

Лазерная обработка отверстий сложной формы – Хорошо усвоенные уроки в сочетании с будущими возможностями

Питер Томпсон, технический директор,
Марк Барри, вице президент по продажам и маркетингу
PRIMA POWER LASERDYNE (Чамплин, Миннесота, США)

Одна из «самых горячих» тем сегодня при изготовлении компонентов турбинного двигателя – выполнение охлаждающих отверстий сложной формы с использованием лазерных установок. Как сами изготовители авиадвигателей и наземных турбин, так и их субпоставщики проявляют большой интерес к существующим процессам и формам отверстий, получаемых при лазерной обработке. Они часто задают требуемое решение с ожидаемыми результатами. Но сегодня их запросы лимитированы техническими ограничениями, которые получены или на основе собственного опыта, или через другие источники в данном производстве.

Причины для такого интереса к получению отверстий сложной формы с использованием лазерной обработки просты: эти отверстия могут обеспечить лучшие характеристики охлаждения для компонентов турбинного двигателя. Конструкция охлаждаемых компонентов с использованием отверстий сложной формы приводит к уменьшению количества отверстий, и достижению лучшего результата. Меньшее количество отверстий означает более короткое время цикла производства, более низкие издержки производства, и более низкие требования к воздушному охлаждению компонентов двигателей. Выполненные должным образом отверстия приводят к повышению эффективности работы двигателя и снижению затрат. Значительный интерес к лазерной обработке обусловлен ее скоростью по отношению к конкурентным методам обработки, и возможностью получения отверстия на деталях с теплозащитным покрытием (ТВС) (Рис. 1, 2).

Использование отверстий сложной формы сегодня хорошо известно. Данные отверстия эффективно использовались в термонапряженных компонентах турбинного двигателя много лет. Некоторые изготовители компонентов двигателей используют электроэрозионные способы обработки (EDM),



Рис. 1



Рис. 3

чтобы сформировать эти отверстия. Другие используют лазерную обработку, для получения отверстий на определенных деталях. Определяющим фактором для того, чтобы предпочесть один процесс другому, как раньше, так и особенно сегодня - это сочетание стоимости и гибкости оборудования. Трудно не согласиться, что лазерная обработка – это не только более быстрый, но и более гибкий производственный процесс. Когда все составляющие процесса изучены, надо признать, что лазерная обработка экономически просто более выгодна (Рис. 3).

Определение на примерах условий, в каких случаях лазерная обработка быстрее и экономически выгоднее чем электроэрозионная

В сравнительной оценке обработки отверстия сложной формы, с использованием лазера и технологии EDM, важно определить и понять, что есть два основных параметра,



Рис. 2

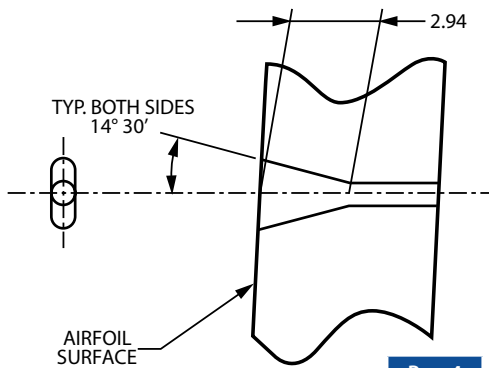


Рис. 4

описывающих все получаемые формы отверстий (EDM или лазером). Эти параметры – размеры цилиндрической части и диффузора (Рис. 4).

Диффузор – это часть охлаждающего отверстия, форма которого отличается от цилиндрической. Он находится на выходной стороне отверстия, передающего воздушный поток, и используется для распределения, или распыления пленки охлаждающего воздуха по поверхности детали. Критерии расчета диффузоров не рассматриваются в этой статье. Будет достаточным сказать, что за эти годы различные модели оборудования дали конструкторам возможность и инструменты, чтобы проявить свое творчество в создании форм и размещении отверстий на детали. Разрабатывая новую деталь с охлаждающими отверстиями, они применяют различные формы отверстия, различные углы, под которым отверстия сверлятся относительно поверхности и варианты размещения на компонентах детали. Большое разнообразие форм – это результат только этих двух факторов (Рис. 5).

