

# Лазерная прошивка сверхглубоких микронных отверстий в различных материалах при программируемом управлении параметрами лазерной генерации

Т.Т.Басиев, А.В.Гаврилов, В.В.Осико, С.Н.Сметанин, А.В.Федин

*Исследованы возможности повышения эффективности лазерной прошивки отверстий микронных диаметров, увеличения их глубины и устранения конусности при использовании излучения одномодового петлевого Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта на решетках усиления и пассивной модуляцией добротности сканируемым градиентно окрашенным кристаллом  $\text{LiF:F}_2^-$ . Осуществлена лазерная прошивка отверстий диаметром 15–150 мкм и глубиной до 20 мм при коэффициенте формы (отношение глубины к диаметру) 50–155 в различных металлах и сплавах. Показано, что сканирование пассивного лазерного затвора во время обработки позволяет в 1.5–2 раза увеличить глубину и скорость лазерной прошивки сверхглубоких отверстий.*

**Ключевые слова:** лазерная прошивка отверстий, коэффициент формы, программируемое управление, петлевой резонатор, модуляция добротности.

## 1. Введение

В настоящее время лазерная прошивка отверстий субмиллиметровых диаметров успешно конкурирует с механическими, электроэрозионными, электрохимическими, электронно-лучевыми методами [1]. Этот метод особенно эффективен при коэффициенте  $k$  формы (отношение глубины отверстия  $H$  к его диаметру  $d$ ) менее 16 благодаря большей производительности, отсутствию расхода инструмента, возможности прошивки глубоких отверстий малого диаметра и произвольной пространственной формы под любым углом к обрабатываемой поверхности. Лазерная перфорация микронных отверстий представляет значительный интерес для микроэлектроники (перфорация печатных плат), для авиационной промышленности (обшивки самолетов, лопатки турбин) и для других отраслей машиностроения (инжекторы топлива, фильтры, фильеры, сопла и т. д.), а также для оптоэлектроники (узлы сопряжения волоконно-оптических систем передачи информации) [2, 3].

Наибольший коэффициент формы отверстий (около 250) достигается при обработке электроискровыми методами [3], однако при этом диаметр отверстий составляет несколько миллиметров. Минимальный диаметр отверстия, получаемого данным методом, равен 0.2 мм при коэффициенте формы  $k < 50$ . Однако прошивка отверстий большой глубины с  $d < 0.2$  мм и  $k > 16$  даже при обработке лазерным излучением представляет значительные трудности [3], поскольку это сопряжено с необходимостью увеличения энергетических параметров лазерно-

го излучения при сохранении высокого качества пучка, что является причиной удорожания лазерной технологии.

Создание одномодовых фазовосопреженных лазеров на YAG:Nd с петлевыми резонаторами на решетках усиления и модуляцией добротности пассивными лазерными затворами (ПЛЗ) на основе кристаллов  $\text{LiF:F}_2^-$  [4–7] позволило нам ранее существенно повысить эффективность лазерной обработки глубоких микронных отверстий в образцах из быстрорежущей стали [6, 7] при использовании предложенного нами [8] метода адаптивного управления параметрами лазерной генерации путем сканирования ПЛЗ с переменным начальным пропусканием.

В связи с этим в настоящей работе исследована возможность не только повышения эффективности лазерной прошивки микронных отверстий, но и одновременного увеличения глубины и уменьшения конусности обрабатываемых отверстий в различных материалах с помощью одномодового Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта и со сканируемым ПЛЗ на кристалле  $\text{LiF:F}_2^-$ .

## 2. Методика прошивки отверстий

Схема экспериментальной установки (рис.1) включала в себя одномодовый Nd:YAG-лазер, ответвитель, фокусирующий объектив, мишень, измеритель энергии импульсов излучения типа ИМО-2Н, лавинные фотодиоды типа ЛФД-2А и двухлучевой запоминающий осциллограф Agilent 54641А. Мишень выполнена в виде клина, что позволяло в процессе эксперимента изменять толщину прошиваемого материала путем перемещения образца перпендикулярно лазерному лучу. При этом положение плоскости наилучшей установки относительно поверхности мишени оставалось неизменным.

