

РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНАЦИЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СВОБОДНОЙ ГЕНЕРАЦИИ И МОДУЛИРОВАННОЙ ДОБРОТНОСТИ

Е. О. Баженов, К. В. Ражева, Е. Е. Русин

Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р. Е. Алексеева

Аннотация

Рассмотрена возможность применения гибридного лазерного воздействия импульсами сложной амплитудно-временной структуры, состоящих из последовательности импульсов свободной генерации и импульсов модулированной добротности в процессах размерной обработки керамических материалов.

Введение

Сфокусированное лазерное излучение, обеспечивая высокую концентрацию энергии в зоне воздействия может использоваться для размерной обработки металлов и сплавов, керамики, стекла, пластмасс и композитов [1, 2, 3]. Минимальная зона термического влияния, отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал, временных (в процессе резки) и остаточных напряжений (после полного затвердевания) уменьшает вероятность образования микротрещин, которые могут служить очагами макро повреждений [4]. Высокая технологичность и гибкость управления лазерным излучением позволяет реализовать лазерную резку по сложному контуру плоских заготовок с высокой степенью автоматизации процесса. В области размерной обработки керамических листовых материалов наибольший интерес представляют твердотельные лазерные установки, работающие в импульсно-периодическом режиме. Это связано с их высокой надежностью, малыми габаритами, простотой технического обслуживания и высокой гибкостью управления параметрами излучения [5].

Воздействие лазерного излучения на керамические материалы при резке и перфорации отверстий характеризуется общими положениями, связанными с поглощением и отражением излучения и распространением поглощенной энергии по объему материала за счет теплопроводности. В зоне облучения на первом этапе происходит нагрев материала до температуры плавления. Последующее поглощение излучения приводит к перемещению фазовой границы плавления вглубь материала. Далее тепловое воздействие приводит к кипению и интенсивному испарению материала из зоны лазерного воздействия. Выброс материала состоит из трех фаз: плазма, пар и конденсированная фаза. Конденсированная фаза выброса образуется выдавливанием расплава материала из области взаимодействия импульсом отдачи пароплазменного факела.

Определяющими факторами, влияющими на производительность обработки, являются объем расплавленного материала, глубина проникновения изотермы плавления и величина импульса давления паров. При обработке импульсом квазистационарного излучения (режим свободной генерации) трудно достичь оптимального сочетания указанных показателей. Эффективным оказалось применение метода воздействия на материал двух лазерных пучков, когда один из них (режим свободной генерации) формирует ванну расплава, а другой (режим модулированной добротности) инициирует импульс давления необходимый для выброса конденсированной фазы (рис. 1).

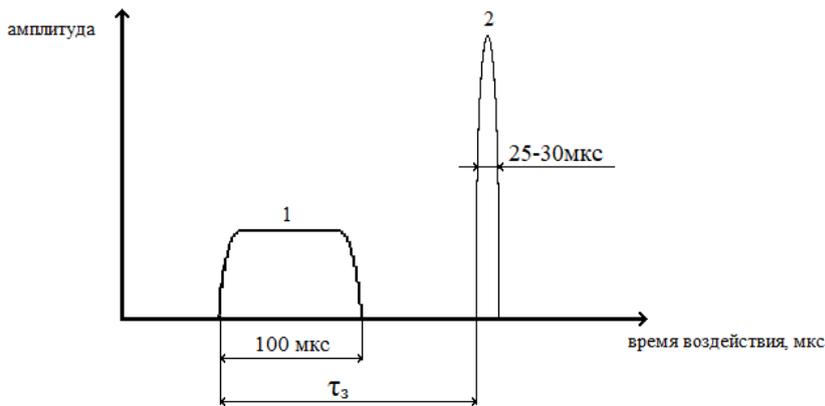


Рис. 1. Схема воздействия на материал лазерных пучков: 1 – в режиме свободной генерации; 2 – в режиме модулированной добротности

В большинстве ранних реализаций двухстадийного метода обработки совмещение пучков осуществлялось под углом, что создавало трудности юстировки системы и негативно сказывалось на качестве обработки.

В данной работе представлены результаты размерной обработки промышленной тонколистовой керамики, широко применяемой в машиностроении и электронике (поликор), методом двухстадийного лазерного воздействия на установке в которой оптические оси двух лазеров были совмещены, что позволило фокусировать пучки в единой зоне облучения.

