

ЛАЗЕРНОЕ СВЕРЛЕНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ

© 2005 г. В. А. Серебряков*, доктор физ.-мат. наук; М. В. Волков**; X. Zhang***

* НИИ лазерной физики, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

*** Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing, China

Приведены результаты лазерного сверления глубоких микроотверстий ($\varnothing 150$ мкм, аспектное отношение до 35) в жаропрочных сплавах. В качестве источника лазерного излучения в экспериментах использовался Nd:YAG-лазер, генерирующий последовательность миллисекундных пачек импульсов (длительность отдельного импульса 150–550 нс, частота повторения импульсов в пачке 3,5–50 кГц). Параметры отверстий, полученных при различных параметрах лазерного пучка, определялись с помощью микроструктурного анализа.

Коды OCIS: 350.3390.

Поступила в редакцию 18.10.2004.

Введение

Сверление отверстий, которые являются каналами охлаждения компонентов турбинных двигателей, — один из наиболее распространенных процессов лазерной обработки материалов [1]. Однако до сих пор нет лазерных систем, позволяющих эффективно сверлить в турбинных лопатках из жаропрочного Ni-сплава отверстия с диаметрами 100–500 мкм, глубиной до 5 мм, с малой величиной перегретой зоны, без микротрещин, уменьшающих ресурс детали.

В случае обычного лазерного сверления (импульсы миллисекундного диапазона, плотность мощности $\sim 10^6$ Вт/см²) формируется переплавленный слой (толщина свыше 50 мкм), в котором из-за быстрого затвердевания происходит формирование микротрещин. Дополнительный поддув кислорода хотя и уменьшает толщину переплавленного слоя, но оставляет большую зону термического воздействия на структуру материала.

Использование коротких наносекундных импульсов с высокой плотностью мощности (10^8 – 10^9 Вт/см²) и более короткой длиной волны (что поднимает порог поглощения лазерного излучения в плазме) помогает решить эту проблему. Переплавленный слой значительно уменьшается, так как удаление материала происходит в основном в газообразной фазе [2]. Для импульсов с длительностью 10^{-8} с пороговая плотность энергии для быстрого удаления материала составляет 10 Дж/см², скорость абляции при этом порядка 1 мкм/имп. При увеличении толщины материала свыше 1 мм скорость абляции значительно падает ($\sim 0,1$ мкм/имп и менее [3–5]). С другой стороны, при увеличении плотности энергии более чем на порядок скорость абляции увеличивается незначительно.

Один из факторов, ограничивающих скорость абляции, связан с поглощением и рассеянием лазерного излучения в плазме, парах металла и капельках расплава [6]. Другим фактором является более силь-

ное ослабление лазерного излучения внутри глубокого канала одномерно расширяющимся паром, в противоположность поверхностному трехмерному случаю. В результате минимальная плотность энергии, необходимая для сверления образца толщиной 0,37 мм, повышается до 30 Дж/см², а при толщине образца 0,87 мм повышается до 100 Дж/см² [7]. Требуется ~ 5 –10 мин, чтобы просверлить отверстие с диаметром до 150 мкм в образце из материала Inconel 718 толщиной 1,5 мм [8]. Кроме того, возможно формирование значительного переплавленного слоя на боковых стенках отверстий и микротрещин, которые распространяются в основной материал, уменьшая ресурс детали. При этом конусность отверстия может достигать значений 5° – 10° [9, 10].

Экспериментальная установка

Решение проблемы сверления глубоких микроотверстий представляется в использовании профилированных пачек импульсов (длительность пачки несколько миллисекунд) с относительно длинными (300–500 нс) импульсами, интервал между которыми превышает 20 мкс [11–13]. Во-первых, относительно большая длительность импульсов позволяет обеспечить обработку материала при плотности энергии, более чем на порядок величины превосходящей плотность энергии для импульсов 10–15 нс (при той же интенсивности), и, следовательно, сверление менее критично к толщине материала. Во вторых, имеется возможность повышения энергии импульса к концу пачки при сверлении отверстия для увеличения эффективности удаления испаряемого материала. В-третьих, за счет использования пачек импульсов можно понизить среднюю мощность до 10–20 Вт и тем самым существенно уменьшить стоимость лазера.