Для прошивки отверстий в различных материалах использовался разработанный нами ранее мощный одномодовый петлевой Nd:YAG-лазер с самообращением

Т.Т.Басиев, В.В.Осико. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: basiev@lst.gpi.ru  
А.В.Гаврилов, С.Н.Сметанин, А.В.Федин. Ковровская государственная технологическая академия, Россия, 601910 Ковров, Владимирская обл., ул. Маяковского, 19; e-mail: kanir@kc.ru

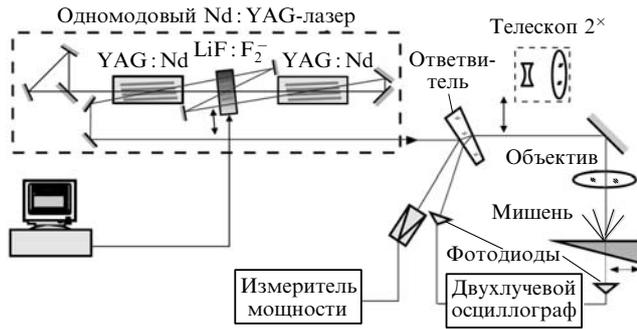


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

волнового фронта и пассивной модуляцией добротности [4], параметры генерации которого специально оптимизированы для его технологического применения [9]. Излучатель лазера состоял из двух квантронов типа К-301В с активными элементами (АЭ) размером  $\varnothing 6.3 \times 100$  мм и криптоновыми лампами накачки КДНП-6/90. Блок питания типа 13 ГДН позволял изменять частоту импульсов накачки от 1 до 30 Гц. Длительность импульсов накачки составляла 200 мкс. Обработка отверстий производилась при частоте следования импульсов накачки 20 Гц.

Пассивная модуляция добротности Nd:YAG-лазера осуществлялась кристаллом  $\text{LiF:F}_2^-$  с переменным начальным пропусканием, которое могло линейно изменяться от 20 % до 70 % перемещением кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$  перпендикулярно оптической оси. Это позволяло плавно управлять энергетическими и временными параметрами излучения. При уменьшении начального пропускания кристалла длительность отдельного лазерного импульса сокращалась, а его энергия и пиковая мощность увеличивались. При начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 = 20\%$  энергия отдельного импульса в пучке  $W_p$  достигала 350 мДж, а пиковая мощность  $P_i$  превышала 17.5 МВт [4]. При этом в пучке генерировались три импульса длительностью 20 нс с периодом следования 35 мкс. Возрастание энергетических параметров обусловлено тем, что увеличение оптической плотности ПЛЗ приводит к увеличению времени достижения пороговой инверсии населенности, росту запасенной в АЭ энергии и, как следствие, к генерации импульсов с большими энергией и пиковой мощностью. Использование ПЛЗ с высоким начальным пропусканием обуславливает низкие потери на его просветление и малое время достижения пороговой инверсной населенности в АЭ, что приводит к уменьшению периода следования импульсов в пучке и к росту их числа. При этом, хотя энергия каждого отдельного импульса генерации и пиковая мощность снижаются, полная энергия всего пучка импульсов увеличивается и при максимальном начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 = 70\%$ , энергии отдельных импульсов 93 мДж (20 импульсов в пучке), длительности импульсов  $\sim 60$  нс и периоде их следования  $\sim 10$  мкс составляет 1.86 Дж.

### 3. Полученные результаты и их обсуждение

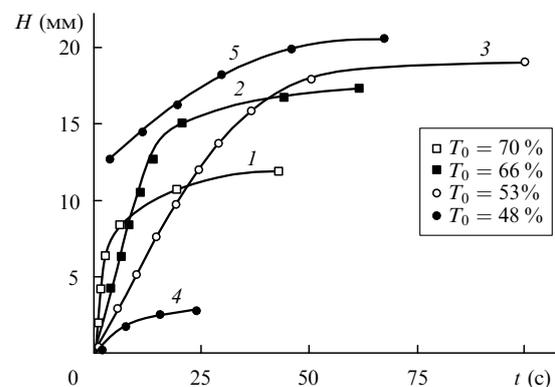
В качестве обрабатываемых материалов использовались стали (быстрорежущая Р18 и жаростойкая 09Х18Н10Т5) и сплавы (твердосплав Т15К6 (WC–TiC–Co), супердюралюмин Д16 и алюминиевый сплав АмГ6).

Для лазерной прошивки сверхглубоких (коэффициент формы  $\sim 100$ ) отверстий наилучшим образом подходит

режим генерации, полученный при использовании участка градиентно окрашенного кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$  с начальным пропусканием  $T_0 = 50 - 60\%$ . При этих параметрах ПЛЗ достигается наибольшая энергия пучка импульсов при сохранении достаточно высоких значений пиковой мощности и энергии отдельного импульса в пучке.

