

ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ОТВЕРСТИЙ С ПОМОЩЬЮ СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.И. Анякин, М. Наеби, В.С. Коваленко

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
НИИ лазерной техники и технологии, пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,
anyakin@ukr.net; v.kovalenko@kpi.ua*

Исследуется технологический процесс изготовления фасонных отверстий сфокусированным лазерным излучением во вращающихся заготовках. Установлено, что путем изменения угла наклона оси вращения заготовки и режимов лазерной обработки можно получить отверстия заданного поперечного сечения.

УДК 621.9.048

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности широко используются изделия из труднообрабатываемых материалов, таких как естественный и искусственный алмаз, кубический нитрид бора, и пр. Их уникальные износостойкость, жаростойкость делают данные материалы незаменимыми при производстве металлорежущего инструмента, различных фильер, сопел. Последние имеют отверстия сложного поперечного сечения (обычно содержат входной конус, калибрующую цилиндрическую часть и выходной конус [1–3]), формообразование которого невозможно без использования современных методов обработки. Малые размеры отверстий в фильерах и сложная форма затрудняют их изготовление (или делают его невозможным) путем спекания, механической, электроразрядной обработкой – из-за высоких механических свойств материала заготовки малых размеров и пр. Поэтому единственным способом изготовления данного изделия является лазерная обработка.

Первые исследования в лазерной технологии [3–5] установили:

- наличие зависимости между поперечным сечением обрабатываемого отверстия (для моно- и многоимпульсной обработки) и режимами облучения (энергии и длительности импульсов, фокусного расстояния фокусирующей оптики, ее расфокусировки и пр.);
- возможность управления размерами и формой поперечного сечения обрабатываемого отверстия путем изменения режимов лазерной обработки.

Следующим шагом создания отверстий, резов заданного сечения стала технология обработки заготовки «слой за слоем» [6]. Данная технология широко используется для обработки изделий из натуральных и естественных алмазов, твердых сплавов и пр. сфокусированным излучением лазеров с модулированной добротностью, работающих на разных гармониках. Для увеличения глубины резания и уменьшения ширины реза авторы [7] предлагают использовать дополнительный наклон заготовки относительно оси сфокусированного лазерного излучения.

По технологии снятия припуска «слой за слоем» ведется и обработка глубоких отверстий методом трепанации [8]. В этом случае сфокусированное лазерное излучение совершает возвратно-поступательное движение по спиралевидной траектории с заглублением фокальной плоскости в тело заготовки, что достигается с помощью дополнительного сканирования излучения [8] или (при обработке тел вращения) дополнительного (с одновременным вращением заготовки) ее перемещения в диаметральной плоскости [1, 2]. Так, при обработке фильер, сопел заготовка вращается с заданной скоростью, а сфокусированное лазерное излучение перемещается в диаметральной плоскости и осуществляет заглубление фокальной плоскости, удаляя материал заготовки слой за слоем [1, 2]. Естественно, при постоянных скоростях вращения, перемещения пятна фокусирования и частоты следования импульсов, по мере приближения оси лазерного излучения к оси вращения заготовки изменяется скорость обработки и соответственно увеличиваются коэффициент перекрытия пятен, плотность энергии излучения и толщина снимаемого слоя, что отмечено в работе [2]. В своих исследованиях авторы [1, 2] не касаются вопросов, связанных с формообразованием «обратных конусов» фильер, сопел, а также групп изделий из одной заготовки. Решению этой задачи и посвящена данная работа.

Рассмотрим процесс сверления отверстия во вращающейся заготовке. Данная технологическая схема обработки возможна при формообразовании отверстий в деталях небольших размеров и малой массы, когда нет необходимости применять специальные системы для балансировки привода.

