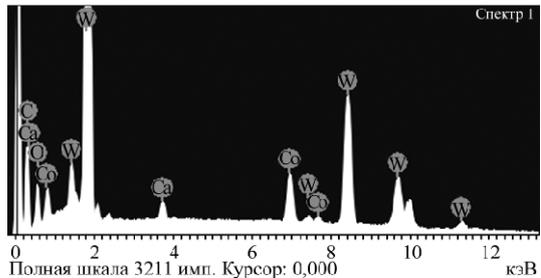
**Рис. 9.** Профили обработанной поверхности конструкционной керамики (а) и стали 65Г (б) в случае  $r_p = 0,025$  мм,  $V_s = 50$  мм/с,  $StepOX = 0,02$  мм;  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс, частота следования  $n = 3$  кГц; 1 – необработанный участок; 2 – обработанный участок; 3 – шкала; 4 – «дно» дорожки; 5 – «вершина» между дорожками.



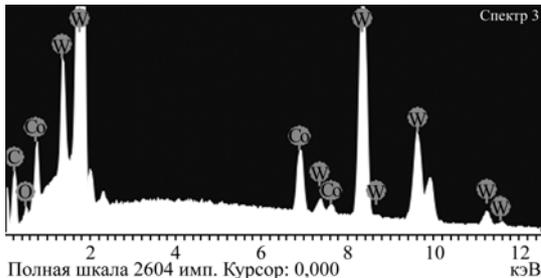
(a)



(б)



(в)



**Рис. 10.** Участки поверхности образца из ВК8 и спектрограммы ее химического состава: (а) – необработанный участок; (б), (в) – обработанные участки на  $r_p = 0,025$  мм,  $V_s = 50$  мм/с,  $StepOX = 0,02$  мм ((б) –  $P_p = 2,45 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 150$  нс,  $n = 3$  кГц; (в) –  $P_p = 1,17 \cdot 10^4$  Вт,  $t_p = 480$  нс,  $n = 50$  кГц).

**Таблица 1.** Результаты микроанализа поверхности образца твердого сплава ВК8

№ п/п	Поверхность до обработки		Поверхность после обработки с $n = 3$ кГц		Поверхность после обработки с $n = 50$ кГц	
	Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %
1	C	10,265	C	16,47	C	7,59
2	O	3,288333	O	3,236	O	0,328889
3	Al	0,123333	Al			
4	Fe	0,158333				
5			Ca	0,39		
6	Co	0,805	Co	6,358	Co	6,986667
7	W	90,92	W	64,044	W	101,0789
		105,56		90,498		115,9844

**Таблица 2.** Результаты микроанализа поверхности образца конструкционной керамики на SiC

№ п/п	Поверхность до обработки (позиция 1, рис. 3)		Поверхность после обработки («впадина»)		Поверхность после обработки («вершина»)	
	Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %
1	Fe	0,11	Fe	0,054333	Fe	0,01
2	Si	75,395	Si	74,97	Si	21,64
3	C	53,445	C	39,94	C	52,04
4	O	3,19	O	4,91	O	2,99
5	Ca	0,38	Ca	0,166667	Ca	0,02
		132,52		120,041		76,7

повторяет траекторию движения сфокусированного лазерного пучка (рис. 8). Причем при уменьшении шага между дорожками *StepOX* (в отличие от сплава ВК8) величина микронеровностей уменьшается. Сравнивая результаты расчетов (рис. 3, 4, 6, 7) и их экспериментальную проверку (рис. 5, 8), отметим, что производительность ЛФ синтетических сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора в 3 раза превышает производительность ЛФ тугоплавких сверхтвердых материалов на основе карбида вольфрама.

Указанные различия в профиле и величине микронеровностей обработанной поверхности сохраняются и при обработке других материалов, имеющих различные механизмы разрушения. Так, например, регулярный характер микронеровностей на обработанной поверхности, которые повторяют траекторию движения сфокусированного лазерного излучения, наблюдается при обработке материалов, разрушение которых происходит без образования жидкой фазы или когда ее количество минимально (естественные и синтетические алмазы [2, 5], конструкционная керамика на основе карбида кремния (рис. 9а)). А при обработке металлов, конструкционных (рис. 9б), инструментальных и нержавеющей сталей, претерпевающих при лазерном нагреве обычный термический цикл (нагрев – плавление – испарение – осаждение паров – охлаждение), как и при обработке тугоплавких материалов, также наблюдается неконтролируемая шероховатость поверхности, величина которой мо-

жет превышать глубину снятия припуска отдельной дорожкой.