Для изучения возможностей увеличения глубины микронных отверстий и эффективности их обработки экспериментально исследовали изменение скорости увеличения глубины отверстия для каждого обрабатываемого материала при различных фиксированных значениях начального пропускания ПЛЗ. При этом измеряли время образования сквозного отверстия на отдельных участках клиновидной мишени (рис.1). Обработку проводили с помощью объектива с фокусным расстоянием  $F = 100$  мм. На рис.2 представлены зависимости глубины сквозных отверстий от времени их прошивки, полученные при обработке клиновидного образца из быстрорежущей стали Р18 по экспериментальной схеме рис.1. Подобные зависимости получены для всех обрабатываемых материалов.

Видно, что неглубокие отверстия ( $H < 6$  мм) наиболее эффективно обрабатываются при максимальном начальном пропускании кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$   $T_0 = 70\%$  (кривая 1, рис.2). В этом случае энергия пучка лазерных импульсов максимальна, а потери на поглощение излучения плазмой, оцениваемые по высоте и спектру свечения эрозионного факела, минимальны, что связано с низкой пиковой мощностью излучения. Кроме того, высокая скорость обработки свидетельствует о малой удельной энергии, необходимой для удаления материала. Действительно, т.к. отдельные импульсы в пучке следуют с большой частотой, то возможно взаимное влияние импульсов на обрабатываемый слой металла, т.е. часть материала, расплавленного предыдущим импульсом или серией импульсов, может удаляться из канала отверстия последующими импульсами в виде расплава. Следовательно, оптимальным является режим, при котором для полного удаления имеющегося расплава достаточно пиковой плотности мощности импульса излучения. По мере заглубления отверстия из-за расфокусировки плотность мощности излучения на дне канала падает, и при  $H \geq 6$  мм (кривая 1, рис.2) скорость прошивки резко снижается, а время обработки существенно возрастает. Таким образом, при начальном пропускании кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$   $T_0 = 70\%$  можно получить предельную глубину

Рис.2. Зависимости глубины  $H$  отверстия в стали Р18 от времени обработки при различных значениях начального пропускания  $T_0$  кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$ .

отверстия  $H_{\max} = 12$  мм, но наиболее эффективно будут обрабатываться только первые 6 мм.

Уменьшение начального пропускания ПЛЗ до 60 % (кривая 2, рис.2) приводило к увеличению предельной глубины прошиваемых отверстий до 16 мм, однако при этом скорость прошивки на начальном этапе обработки снижалась. Для получения отверстий с предельной глубиной до 18 мм начальное пропускание ПЛЗ необходимо уменьшить до 53 %. При данном пропускании кристалла  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  по всей глубине канала поддерживается плотность мощности, значительно превышающая пороговую, т. е. достаточную для удаления материала в испарительном режиме ( $q \approx 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>). В данном случае (кривая 3, рис.2) на начальном этапе формирования отверстия скорость заглубления значительно ниже скорости, соответствующей режимам обработки с  $T_0 = 60\% - 70\%$ . Это, во-первых, связано с тем, что при одинаковых энергиях накачки энергия пучка излучения при использовании оптически более плотного ПЛЗ заметно ниже. Во-вторых, поскольку частота следования импульсов в пучке на порядок меньше, а сами импульсы в два раза короче, то взаимное влияние импульсов в зоне обработки значительно ослабляется. Это приводит к тому, что удаление материала осуществляется по испарительному механизму разрушения. И, наконец, третий немаловажный фактор снижения эффективности обработки – экранировка излучения плазмой при высокой пиковой мощности и интенсивности излучения. Наиболее сильно эрозионный факел препятствует обработке на начальных этапах образования отверстия, когда плотность паров металла в фокусе объектива максимальна. В процессе заглубления отверстия вместе с дальнейшим уменьшением скорости удаления материала уменьшается плотность паров металла в области перетяжки лазерного пучка (к тому же часть паров может конденсироваться на стенках, не покидая канала). При этом эффективный потенциал ионизации смеси воздуха и паров металла увеличивается, а экранировка излучения заметно снижается. Этим, как нам представляется, можно объяснить относительно большой начальный линейный участок на кривой зависимости глубины отверстия от времени обработки.