Беспористая прозрачная керамика поликор имеет высокое значение коэффициента пропускания света, электрических и механических характеристик. Поликор содержит 99,7 – 99,9 % Al_2O_3 и 0,3–0,2 % окиси магния. Поликор проявляет особо высокую нагревостойкость и сохраняет электрические характеристики до температуры 400 °С, механические – до 1600 °С. Благодаря высокой плотности 3,97 г/см³, практически равной плотности Al_2O_3 можно обеспечить высокую чистоту обработки поверхности. Поэтому поликор применяется для осаждения пассивных элементов гибридных интегральных микросхем, в качестве нагревостойких диэлектрических подложек микросхем, в том числе микроволновых подложек в запоминающих устройствах, для изготовления окон, подверженных высоким температурам и давлениям, линз в инфракрасных головках ракет, лазерных устройствах, колб металлогалогенных ламп.

Методика эксперимента

Для проведения экспериментов использовалась установка, состоящая из двух лазеров с совмещенными оптическими осями (рис. 2). Важным элементом установки является блок управления, который обеспечивал возможность синхронизировать работу лазеров, меняя время задержки τ_z импульса срабатывания одного лазера относительно другого. В результате совмещения пучков в зоне облучения формировался сложный импульс с неоднородно амплитудно-временной структурой. В качестве теплового импульса использовалось излучения YAG:Nd^{3+} лазера ALFA-300AUTO, работавшего в режиме свободной генерации (энергия до 1,0 Дж, длительность импульса 0,1 мс). Удаление расплава из зоны облучения обеспечивалось мощным импульсом давления паров, который формировался импульсом модулированной добротности второго YAG:Nd^{3+} лазера (энергия до 0,1 Дж, длительность импульса 25–30 нс). Энергия излучения лазеров измерялась специализированным калориметром LabMax-Top с датчиками J-25MB-HE и PM10, который был установлен в момент измерения между полупрозрачным зеркалом и фокусирующей линзы.

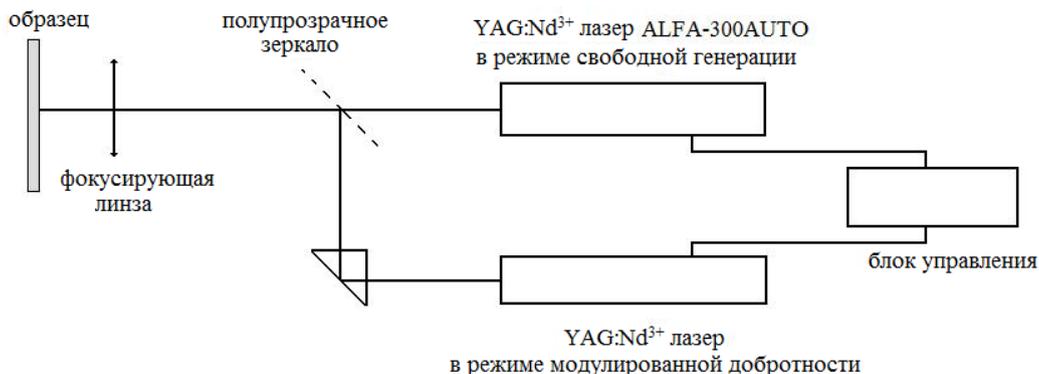


Рис. 2. Схема лазерной установки для комбинированной размерной обработки тонколистовой керамики

Результаты и обсуждение

Эксперименты проводили на тонколистовых (1,0–1,5 мм) образцах из поликора (Al₂O₃). Исследовалось зависимость массы удаляемого материала на единицу затраченной энергии от времени задержки импульса модулированной добротности относительно начала действия теплового лазерного импульса, для нескольких значений энергии теплового лазерного импульса