При простой обработке отверстия (без дополнительных перемещений детали, фокусирующего узла) в случае наклона оси вращения возможно «мгновенное» формообразование «гиперболических» отверстий (рис. 1). В этом случае угол наклона асимптот гиперболы определяется углом наклона оси вращения к оси сфокусированного лазерного излучения g , а положение вершины – точкой пересечения оси лазерного излучения с осью вращения заготовки. При данной схеме обработки толщина h обрабатываемого изделия должна быть соизмерима с величиной рабочего отрезка фокусирующей оптики w_{zF} .

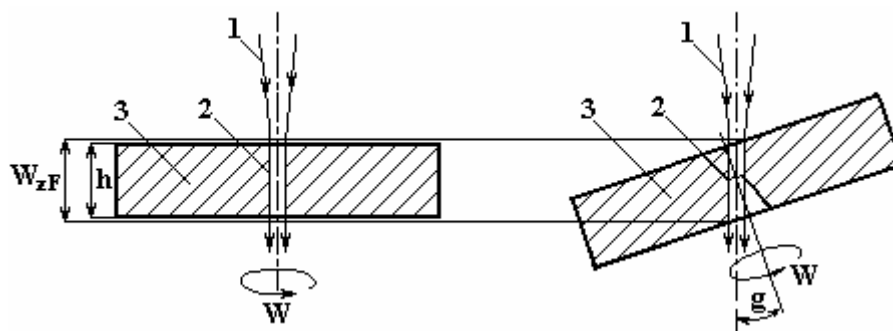


Рис. 1. Схемы сверления отверстий во вращающейся со скоростью w заготовке толщиной h : 1 – сфокусированный лазерный луч; 2 – полость отверстия; 3 – заготовка; g – угол наклона оси вращения

В случае, когда h значительно больше w_{zF} , процесс формообразования отверстий значительно усложняется. В качестве примера рассмотрим процесс изготовления миниатюрных сопел (эскиз приведен на рис. 2) из синтетического алмаза. Так как заготовки из синтетического алмаза имеют вид «таблеток» диаметром до 7 мм и высотой 5 мм, то из одной заготовки возможно изготовление нескольких готовых изделий.

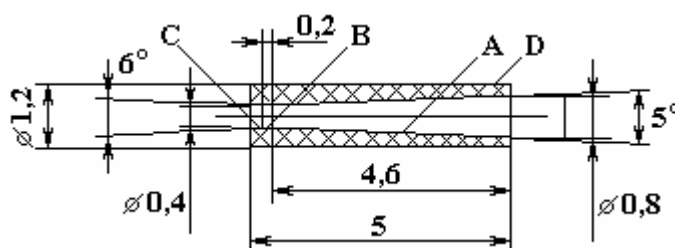


Рис. 2. Эскиз сопла

Из общей технологии машиностроения известно, что при изготовлении тел вращения резанием минимальная несоосность наружных и внутренних поверхностей будет в случае их изготовления с «одной установки», то есть при использовании одной технологической базы. Таким образом, в процессе изготовления сопла с одной установки необходимо обеспечить вырезание:

- заборного и выходного конусов (поверхность A , C , рис. 2),
- цилиндрической калибрующей части (поверхность B , рис. 2),
- цилиндрической наружной части (поверхность D , рис. 2).

Отметим, что в процессе формообразования сопел с помощью сфокусированного лазерного излучения и реализации технологии снятия припуска «слой за слоем» сохраняются рассмотренные ранее взаимные положения (рис. 1) осей вращения заготовки и сфокусированного лазерного излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 3) в составе лазера на алюмо – иттриевом гранате (АИГ) с модулированной добротностью и средней мощностью излучения в одно-

модовом режиме генерации до 20 Вт (длина волны излучения – 1,06 мкм). На пути луча, вышедшего из резонатора, установлен оптический блок, состоящий из 4-кратной телескопической системы, поворотного зеркала и сменных объективов (фокусные расстояния $F = 100$ мм и $F = 50$ мм). Объектив установлен в подвижной каретке, обеспечивающей его перемещение на величину ± 50 мм с шагом 5 мкм. Обрабатываемая заготовка приклеивалась к подложке и устанавливалась в патроне вращателя (с приводом от двигателя постоянного тока) с количеством оборотов до 3000 об/мин. Вращатель крепился в поворотном приспособлении, устанавливаемом на рабочем 2-координатном столе (точность перемещения – 5 мкм). Работой лазера, стола, приводом объектива и поворотным приспособлением управляла ПЭВМ.