Экспериментальная лазерная установка для сверления высокоаспектных микроотверстий включает в себя задающий генератор и усилитель (рис. 1). За-

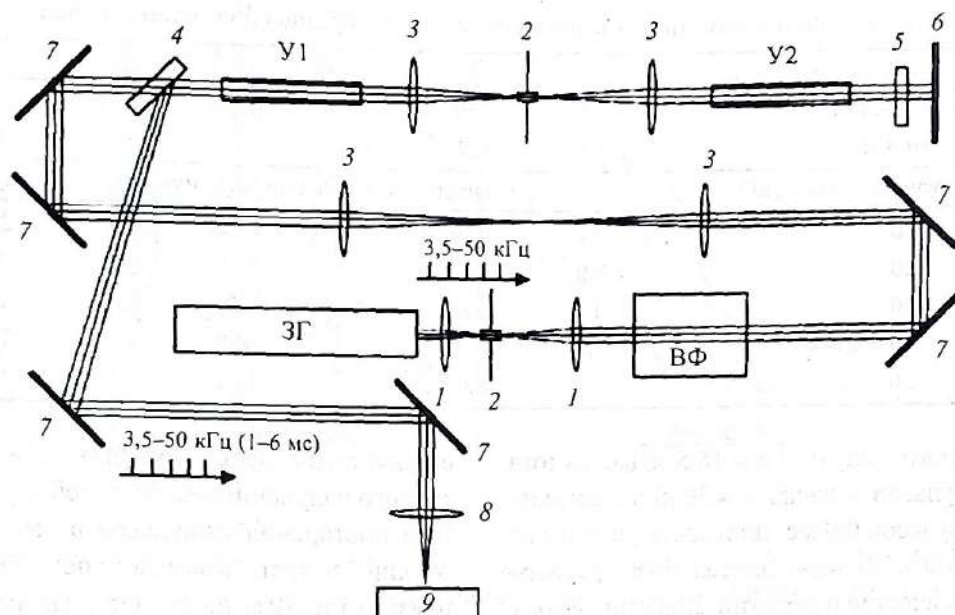


Рис. 1. Схема экспериментальной лазерной установки. ЗГ – задающий генератор; ВФ – вентиль Фарадея; У1, У2 – усилители; 1 – телескоп, 2 – диафрагмы, 3 – ретрансляторы, 4 – поляризатор, 5 – пластинка $\lambda/4$, 6 – зеркало, 7 – поворотные зеркала, 8 – линза, 9 – образец.

дающий генератор (Nd:YAG-лазер с непрерывной накачкой и акустооптическим затвором) генерирует импульсы длительностью 150–550 нс с частотой повторения 3,5–50 кГц, со средней мощностью до 1 Вт. Двухпроходовой усилитель, состоящий из двух Nd:YAG-стержней с диаметрами 6,3 и 8 мм, вырезает и усиливает пачку импульсов длительностью 1–6 мс из непрерывной последовательности импульсов. После усилителя энергия пачки импульсов достигает 1 Дж. Частота повторения пачек до 10 Гц.

Фокусирующая линза с диаметром 150 мм обеспечивала на образце плотность мощности от 10^8 Вт/см² и более (диаметр пучка на поверхности образца ~120 мкм).

Вспомогательные газы (O_2 , N_2 , Ar) использовались для выталкивания расплава из зоны обработки, при использовании кислорода в зоне обработки появлялся дополнительный источник тепла от экзотермической реакции окисления.

Результаты и обсуждения

Сверление микроотверстий (диаметром 150 мкм) проводилось в Ni-сплаве IC10, Ni-монокристалле DD6, конструкционной и нержавеющей сталях.

Рисунок 2 представляет результаты сверления микроотверстий в материале IC10 (толщина 1,6 мм) с использованием импульсов различной длительности