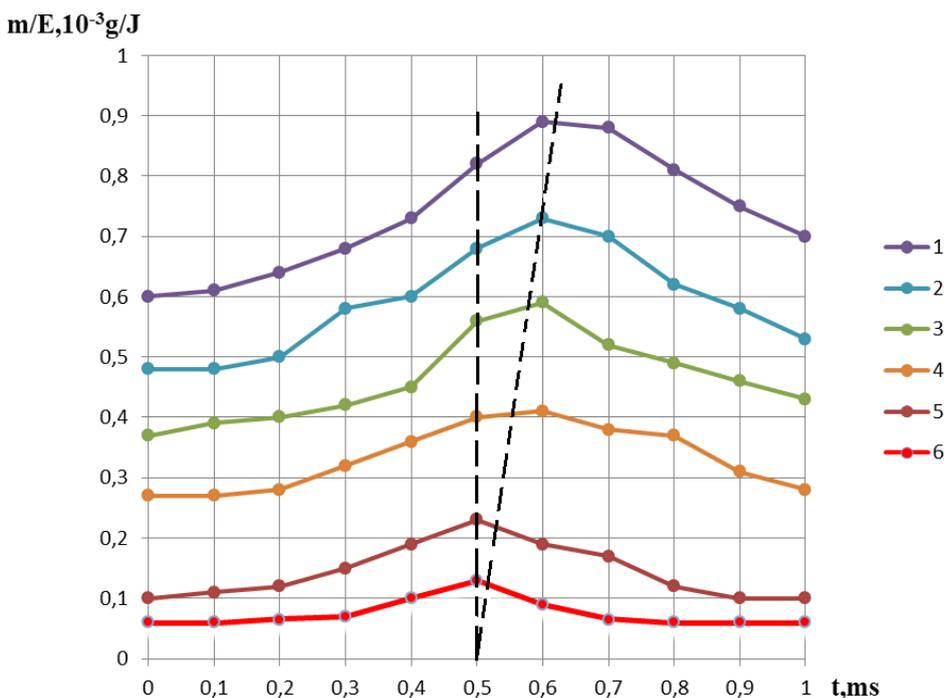


Рис. 3. Зависимость массы удаляемого материала на единицу затраченной энергии от времени задержки импульса модулированной добротности относительно начала действия теплового лазерного импульса: 1 – 1,0 Дж; 2 – 0,8 Дж; 3 – 0,5 Дж; 4 – 0,4 Дж; 5 – 0,3 Дж; 6 – 0,2 Дж

На рис. 3 представлены нормированные на единицу энергии зависимости массы удаляемого материала от времени задержки импульса модулированной добротности YAG:Nd³⁺ лазера относительно начала действия теплового импульса лазера ALFA-300AUTO. Снимались зависимости для фиксированных значений теплового лазерного импульса ($E = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1,0$ Дж.), количество удаляемого материала определялся по измерениям потери массы образцов после многократного (100 раз) воздействия на мишень на аналитических весах Sartorius Cubis II с точностью 0,001 г.

Для относительно небольших энергий импульсов теплового воздействия (до 0,3 Дж) положение максимума приходится на момент окончания теплового импульса. С возрастанием энергии происходит некоторое смещение максимума во времени, связанное с тем, что зона плавления материала продолжает прогрессировать и после действия теплового импульса, благодаря тому, что среднее значение температуры расплава к концу облучения значительно превышает температуру плавления материала. С возрастанием энергии теплового лазерного импульса, влияние излучения модулированной добротности на процесс удаления материала из ванны расплава заметно уменьшается. Это хорошо заметно по изменению отношения величины массы удаляемого конденсата к величине той же массы только при тепловом лазерном воздействии (режим свободной генерации). Уменьшение влияния импульса модулированной добротности проявляется в том, что с ростом энергии основного импульса становится возможным частичное испарение расплава непосредственно за счет теплового импульса, а на долю дополнительного импульса остается только удаление оставшейся части расплава. Кроме того, это вызвано экранировкой излучения пароплазменным факелом [6, 7], возникающим при достаточно больших интенсивностях импульса теплового воздействия. Качество обработки и ее результативность в технологическом аспекте исследовалось в импульсно-периодическом режиме (частота – 10 Гц, энергия теплового импульса 0,8 Дж, энергия импульса модулированной добротности 0,03 Дж) на промышленных образцах из поликора толщиной 1,0–1,5 мм. Исследования внешнего вида реза проводилось на микроскопе NEOFOT-32 и представлены на рис. 4.