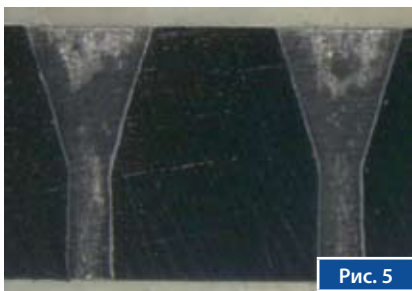


Рис. 5

AE 16
10:1 B

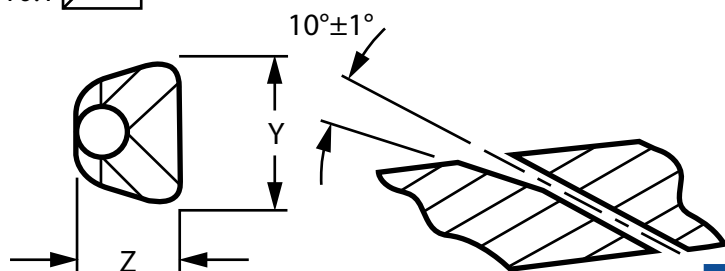


Рис. 6

Цилиндрическая часть отверстия сложной формы, может быть получена или ударным лазерным сверлением или лазерной трепанацией (Рис. 6). Диаметр отверстия, который может быть в пределах от 0.010 дюймов (0,25 мм) до 0.035 дюймов (0,89 мм) наиболее распространен в компонентах турбинных двигателей. Интересное преимущество при работах, выполненных системой LASERDYNE, состоит в том, что диаметр отверстия при измерении его по длине может меняться, как это замечено в следующих исследованиях.

• **Исследование 1:** В начале 1990-х у компании Pratt & Whitney (P&W) появилась проблема с охлаждающимися отверстиями. Эти отверстия были идеальны для лазерного сверления, но в процессе эксплуатации двигателя забивались и становились менее эффективными. В одном из отделений компании P&W группа инженеров под руководством Дейва Пипа начала разрабатывать двойной лазерный процесс сверления, для того чтобы увеличить диаметр отверстия на выходе потока. Увеличенное отверстие сверлили под тем же самым углом, как и основное отверстие охлаждения. В то время у этой разработки «форма диффузора» не была так тщательно проработана, как это выполняется сейчас, однако и тогда это оказалось экономически выгодно и очень эффективно. Детали помещались в установку лазерного сверления и обрабатывались за одну операцию. Результат был настолько успешен, что эта технология была внедрена в нескольких отделениях P&W, и, в итоге, Дейв Пип и Pratt & Whitney получили патент на эту технологию. Этот лазерный процесс продолжает использоваться и сегодня (Рис. 7 и 8)

• **Исследование 2:** в конце 1980-х, компания Vickers Precision в Великобритании получила разрешение от заказчика заменить в производстве обычный EDM лазерным сверлением для отверстий сложной формы, состо-



Рис. 7.

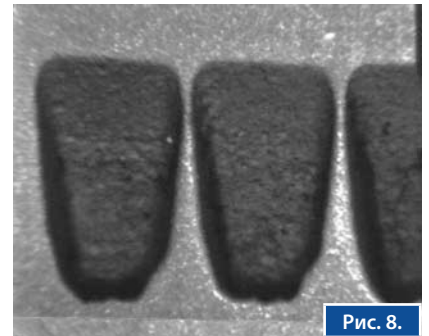


Рис. 8.

ящих из диффузора и цилиндрической части. Инженеры Vickers обратились в компанию LASERDYNE о помощи в реализации этого проекта. Для работы была выбрана система LASERDYNE 780 BeamDirector с обычным «настраиваемым лазерным резонатором» Nd:YAG. Свобода движения лазерной головки и легкость в программировании системы BeamDirector сыграли важную роль в успешной реализации этого проекта. В процессе использования всех возможностей лазерной системы этого типа, процесс получения отверстия был значительно развит, и показал снижение времени цикла уменьшение затрат и приемлемые параметры измененного слоя на стенке отверстия. В то время было только одно ограничение для процесса – он требовал «прохождения сквозного луча» через отверстие. Это – результат использования «настраиваемого» лазера Nd:YAG и «трепанирующего» движения для получения нужной формы. Хотя разнообразие форм отверстий было ограничено, этот процесс успешно применялся и сегодня все еще используется.

• **Исследование 3:** После успешного использования компанией Vickers Precision процесса обработки были сделаны попытки расширить разнообразие форм. Одним из результатов было развитие сложной формы типа «песочные часы». Эта технология обработки использовала принципы, разработанные для компании Vickers, но перемещала фокус лазера глубже в материал. Результатом этого было получение отверстия в форме песочных часов. В результате получалось отверстие



Рис. 9.



Рис. 11.