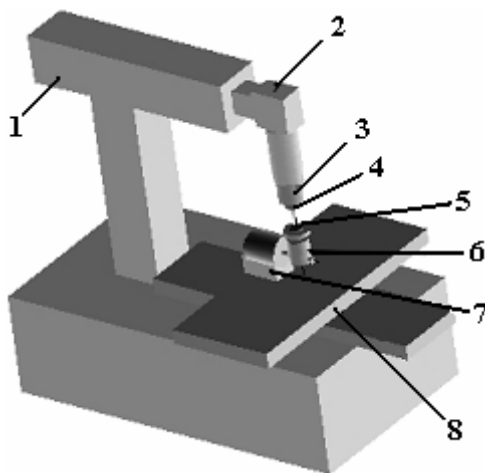


Рис. 3. Схема экспериментального стенда: 1 – лазер; 2 – оптический блок; 3 – подвижная каретка; 4 – объектив; 5 – деталь; 6 – вращатель; 7 – поворотное приспособление; 8 – рабочий стол

В качестве образцов использовались «таблетки» из синтетического алмаза и кубического нитрида бора (кибарита). В каждой экспериментальной точке проводилось по 3 опыта, причем из образцов из кибарита изготавливались поперечные шлифы. Измерения результатов обработки проводились на микроскопах ММИ-4, ПМТ-3, МИС-11 и профилографе – профилометре.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При формообразовании изделий с помощью сфокусированного лазерного излучения важную роль играет знание параметров каустической поверхности – условной поверхности, огибающей поток сфокусированного лазерного пучка. Известно, что каустическая поверхность сфокусированного одномодового лазерного излучения представляет собой гиперboloид вращения с перетяжкой, находящейся на определенном расстоянии от фокальной плоскости объектива. Поэтому для однозначного описания каустики необходимо знание диаметра лазерного пучка не менее чем в трех точках, лежащих на оси пучка, или в двух точках, одна из которых находится в перетяжке каустики (когда фактически задано уравнение касательной к огибающей пучок поверхности), и произвольной точке на его оси. Использование последнего случая весьма затруднительно из-за значительного уровня плотности мощности лазерного пучка в пятне фокусирования и соответственно потока излучения, попадающего на измерительный элемент. При проведении экспериментов диаметр каустической поверхности (на уровне $1/е^{х^2}$) определяли в заранее заданных точках на оси сфокусированного пучка методом сканирующей диафрагмы. В последующем измеренные значения аппроксимировали методом наименьших квадратов, используя в качестве уравнения связи между измеренными значениями и требуемой зависимостью уравнение гиперболы. На рис. 4 приведены измеренные значения диаметров сфокусированного лазерного излучения на различных расстояниях от главной плоскости фокусирующих объективов z_f (их расфокусировки DF), а также рассчитанные каустические поверхности (с их асимптотами), образованные объективами с различными фокусными расстояниями.

Анализируя полученные зависимости (приведены на рис. 4), отметим, что на данном оборудовании (используя простую 3-координатную обработку – перемещение детали по плоскости с постепенным заглублением фокальной плоскости фокусирующего объектива в ее тело) мы можем обрабатывать глубокие отверстия, пазы ирезы с углом конической части не менее $3,5^{\circ}$ ($\alpha_{F50}=3,5^{\circ}$ – угол наклона асимптот каустической поверхности, сформированной объективом с $F = 50$ мм) и $1,7^{\circ}$ ($\alpha_{F100}=1,7^{\circ}$ для объектива с фокусным расстоянием 100 мм).