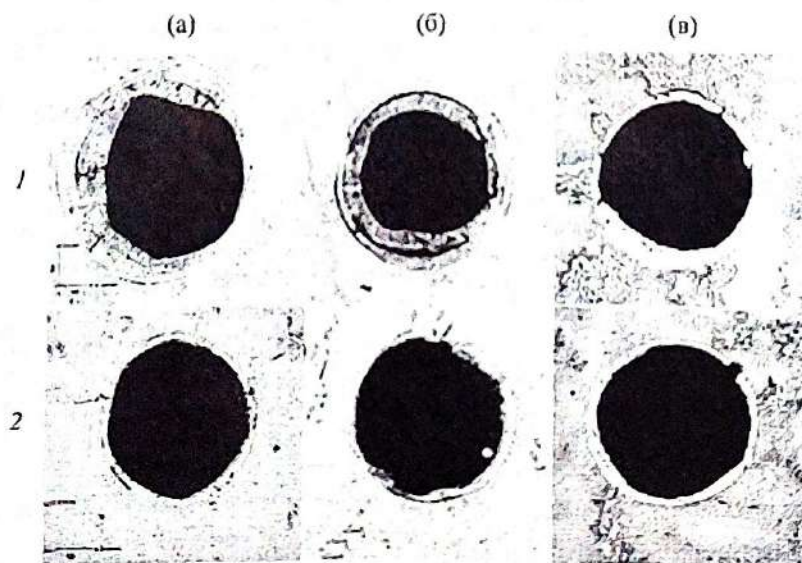


Рис. 2. Сверление микроотверстий в Ni-сплаве IC10 при различных длительностях импульса ($E = 18,5$ мДж, $F = 30$ кГц). 1 – Ar (2 атм), 2 – без газа. а – длительность импульса 150 нс, толщина переплавленного слоя 12–80 мкм; б – 250 нс, 12–30 мкм; в – 550 нс, менее 15–20 мкм.

Толщина образца, мм	2			1,6		2	
Длительность импульса, нс	150	250	550	250	550	150	250
Плотность мощности, ГВт/см ²	1,1	0,7	0,3	0,7	0,3	1,1	0,7
Частота импульсов в пачке, кГц	Средняя скорость абляции, мкм/имп					Конусность ($\varnothing_{\text{вх}}/\varnothing_{\text{вых}}$)	
10	7,1	10,6		13,2		2,16	2,15
20	8,9	15,8		17,2		2,6	1,6
30	12	17	24	19	29	2,6	1,3
40	5,9	8,9		14,8		2,16	1,2
50	4,8	8,6		11,4		2,16	1,1

(энергия одиночного импульса $E = 18,5$ мДж, частота повторения импульсов в пачке $F = 30$ кГц, длительность пачки импульсов 0,9 мс, плотность энергии на образце 170 Дж/см²). Большая длительность импульсов дает лучшее качество отверстий. Для импульсов с длительностью 550 нс толщина переплавленного слоя для большинства отверстий меньше чем 20 мкм, а в отдельных случаях менее 10 мкм (рис. 2с). Для более коротких импульсов существует больший разброс в толщине переплавленного слоя.

В таблице приведены скорости сверления отверстий в материале IC10 с использованием импульсов с различной частотой повторения в пачке (энергия импульсов 18,5 мДж). Как видно из таблицы, эффективность сверления возрастает с увеличением длительности импульса, а частота повторения импульсов в пачке, равная 30 кГц, является оптимальной. При частоте повторения импульсов более 30 кГц возрастают поглощение и рассеяние лазерного излучения в плазменном факеле, что снижает эффективность сверления. Как ожидалось, увеличение аспектного отношения приводит к резкому снижению скорости абляции, так как с увеличением

глубины отверстия усиливается диссипация лазерного излучения. На большей глубине и при частоте повторения импульсов в пачке менее 30 кГц (граничная частота высокого поглощения излучения плазмой) плазма перестает подогревать расплав и большее количество расплава не удаляется (см. таблицу), а застывает на боковых стенках отверстий.

Конусность отверстия также зависит от частоты повторения импульсов в пачке. Для частоты следования импульсов 50 кГц различие входных и выходных диаметров отверстий составляет не более 10%, но при этом снижается скорость абляции, а следовательно, и эффективность сверления.

Рисунок 3 иллюстрирует результаты сверления различных материалов на основе Ni (IC10 и DD6) импульсами длительностью 250 нс (энергия импульса 18,5 мДж) с различной частотой повторения в пачке. Очевидно, что большая частота повторения импульсов в пачке дает лучшее качество отверстий (переплавленный слой становится тоньше).