тие, форма которого на входе повторялась со стороны выхода луча. Длина и расположение цилиндрической части ограничены сочетанием характеристик (например: параметр M2 или качество лазерного луча, угол фокусировки луча, глубина сфокусированного пятна) лазерного луча. Но в то же время, возможно много вариантов выполнения самого отверстия, обусловленных углом сверления по отношению к поверхности и контура поверхности. В пределах определенных параметров возможно изменить соотношение формы песочных часов, перемещая фокус, создавая отверстия с большим потенциалом охлаждения. Однако у настраиваемого резонатора Nd:YAG, который чаще всего используется в процессе получения различных диаметров отверстий и типов форм, есть определенные ограничения. В то же время, данный процесс достаточно эффективен и не может быть повторен с помощью процесса EDM (Рис. 9).

Процесс EDM для получения отверстий сложных форм и его ограничения

Конструктора компонентов турбинных двигателей не хотят быть ограниченными методами обработки отверстия, обсужденными в примерах выше. Альтернатива, которую они чаще

всего выбирают, должна использовать обычный процесс EDM с электродом сложной формы. Электрод имеет небольшой цилиндрический участок и коническую часть. Эти электроды могут быть легко изготовлены из медной заготовки и поэтому достаточно дешевы. Электроды могут также быть объединены в «гребенку», которая состоит из нескольких электродов для изготовления нескольких отверстий в линии. Хотя этот процесс несколько дешевле, время цикла велико, и нет возможности изменить углы и расположения отверстий. Каждый электрод в гребенке требует тщательной регулировки по глубине для обеспечения требуемой формы каждого отверстия, и также чувствительны к повреждениям, которые могут приводить к неприемлемому браку.

Другая причина, которая может привести к отказу от технологии EDM, является использование теплозащитных покрытий (ТЗС) на деталях турбинных двигателей. Теплозащитные покрытия имеют большое разнообразие составов, большинство из которых не электропроводные. Электрическая проводимость – основное требование для технологии EDM. Для сравнения лазерное сверление деталей с теплозащитным покрытием – широко применяемый и успешный процесс (Рис. 10, 11).



Рис. 10.

Комбинация вышеупомянутых факторов плюс то, что технология EDM не обеспечивает гибкости и эффективности затрат, увеличила необходимость новых альтернативных технологий на основе лазера.

Новый подход: Два лазерных источника для получения отверстий сложной формы

При этом подходе первый лазерный источник эффективнее сверлит цилиндрическое отверстие. Особенности этого лазера – высокая энергия импульса (до 45 джоулей), частота 200 Гц (для «трепанации»), и высокая яркость (измеренная по качеству луча). Лазерное сверление цилиндрических отверстий, даже со старым, менее эффективным настраиваемым лазерным резонатором Nd:YAG, успешно продолжается, как хорошо понятный процесс получения эффективных форм охлаждающих отверстий в современных компонентах турбинных двигателей. Пример параметров лазерного сверления для этого процесса:



Рис. 12.

- линза с фокусным расстоянием 200 мм
- 1 мсек продолжительность импульса (также называемая 'длиной импульса');
- средняя мощность 180 Вт;
- Частота 12 Гц;
- Эти параметры типично определяют диаметр пятна в центре фокусировки 0,015 дюймов (0,38 мм) и пиковой плотности энергии $1,25 \times 10^7$ ватт на квадратный см.

Второй лазерный источник при этом подходе удаляет микрон толщины материала с каждым импульсом, создавая форму диффузора. Диффузор обычно обрабатывается с короткой длиной импульса (микросекунда или десятки наносекунд), с энергией ниже средней, и с высокой частотой (кГц). У этих лазеров есть возможность медленно удалять и теплозащитное покрытие и основной металл. Параметры, используемые для этого процесса, подобны тем которые применяются для процесса лазерной маркировки. Передача луча, в форме «galvo» с 2 осями и плоско-полевой фокусной линзой также была заимствована у маркировочного лазера. В то же время при существующем решении изготовления распылителя, дальнейший анализ показывает наличие существенных ограничений.

Первое ограничение – это то, что сверление цилиндрического отверстия – очень быстрый процесс – четыре лазерных импульса при частоте 12 Гц, например. С другой стороны, создание диффузора, с использованием маркировочного лазера позволяет удалять очень малые количества материала и по сравнению со сверлением отверстия, цикл изготовления диффузора намного медленнее.

Высокие капитальные затраты – другая проблема этого подхода. Для достижения желаемого результата требуется два или даже три станка (полный цикл производства). Также, требуется дополнительная площадь под оборудование, установка, утилиты программирования, крепеж детали, время загрузки и разгрузки – все эти важные составляющие стоимости должны рассматриваться, при этом подходе. При установке двух лазеров в одну систему время загрузки/разгрузки, которое рассматривалось в двух системах, может уменьшиться. Однако сложность данной системы увеличена, потому что значительная часть оборудования не работает в течение длинных периодов цикла обработки.