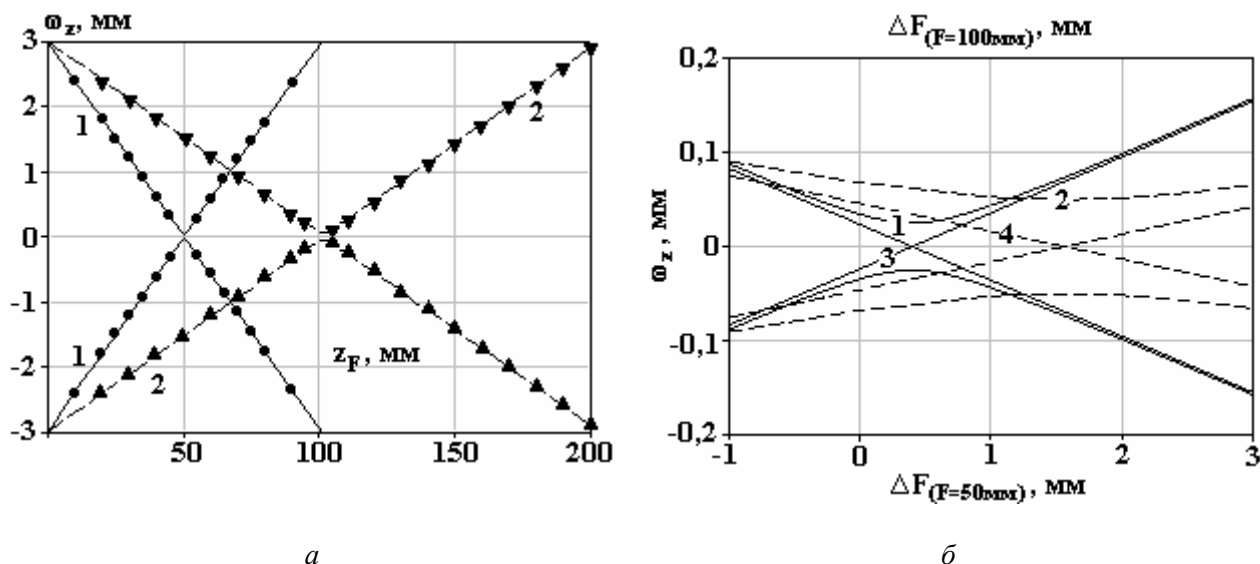


Рис. 4. Измеренные диаметры сфокусированного лазерного излучения (а) и рассчитанные перетяжки каустических поверхностей (б), сформированные объективами с разными фокусными расстояниями, где ● – измеренные значения диаметра каустической поверхности, образованной объективом с $F = 50$ мм; ▼ – измеренные значения диаметра каустической поверхности, образованной объективом с $F = 100$ мм; 1 – рассчитанная каустическая поверхность, образованная объективом с $F = 50$ мм; 2 – рассчитанная каустическая поверхность, образованная объективом с $F = 100$ мм; 3, 4 – асимптоты каустических поверхностей, образованные объективами с $F = 50$ мм и $F = 100$ мм соответственно

При размещении детали в фокальной плоскости объектива с $F = 50$ мм ($DF = 0$) с увеличением количества проходов эффективность удаления материала снижается (рис. 5), что связано не только с «экранизацией» периферии сфокусированного излучения стенками реза, но и с увеличением:

- размеров пятна фокусирования, из-за свойств каустической поверхности (рис. 4);
- площади, на которой фокусируется излучение (дно реза имеет «клиновидную» форму (рис. 6,а)). Последнее также определяет и угол наклона образующей обрабатываемого отверстия (паза, заглабления и пр.) из-за резкого увеличения размера пятна фокусирования (пятно круглого поперечного сечения превращается в эллипс), которое происходит при пересечении каустики с уже обработанной поверхностью.