Отметим, что при ЛФ сплава ВК8, кроме зависимости глубины снятия припуска и величины микронеровностей от режимов обработки, наблюдается изменение химического состава обработанной поверхности. Так, если до обработки пластина из ВК8 содержит на поверхности около 10% С, 0,8% Со и 91% W, (рис. 10а), то при обработке на рассматриваемых режимах химический состав поверхности изменяется (табл. 1). Так, при обработке на низкой частоте следования импульсов (когда образуется большое количество жидкой фазы (рис. 3а, 4а)) обработанная поверхность содержит большее количество С. Повышение содержания С свидетельствует о возможном увеличении количества карбидов, которые образуются при взаимодействии расплава с атмосферой, а увеличение Со (в обоих случаях), по-видимому, связано с его осаждением на обработанный участок охлажденных паров металла.

При анализе химического состава обработанной поверхности кубического нитрида бора изменений в сравнении с базовой обнаружено не было.

Что касается конструкционной керамики на основе карбида кремния, то во всех случаях обнаружена разница в процентном содержании элементов на «дне» (рис. 9а) и «вершинах» образовавшихся в процессе обработки дорожек (табл. 2).

Следует отметить, что при измерении концентраций химических элементов методом рентге-

новского микроанализа сумма концентраций отличается от 100%. Это связано с тем, что поверхность исследуемых образцов (до и после лазерной обработки) не полировалась, как это требуется при проведении микроанализа.

Появление Са в обработанном образце скорее всего связано с тем, что распределение Са по поверхности как исходного, так и обработанного образца неравномерное, а области измерения концентраций для исходного и обработанного образцов разные.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, анализируя результаты исследований, отметим, что:

- производительность процесса лазерного фрезерования сфокусированным лазерным излучением с модулированной добротностью синтетических сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора в 3 раза превышает производительность обработки тугоплавких сверхтвердых материалов на основе карбида вольфрама. Это связано не только с разницей их теплофизических свойств, но, прежде всего, и с разницей в механизмах их разрушения;

- наихудшее качество обработанной поверхности наблюдается при обработке тугоплавких материалов, которые претерпевают в процессе лазерного нагрева фазовые переходы твердое тело–жидкость–пар с последующим осаждением (неконтролируемым) продуктов разрушения на обработанный участок поверхности;

- минимизация длительности импульса с одновременным увеличением его мощности ведет к увеличению глубины обработки, что для используемого оборудования (лазеров на АИГ с модулированной добротностью) возможно при уменьшении частоты следования импульсов. Использование данного явления при лазерном фрезеровании тугоплавких материалов позволит повысить производительность процесса, однако для сохранения высокого качества шероховатости обработанной сфокусированным лазерным излучением поверхности необходимо провести дополнительные исследования технологии их обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kuhl M. From Macro to Micro – The Development of Laser Ablation. *Proceedings of 21 International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics "ICALEO'2002"*, Scottsdale, Arizona, USA, Oct. 2002.
2. Cao F., Huang J. Technique of Precise Laser Machining for the Diamond Wire Drawing Dies. *Proceedings International Symposium for Electromachining "ISEM-XI"*, April, 1995, Lausanne, Switzerland. 1995. P. 629–637.
3. Vasco J.C., Bártolo P.J. Processing Conditions of Laser Micro-Milling. *Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining*, April 23–27, 2007, Pittsburgh, Pennsylvania. 2007. P. 427–432.
4. Leong K. Drilling with Laser. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing*. 2000, **15**(9), 39–45.
5. Анякин Н.И., Наеби М., Коваленко В.С. Обработка фасонных отверстий с помощью сфокусированного лазерного излучения. *ЭОМ*. 2012, **48**(1), 28–33.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. *Аддитивные схемы для задач математической физики*. М.: Наука, 2001. 320 с.
7. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. *Тугоплавкие соединения*. Справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
8. Shackelford J., Alexander W. *Materials Science and Engineering Handbook. Third Edition*. New York: CRC Press, 2001. 1969 p.
9. Beiss P., Ruthardt R., Warlimont H. *Powder Metallurgy Data. Refractory, Hard and Intermetallic Materials*. Berlin-Heidelberg: Springer, 2002. p. 38.

Поступила 06.12.12

После доработки 28.02.13

### Summary

Technological process of laser milling using Q-switched mode is investigated. The results of laser influence (surface roughness, its chemical composition and thickness of the removed layer) are demonstrated to significantly depend on the processing regimes as well as on thermal and physical properties of the work piece. The quality of laser milling also depends on the amount of the liquid phase that occurs at laser heating and on the mechanisms of the material removal.

*Keywords: laser technology, laser dimensional processing, laser milling, intractable materials.*