Кислород повышает эффективность сверления отверстий с использованием импульсных лазеров, работающих в режиме свободной генерации. Для

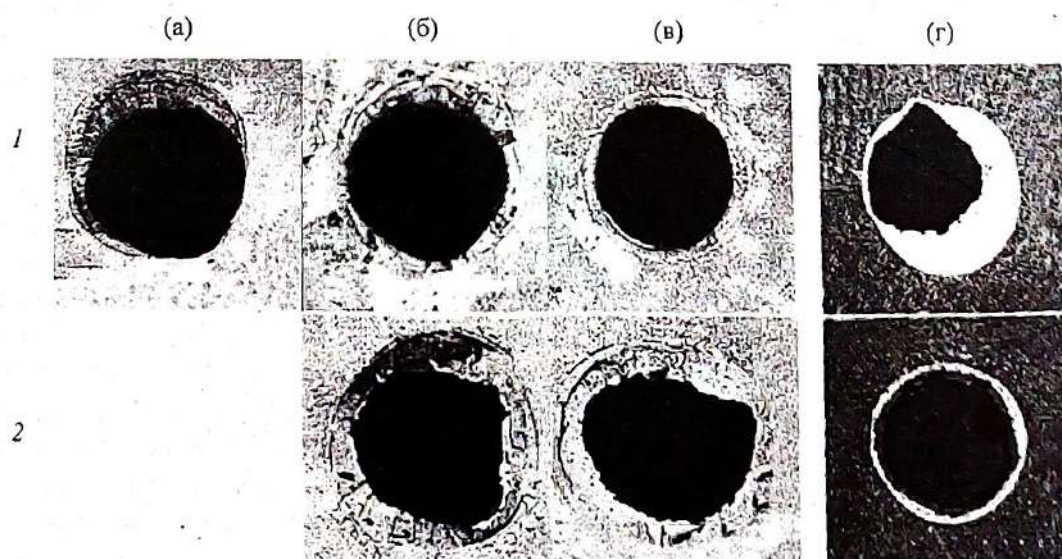


Рис. 3. Сверление микроотверстий в Ni-сплавах IC10 (а, б, в) и DD6 (г) с толщиной 2 мм при различной частоте повторения импульсов в пачке. 1 – без газа, 2 – в атмосфере O₂ (1,5 атм). IC10: 1а – 10 кГц, толщина переплавленного слоя 60 мкм; 1б – 20 кГц, 35 мкм; 2б – 20 кГц, 45 мкм; 1в – 30 кГц, менее 15 мкм; 2в – 30 кГц, 35 мкм. DD6: 1г – 30 кГц, 75 мкм; 2г – 30 кГц, менее 15 мкм.

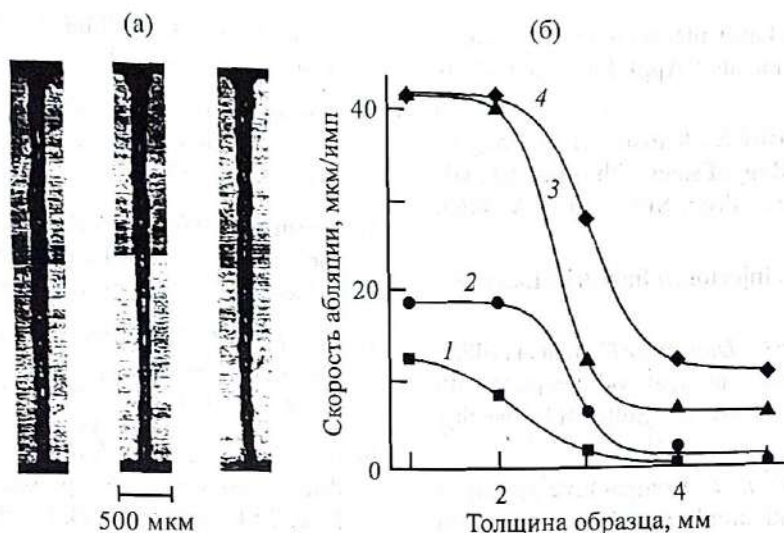


Рис. 4. Сверление глубоких микроотверстий в образцах из нержавеющей стали. а – микроотверстия ($\varnothing 100$ мкм) в образцах с толщиной 5 мм. б – эффективность абляции в зависимости от толщины образца и энергии импульса. $E = 9$ (1), 18 (2), 36 (3), 72 мДж (4).

нашего случая отверстия, сделанные в IC10 с поддувом кислорода (1,5 атм) (рис. 3в и 3г), имеют толстый переплавленный слой (иногда расщепляющийся), а также множество микротрещин, которые распространяются в основной материал. Скорость абляции при использовании аргона выше, чем при использовании кислорода, но качество отверстия хуже.