Также, анализируя зависимости, приведенные на рис. 4, 5, отметим, что при фокусировании лазерного излучения объективом с фокусным расстоянием 100 мм (в случае, когда $DF = 0$) наблюдается почти пропорциональная зависимость глубины лазерного скрайбирования от количества проходов лазерного излучения по обрабатываемой поверхности (рис. 5,б). Это связано с более полой каустической поверхностью, длинной перетяжкой сфокусированного лазерного излучения (рис. 4) и менее «клинообразной» формы скрайба (рис. 6,б). Однако из-за низкой плотности мощности сфокусированного лазерного излучения производительность выполняемой операции (количество объема удаляемого материала) значительно ниже, чем при обработке с объективом с фокусным расстоянием 50 мм (рис. 5,а).

Таким образом, зная:

- уравнения каустических поверхностей (их асимптот) и уравнения, описывающие обрабатываемую деталь (для данной схемы обработки достаточно описать поверхность сопла набором прямых);
- зависимости глубины ширины скрайба от режимов обработки, можно определить закон перемещения рабочих органов при вырезании сопла по технологии снятия припуска «слой за слоем».

При этом естественными ограничениями является отсутствие касания (пересечения) асимптот каустики с обработанной поверхностью детали.

Исходя из последнего, отметим, что изготовление сопел (рис. 2) с помощью сфокусированного лазерного излучения объективом с $F = 50$ мм нецелесообразно, так как этап экранирования излучения начинается при вырезании нижней части цилиндрического отверстия (рис. 7,а). В этом случае угол поворота оси вращения заготовки достигает $3,5^0$ (то есть стенка обрабатываемой поверхности

параллельна ветви каустики). А при изготовлении обратного конуса (угол поворота $g = 6,5^{\circ}$) наружным участком сопла экранируется уже до 48% потока лазерного излучения (рис. 7,б).

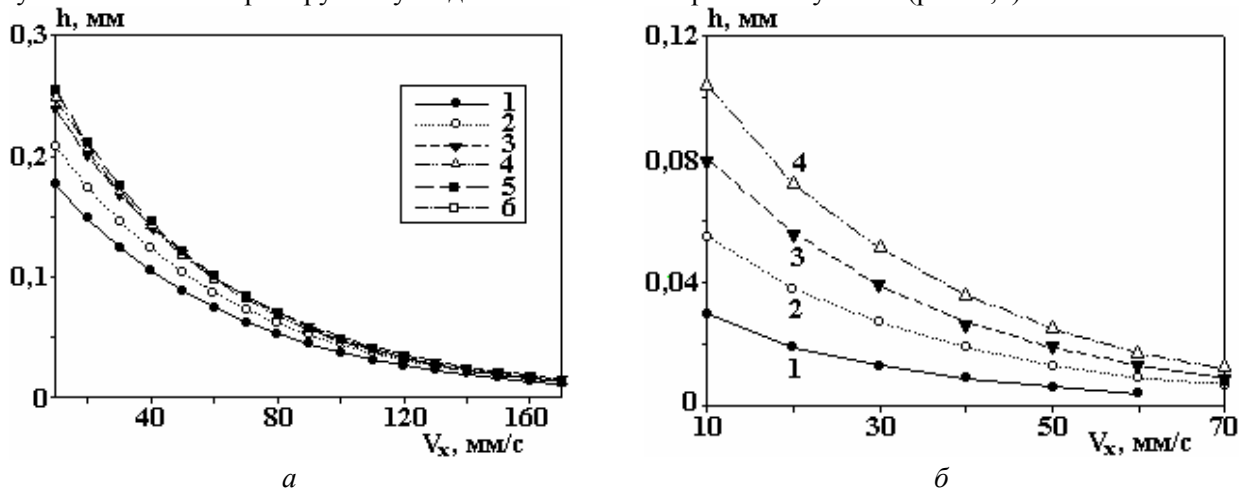


Рис. 5. Зависимость глубины одиночного скрайба от скорости перемещения, сфокусированного объективом с $F = 50$ мм (а) и $F = 100$ мм (б), лазерного излучения ($P = 18$ Вт, частота модуляции $n = 8$ кГц, $DF = 0$ мм) для разного количества проходов; 1, 2, 3, ..., 6 – количество проходов