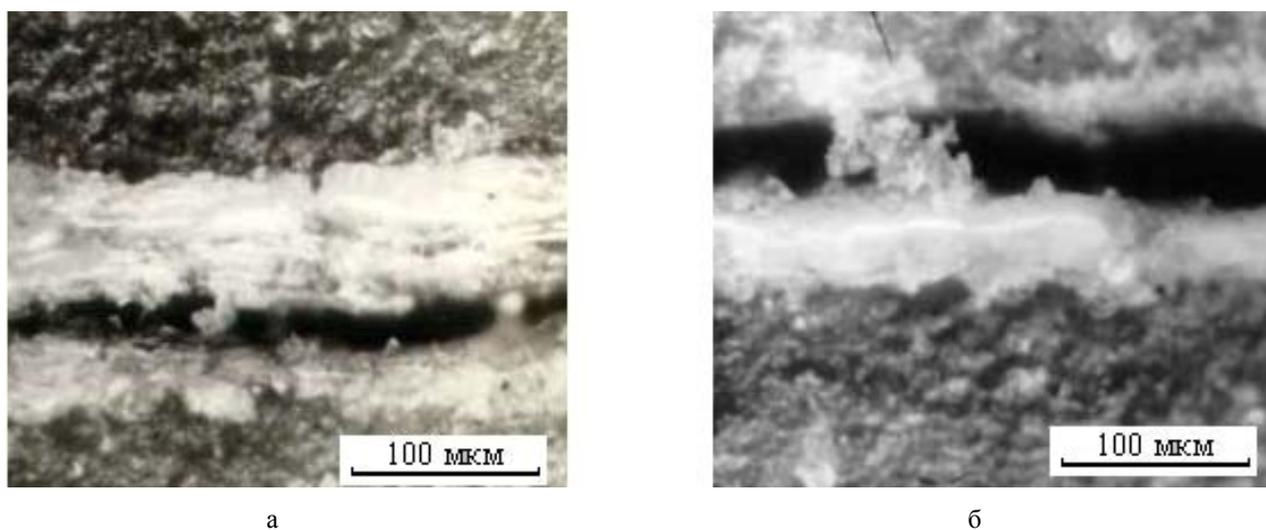


Рис. 4. Внешний вид реза сформированных излучением лазера, работающего в режимах: а) свободной генерации; б) двухстадийный режим

Кроме того, в работе были проведены исследования по обработке тех же материалов по схеме, предложенной в работе [8], где реализуется переключение одиночного лазерного излучателя с режима свободной генерации (тепловой импульс) на режим модулированной добротности (импульс давления), согласованное с процессом формирования отверстия. Исследования размерной обработки керамических материалов по этой схеме показали аналогичные результаты на образцах толщиной до 1 мм. При больших толщинах качество размерной обработки эффективнее с применением схемы, представленной на рис. 2.

Сравнение результатов обработки, выраженное в заметном уменьшении количества грата и наплывов внутри пространства реза показывает, что режим двухстадийной лазерной размерной обработки, как с количественной, так и с качественной стороны, заметно превосходит традиционный режим. Это определяет перспективность его использования в технологиях размерной обработки керамических материалов.

Выводы

1. Комбинация импульса свободной генерации и импульса модулированной добротности позволяет существенно повысить эффективность размерной лазерной обработки керамики.
2. Существует оптимальное значение времени задержки импульса модулированной добротности относительно импульса свободной генерации, обеспечивающее максимальную производительность процесса как с точки зрения количества удаленного конденсата, так и с точки зрения глубины формируемой лунки. В простейшем случае для оптимизации процесса необходимо, чтобы время задержки равнялось длительности импульса свободной генерации.
3. Экспериментально установлено, что оптимальное время задержки t_3 при энергии излучения в 1,0 Дж составляет 0,6 мс.

Список литературы

1. Otani T., Herbst L., Heglin M., Govorkov S. V., Wiessner A. O., Microdrilling and micromachining with diode-pumped solid-state lasers, *Appl. Phys. A Mater.* 79 (2004) 1335–1339.
2. Gurauskis J., Sola D., Pena J. I., Orera V. M., Laser drilling of Ni-YSZ cermets, *Journal of the European Ceramic Society* 28 (2008) 2673–2680.
3. Knowles M. R. H., Rutterford G., Karnakis D. and Ferguson A., Micromachining of metals, ceramics and polymers using nanosecond lasers. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, 33 (1–2), 95–102.
4. Samant A. N., Dahotre N. B. (2008). Computational predictions in single-dimensional laser machining of alumina, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 12–13, 1345–1353.
5. Dutta Majumdar and Manna, *Laser material processing*, International Materials Reviews, 2011, VOL 56, NO 5/6, 341–388.
6. Bauerle D., *Laser Processing and Chemistry*, Springer, Heidelberg, Berlin (2011).
7. Turichin G. A., Grigor'ev A. M., Zemlyakov E. V., Valdaitseva E. A., Dilthey U. & Gumeniuk A. Special features of formation of plasma torch under conditions of hybrid laser-arc welding. *High Temperature*, volume 44, pages 647–655 (2006).
8. Kikin P. Yu., Pchelintsev A. I., Rusin E. E. Laser cavity switching with target fractur. *Technical Physics Letters*. 2003. T. 29. № 4. С. 267–268.