При начальном пропускании ПЛЗ менее 50 % экранировка излучения приповерхностной плазмой повышается настолько, что отверстие почти не растет в глубину (кривая 4, рис.2). При этом под действием плазмы увеличивается входной диаметр отверстия и, следовательно, его конусность. Однако, как показал специальный эксперимент, если глубина отверстия превысила 10 мм, то при  $T_0 < 50\%$  становится возможной дальнейшая обработка отверстий с повышенной предельной глубиной (более 18 мм). В данном эксперименте сначала при  $T_0 = 70\%$  глухое отверстие ориентировочно прошивали до соответствующей предельной глубины около 12 мм (кривая 1, рис.2), которую определяли по времени обработки – более 50 с, а затем путем поперечного перемещения градиентно окрашенного кристалла  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  его начальное пропускание уменьшали до  $T_0 = 48\%$  и проводили доработку канала до образования сквозного отверстия (кривая 5, рис.2). Видно, что при этом предельная глубина отверстия возрастает примерно до 20 мм.

С дальнейшим уменьшением пропускания кристалла  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  зависимость глубины отверстия от времени обработки близка к кривой 4 (рис.2) на ее начальном участке. Однако зависимости, аналогичной кривой 5, не на-

блюдается, если при другом режиме обработки глубина отверстия предварительно значительно увеличилась ( $H > 12$  мм). Преимущественно это связано с рефракцией и поглощением излучения в плазме, что подтвердили результаты дополнительного эксперимента, в ходе которого оценивалась доля излучения, проходящего через сквозное отверстие диаметром 100 мкм в образце толщиной 5 мм. Данные эксперимента показали, что даже испаряющегося со стенок отверстия металла достаточно для поддержания эффективно экранирующей плазмы. При этом доля излучения, падающего на приемную площадку регистрирующего фотодиода, уменьшалась более чем на порядок.

Исходя из полученных результатов, для увеличения глубины и скорости лазерной прошивки отдельного глубокого отверстия во время его обработки ПЛЗ плавно перемещали перпендикулярно оптической оси с уменьшающейся скоростью сканирования. При этом по мере заглубления обрабатываемой площадки пропускание кристалла  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  постоянно уменьшали. Это позволило режим обработки отверстия поддерживать близким к оптимальному, соответствующему наибольшему скоростям роста отверстия на каждой глубине обрабатываемой площадки.

В реальных условиях при лазерной обработке ряда вышеперечисленных материалов непрерывное перемещение ПЛЗ позволяло в 1.5–2 раза увеличивать глубину и скорость обработки. В табл.1 представлены характеристики лазерной прошивки отверстий при использовании двух сменных объективов с фокусными расстояниями 50 и 100 мм.

Табл.1. Характеристики проведенной лазерной прошивки сквозных отверстий.

Обрабатываемый материал	$d$ (мкм)	$H$ (мм)	$k$	$C$	$F$ (мм)	$h$ (мм)
Быстрорежущая сталь P18	100	12	120		100	0
	120	15	125	< 1:500	100	1
	130	20	155		100	1.5
Жаростойкая сталь 09X18H10T5	36	3	83		50	0
	116	11	95	< 1:500	100	0.5
Алюминиевый сплав АМГ6	150	20	135		100	1.5
	120	5	42	< 1:200	50	1
Супердюралюмин Д16	150	10	67		50	1.5
	15	2	133	< 1:500	50	0
Твердосплав Т15К6	25	3	120		50	0
	15	2	133	< 1:500	50	0
	20	3	150		50	0

Примечание:  $d$ ,  $H$  и  $C$  – диаметр, глубина и конусность отверстия;  $k = H/d$  – коэффициент формы отверстия;  $F$  – фокусное расстояние объектива;  $h$  – заглубление плоскости фокусировки.

Использование объектива с  $F = 50$  мм позволило прошить сверхглубокие отверстия наименьшего диаметра 15–36 мкм с коэффициентом формы до 150 в образцах из жаростойкой стали 09X18H10T5, супердюралюмина Д16 и твердосплава Т15К6. Оптимизация обработки при сканировании ПЛЗ и заглублении плоскости фокусировки до 1.5 мм дала возможность увеличить глубину прошиваемых отверстий до 10 мм при диаметре 150 мкм в образцах из труднообрабатываемого материала – алюминиевого сплава АМГ6.