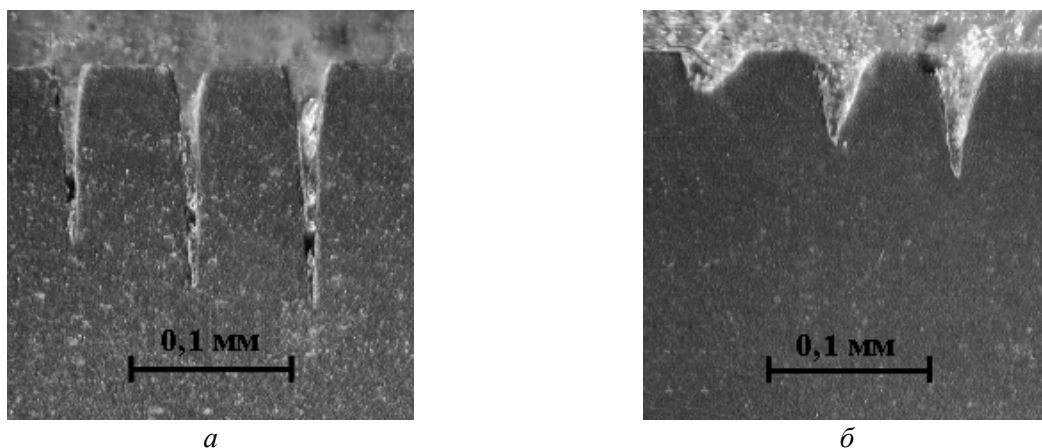


Рис. 6. Поперечное сечение одиночного скрайба в кубическом нитриде бора (кибарит) при обработке сфокусированным лазерным излучением ($P = 18$ Вт, частота модуляции $n = 8$ кГц, $DF = 0$ мм) с $F = 50$ мм (а) и $F = 100$ мм (б) для 1, 2 и 3 проходов сфокусированного излучения

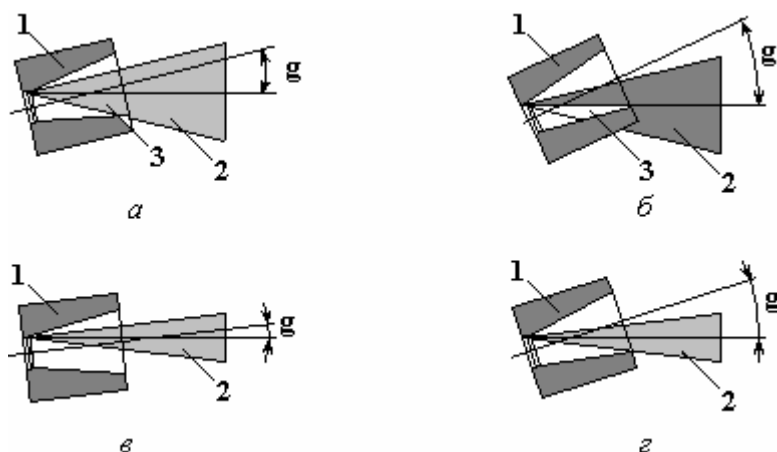


Рис. 7. Обработка цилиндрического участка (а, в) и обратного конуса (б, г) сопла лазерным излучением сфокусированным объективом с $F = 50$ мм (а, б) и $F = 100$ мм (в, г); 1 – заготовка; 2 – сфокусированное лазерное излучение; 3 – экранированный участок каустики

При фокусировании лазерного излучения объективом с $F = 100$ мм (благодаря более пологой каустике) появляется возможность изготовления данной детали «с одной установки» – внутренней и

наружной поверхности сопла (рис. 7, в, г), а из одной заготовки вырезать несколько сопел. Так, на рис. 8 приведено изображение сопла из синтетического алмаза.

