

Новые материалы и технологии

УДК 621.9.044

Технология лазерной абляции для подготовки сверления охлаждающих каналов лопаток турбин

Д.В. Мелюков, А.Г. Григорьянц

Предложена технология подготовки сверления охлаждающих отверстий лопаток турбин реактивных двигателей. Данная технология основана на удалении керамического слоя методом лазерной абляции с зон, предназначенных для сверления электрической эрозией. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают применимость такого подхода и позволяют произвести сверление как конечную операцию, получив, таким образом, требуемое качество отверстий.

Ключевые слова: лазерная абляция, термобарьерное керамическое покрытие, эффузионное охлаждение лопаток.

The paper deals with the technology of preparation for cooling holes drilling in turbine blades of jet engines. The technology is based on the removal of the ceramic layer by laser ablation from areas intended for the subsequent electrical erosion drilling. The conducted experimental tests confirm the applicability of this approach and allow to perform drilling as the final operation, thus having achieved the required quality of holes.

Keywords: laser ablation, thermal barrier ceramic coating, effusion cooling of blades.

Лопатки турбин реактивных двигателей, имеющие сквозные каналы-отверстия эффузионного охлаждения в стенках, позволяют достичь более высоких рабочих температур по сравнению с неохлаждаемыми лопатками, что повышает эффективность выгорания топлива и поднимает в целом коэффициент полезного действия (КПД) реактивного агрегата [1]. Диаметр таких каналов должен составлять 700...900 мкм,



МЕЛЮКОВ
Дмитрий Валерьевич
инженер



ГРИГОРЬЯНЦ
Александр Григорьевич
доктор технических наук,
профессор,
зав. кафедрой
«Лазерные технологии
в машиностроении»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

а стенки отверстия иметь низкую шероховатость поверхности, что накладывает соответствующие требования на способ их получения.

Среди существующих технологий сверления отверстий наиболее удовлетворяющей данным требованиям является технология электроэрозионной обработки (ЭЭО), однако ее применение возможно только на электропроводящих материалах [2]. В этом случае металлическая поверхность лопатки турбины, как правило, покрывается с помощью плазменного напыления термобарьерным керамическим слоем толщиной в несколько сотен микрометров, обладающим диэлектрическими свойствами. Поэтому применение ЭЭО после нанесения такого покрытия становится невозможным. В то же время, сверление металлической основы до нанесения покрытия не целесообразно из-за последующего попадания напыляемого материала в отверстия и, как следствие, ухудшение их аэродинамических свойств или полное закупоривание.

Для решения данной проблемы наиболее подходящим представляется нанесение керамического покрытия и последующее его удаление исключительно с зон, предназначенных под обработку ЭЭО, способом, не зависящим от электрических свойств материала. Соответственно, предварение ЭЭО подобным способом позволит выполнить ЭЭО как завершающую операцию и, таким образом, изготовить лопатку турбины одновременно с термобарьерным покрытием и требуемой точностью отверстий.

Одним из таких способов является лазерная абляция (ЛА), которая характеризуется высокой точностью, повторяемостью, возможностью автоматизации процесса и полностью бесконтактным характером обработки в атмосферных условиях. Лазерная абляция позволяет послойно удалять материалы с любыми электрическими, магнитными, оптическими, тепловыми, химическими и другими свойствами с шагом по глубине в несколько микрометров [3, 4]. Однако сверление отверстий на всю толщину стенки лопатки только с помощью лазера невыгодно с энергетической точки зрения, поскольку эффективность лазерной обработки

обратно пропорциональна коэффициенту отражения лазерного излучения, который, как правило, имеет очень низкие значения для металлов. Поэтому на этапе удаления керамического покрытия применение ЛА обусловлено невозможностью применения ЭЭО, а на этапе сверления металлической подложки ЭЭО предпочтительна благодаря более высокому КПД [5, 6].

Целью настоящей работы является исследование процесса удаления термобарьерного покрытия лопатки турбин с помощью ЛА до металлической основы.

Экспериментальная установка

Для осуществления ЛА использовались две установки. Первая с импульсным волоконным лазером IPG YPL-1/120/20 номинальной мощности излучения 20 Вт, длительность импульсов которого составляет 120 нс (по уровню 50% от максимума), и частота следования 20 кГц. Энергия импульса может варьироваться от 0,1 до 1,0 мДж. Качество излучения при этом составляет не хуже $M^2 = 1,5$. Перемещение сфокусированного луча диаметром 106 мкм (по уровню $1/e$ в фокусе) осуществлялось сканирующей гальванической системой SCANLAB SCANcube 10 (Германия). Сканирование луча реализовалось через компьютер с программным обеспечением, позволяющим задавать скорость и шаг сканирования, а также форму области сканирования и количество проходов.