Результат сверления сильно зависит от типа материала. Ni-монокристалл DD6 показывает противоположный результат по сравнению с IC10: толщина переплавленного слоя отверстий, сделанных в DD6 с O_2 , намного тоньше, чем в случае отверстий, сделанных в отсутствие газа.

Таким образом, получены отверстия с переплавленным слоем менее 15 мкм для различных материалов на основе Ni (для DD6 с O_2 , для IC10 без газа) с толщиной несколько миллиметров.

Зависимость эффективности сверления микроотверстий от глубины отверстия была исследована на образцах из конструкционной и нержавеющей сталей толщиной до 5 мм. Скорость абляции, а следовательно, и эффективность сверления микроотверстий резко снижается при толщине образца более 2 мм (рис. 4б). В снижении скорости сверления с увеличением толщины материала ключевую роль играет плазма и переотражение лазерного излучения от боковых стенок. Однако эффективность сверления и в этом случае более чем на порядок превосходит эффективность сверления с использованием коротких (10–15 нс) импульсов с той же интенсивностью. Дальнейшее повышение эффективности сверления возможно при повышении интенсивности излучения с ростом глубины отверстия (профилирование импульсов), а также используя пространственный профиль пучка с резким краем (с максимумом интенсивности на краях), а не гауссов [14].

Закключение

Использование миллисекундных пачек импульсов с длительностью отдельного импульса несколько сотен наносекунд дает возможность проводить обработку материалов со значительной энергией импульса при плотности мощности около 10^9 Вт/см² (ниже порога интенсивного плазмообразования), что повышает производительность процесса сверления. Плазма, формируемая внутри канала, слабее экранирует лазерное излучение и оказывает меньшее негативное влияние на боковые стенки отверстия. В результате эффективность испарения металла более чем на порядок превосходит эффективность сверления короткими, в том числе УФ, импульсами при такой же малой толщине переплавленного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Convergent Energy to supply Nd:YAG systems for building jet engines // Laser Focus World. 1997. June.
2. Xiangli C. Short pulse high intensity laser machining. General Electric Corporate Research and Development, 1999.
3. Chang J.J., Warner B.E., Dragon E.P., Martinez M.W. Precision micromachining with pulsed green lasers // Laser Appl. 1998. V. 10. P. 285–291.
4. Norton M.A., Murray J.E., Boley C.D., Sinz K.H. Laser ablation of stainless steel from 1 J/cm² to 10 kJ/cm² // OSA Techn. Dig. CLEO'98. Paper CWS2. Washington: OSA, 1998.
5. Kononenko T.V., Garnov S.V., Klimentov S.M., Konov V.I., Loubnin E.N., Dausinger F., Raiber A., Taut C. Laser ablation of metals and ceramics in picosecond-nanosecond pulsewidth in the presence of different ambient atmospheres // Appl Surface Sci. 1996. V. 109/110. P. 48–51.

6. Chang J.J., Warner B.E. Laser-plasma interaction during visible-laser ablation of metals // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. P. 473–475.
7. Govorkov S., Slobodtchikov E., Wiessner A., Basting D. High accuracy microdrilling of steel with solid-state UV laser at 10 mm/sec rate // *Proc. SPIE.* 2000. V. 4065. P. 790–800.
8. Leong K.H. Drilling Fuel Injectors // *Industrial Laser Sol.* 2001. April. P. 19–23.
9. Radtke J., Fohl C., Jasper K., Dausinger F. Helical drilling of high quality micro holes in steel and ceramics with short and ultrashort pulsed lasers // *J. Stuttgart University.* 2003. March.
10. Goreshi M., Low D.K.Y., Li L. Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling // *Int. J. Machine Tools and Manufacture.* 2002. V. 42. Issue 9. P. 985–995.
11. Мурина Т., Рысов В.А. Усиление высокочастотной последовательности импульсов в лазерных системах на стекле с Nd // *ЖТФ.* 1991. Т. 61. № 4. С. 99–104.
12. Gorny S.G., Grigoriev A.M., Lopota V.A., Turichin G.A. Increasing of hole-drilling speed by using of packs of laser pulses. St.-Petersburg: CLT-SPbSTU, 2001.
13. Low D.K., Li L. Effects of interpulse and intrapulse shaping during laser percussion drilling // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4426. P. 191–194.
14. Kamakis D.M., Fieret J., Rumsby P.T., Gower M. Microhole drilling using reshaped pulsed Gaussian laser beams // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4443. P. 150–158.