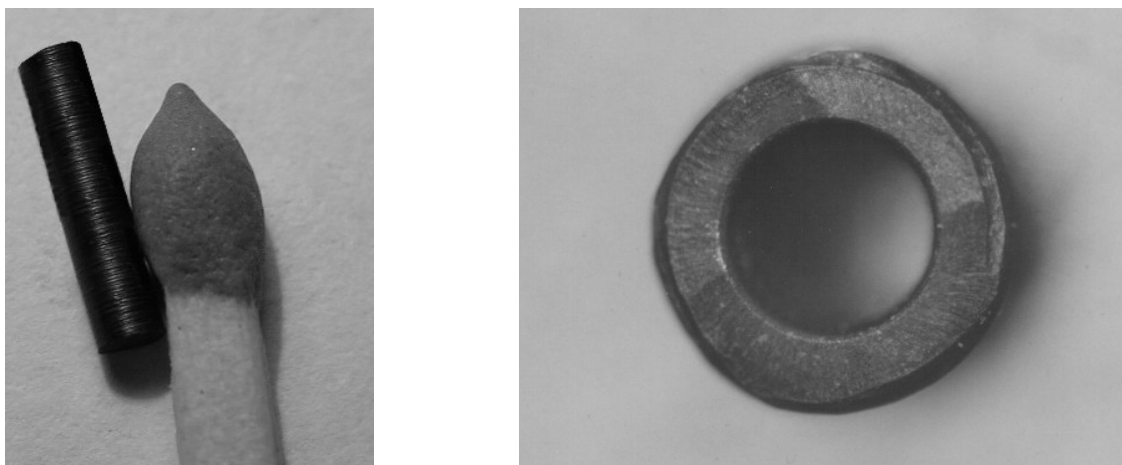


Рис. 8. Внешний вид специального сопла (цилиндр диаметром 1,2 мм и длиной 5 мм, диаметр проходного сечения – 0,4 мм, материал – синтетический алмаз), вырезанного из таблетки

ВЫВОДЫ

При изготовлении сопел сфокусированным лазерным излучением по технологии снятия припуска «слой за слоем» во вращающейся заготовке:

- управление углом наклона оси вращения заготовки позволяет создавать сопла заданного поперечного сечения, содержащие входной и выходной конусы и калибрующую цилиндрическую часть;
- целесообразно применять фокусирующую оптику, которая формирует каустическую поверхность с асимптотами, имеющими минимальные углы наклона.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Cao F.G., Zhang Q.J., Liu Y. A New Technology for Laser Drilling of Precise and Micro Diamond Drawing Dies. *Proceedings of The 15th International Symposium On Electromachining*, April 23–27, 2007, Pittsburgh, Pennsylvania. 2007. P. 405–408.
3. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Мелючев А.М. и др. *Лазерная технология*. М.: Институт «Электроника», 1970. 112 с.
4. Epperson J.P., Dyer R.W., Grziwa J.C. Laser System Cuts Cost of Drilling Diamond Dies. *Laser focus*, 1966, (10), 26–27.
5. Коваленко В.С. Размерная обработка материалов фотонным лучом. *Технология и организация производства*. 1967, (4), 101–104.
6. Lasers are Diamond's Best Friend. *Photonics Spectra*. 1992, **26**(6), 40.
7. Сытенко И.Н., Михин К.Е. Новый способ лазерной обработки алмазов и сверхтвердых материалов. *Proceedings of the VI international conference "Beam Technologies & Laser Application"*, Russia, Saint-Petersburg, September 23–35, 2009, pp. 365–370.
8. Коваленко В.С., Котляров В.П., Дятел В.П. и др. Справочник по технологии лазерной обработки. Под ред. В.С. Коваленко. Киев: Техника, 1978. 168 с.
9. Leong K. Drilling with Laser. *Industrial laser solutions for manufacturing*, 2000, **15**(9), 39–45.

Поступила 23.06.11

Summary

The technological process of fabrication of shaped holes in rotating blank parts by focused laser radiation is discussed in this paper. It was found that by changing the angle of component rotation axis and modes of laser processing one can obtain the holes of desired shape and transversal cross section.