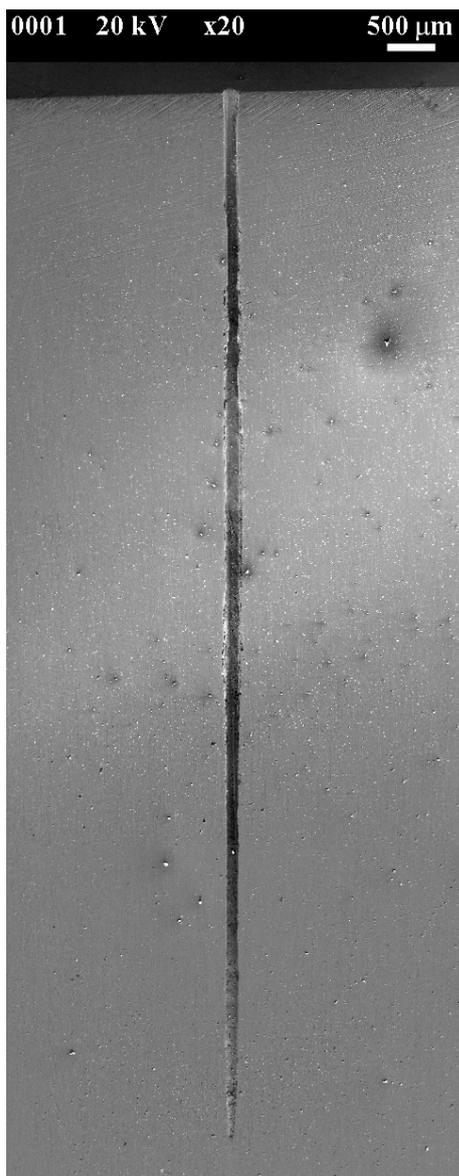


Рис.3. Фотография шлифа сверхглубокого отверстия.

При использовании объектива с  $F = 100$  мм и применении описанного метода сканирования ПЛЗ наиболее глубокие отверстия ( $H \sim 20$  мм) были получены в образцах из быстрорежущей и жаростойкой стали; их диаметр составлял 100–150 мкм. На рис.3 показана фотография шлифа глухого отверстия глубиной 12 мм с входным диаметром 100 мкм в образце из быстрорежущей стали P18. Отверстие получено при  $F = 100$  мм без

заглубления фокуса и при плавном перемещении ПЛЗ с уменьшающейся скоростью сканирования и изменением его начального пропуска от 70 % до 50 % в течение времени обработки, равного 1 мин. Видно, что данный метод прошивки позволяет не только увеличивать глубину и скорость обработки, но и устранять конусность глухого отверстия по всей его глубине, за исключением узкой (около 10 % всей глубины) концевой части. При обработке сквозных отверстий в большинстве материалов конусность отверстий устраняется практически полностью ( $K < 1:500$ ) вследствие «разбивки» выходного диаметра при выносе через него продуктов разрушения.

#### 4. Заключение

Таким образом, применение созданной одномодовой Nd:YAG-лазерной системы с петлевым резонатором, самообращением волнового фронта и пассивной модулирующей добротности сканируемым фототропным кристаллом  $\text{LiF:F}_2^-$  позволило реализовать высокоэффективную программируемую лазерную обработку микронных отверстий повышенной глубины с коэффициентом формы  $k > 100$ .

Заложенный в лазерную систему принцип управления генерацией при помощи ПЛЗ с переменным пропуском путем перемещения кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$  перпендикулярно оптической оси, в том числе с использованием персонального компьютера, существенно расширяет технологические возможности применения мощного одночастотного излучения, значительно увеличивает глубину и эффективность и улучшает качество лазерной прошивки отверстий малого диаметра.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05-08-33525 и 06-08-96504) и гранта Президента РФ (МК-5047.2006.8).

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. *Лазерная и электронолучевая обработка материалов* (М.: Машиностроение, 1985).
2. Рэди Дж. *Действие мощного лазерного излучения* (М.: Мир, 1974).
3. Сафонов А.Н. *Сварочное производство*, № 2, 22 (1997).
4. Fedin A.V., Gavrilov A.V., Basiev T.T., et al. *Laser Phys.*, **9**, 433 (1999).
5. Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В. и др. *Квантовая электроника*, **27**, 145 (1999).
6. Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **9**, 1909 (1999).
7. Basiev T.T., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Smetanin S.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3888**, 685 (2000).
8. Басиев Т.Т., Осико В.В., Прохоров А.М. и др. *Патент РФ № 2192341*, 2002.
9. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *ДАН*, **408**, 614 (2006).