Наилучший Подход: Система Переменной Настройки Лазерного Резонатора

Другой подход к изготовлению отверстий сложной формы основан на понимании особенностей лазера для сверления цилиндрического отверстия и ставит вопрос, почему один и тот же лазер не может использоваться также для изготовления диффузора. Ответ в проекте лазерного источника, известном как "настраиваемый резонатор". Этот лазер использовался, начиная с первого применения лазеров промышленностью в 1970-х. Хотя он является эффективным для многих применений, есть некоторые ограничения. Большая проблема с этим лазером для изготовления отверстий была в том, что не было возможности эффективно изменять параметры лазера, которые требуются для сверления и другой обработки.

Эти проблемы были преодолены с лазером CL50k фирмы CONVERGENT LASERS, который совмещал высокочастотные лампы накачки, систему ICT (Обзор выемки) и VSM (Модуль Переменного Пятна). Этот лазер передает и высокую энергию с более длинным импульсом, требуемую для того, чтобы сверлить цилиндрическую часть отверстия и, более высокую частоту с более низкой энергией импульса, требуемой для обработки диффузора (Рис. 12).

Программирование Перемещений – Задача Лучше всего Решаемая Контроллерами с Двойными Процессорами

Другой проблемой лазерной обработки, для того чтобы успешно конкурировать с технологией EDM во всех аспектах изготовления отверстий является программирование требуемого перемещения. Исследуя имеющую форму диффузора при обработке на лазерной системе, легко видеть, что требуемое движение очень сложное. К счастью, в контроллерах станка сегодня часто используют двойные процессоры, которые являются высокопроизводительными, могут выполнять сложные вычисления и формировать машинный код.

С этими новыми контроллерами для инженера – программиста, легко рассчитать и закодировать отдельные участки перемещения. Эта возможность была доказана с помощью программ, такими как LASERDYNE CyIPerf. Эта программа позволяет инженеру описать сложный набор отверстий на цилиндрической детали в простейшей геометрии. Результат читается контроллером и преобразуется в реальном времени в требуемый машинный код. Тот же самый принцип теперь применяется к обработке отверстий с диффузором. Задача инженера – правильно описать диаметр и длину отверстия, тип и параметры диффузора на одном отверстии. Когда задача прочитана контроллером, вычисляются необходимые движения. Это позволяет получить бесконечное разнообразие отверстий сложных форм, которые теперь можно разместить в любой точке компонента турбинного двигателя, под углом к поверхности детали, которая зачастую и сама сложной формы.

Заключение – успешное использование лазерных систем для получения сложных отверстий было доказано раньше и сегодня, исходя из современных требований производства. Новые разработки в проекте лазерного сверления и программировании делают использование лазерных систем еще более привлекательным, и ставят задачи инженерам заниматься исследованиями и, даже, если необходимо повторно изучить этот процесс с учетом последних разработок.



Уважаемые читатели!

Предлагаем Вам подписаться
на «Комплект: ИТО»
на первое полугодие 2013 года

Подписаться можно в любом почтовом отделении

по объединенному каталогу

«ПРЕССА РОССИИ»

Цена на 6 месяцев – 2442 рублей!
(см. каталог <http://www.pressa-rf.ru/cat/1/indx/42049/>)

Цена на 12 месяцев – _____ рублей! (см. каталог)

индекс **42049**

Для оформления подписки в почтовом отделении можно вырезать и заполнить данную форму

Ф. СП-1		АБОНЕМЕНТ на газету 42049 <small>(индекс издания)</small> журнал									
«Комплект: ИТО»		Количество комплектов:									
на 2013 год по		месяц а м:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда		(почтовый индекс)		(адрес)							
Кому		(фамилия, инициалы)									
ПВ		место		ли-тер		ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА на газету 42049 <small>(индекс издания)</small> журнал					
«Комплект: ИТО»											
Стои-мость	подписки	руб.	коп.	Количество комплектов							
	переадресовки	руб.	коп.								
на 2013 год по		месяц а м									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда		(почтовый индекс)		(адрес)							
Кому		(фамилия, инициалы)									

ООО «Инструменты. Техно логия. Оборудование»
107023, РФ, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 49, оф. 334
Тел./факс: +7 (095) 366-98-00, 369-57-08
e-mail: exp@ito-baza.ru; www.ito-news.ru