Вторая установка с твердотельным лазером DPSSL-50S (Россия), накачиваемым лазерными диодами поперечно активному элементу. При близкой средней мощности к волоконным лазерам (15...18 Вт) этот лазер имеет в 2—4 раза меньшую частоту следования импульсов (5...10 кГц) и на 30...40% меньшую длительность импульса (<80 нс), что, в конечном счете, повышает пиковую мощность в несколько раз. Оптическая система аналогична первой установке, но с меньшим диаметром луча на поверхности — 50 мкм, что вместе с более высокой пиковой мощностью повышает плотность мощности в зоне обработки до одного порядка по сравнению с первой установкой.

Результаты исследований

В качестве материала основы лопатки использована жаропрочная сталь. Материал теплоизоляционного покрытия состоит из частично стабилизированного циркониевого наружного покрытия и связующего материала NiCrAlY, сохраняемого на основе никелевого суперсплава. Общий вид лопатки турбины приведен на рис. 1.

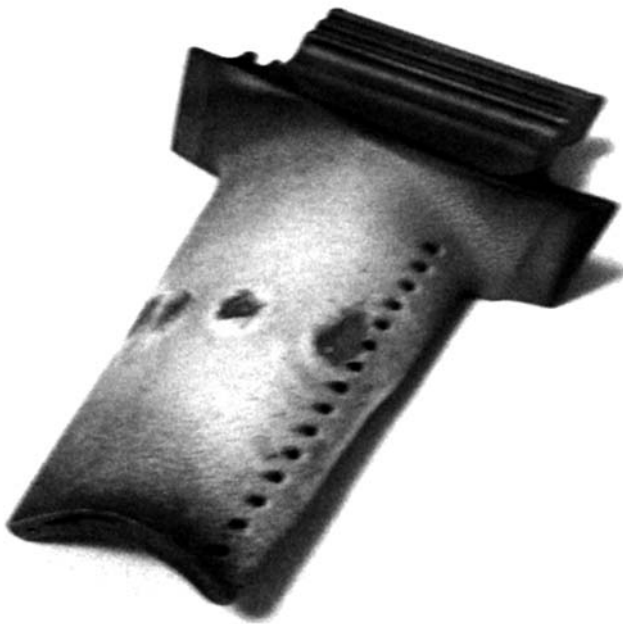


Рис. 1. Лопатка турбины с охлаждающими отверстиями

Для исследования процесса ЛА предварительно был изготовлен плоский образец с такой же композицией подложка-слой, что и у реальной лопатки. Толщина теплоизоляционного покрытия варьировалась от 40 до 400 мкм на разных концах образца.

Далее приведены результаты ЛА нескольких зон плоского образца в области максимальной толщины покрытия на лазере IPG с различным числом проходов. Размер каждой зоны 7×7 мм. Энергия импульса была выбрана максимальной (10 мДж), скорость сканирования 200 мм/с с шагом 50 мкм. Общий вид обработанных зон представлен на рис. 2.

Количество проходов составляет 10, 50, 100 для зон А, В, С соответственно. При малом количестве проходов не наблюдается визуальной модификации поверхности (зона А), однако

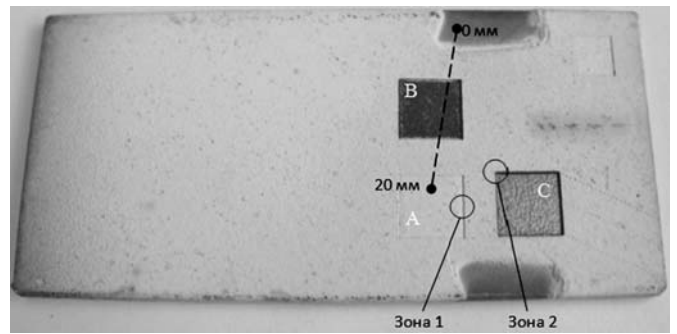


Рис. 2. Образец лопатки турбины с зонами абляции

при увеличении длительности лазерного воздействия оптические свойства существенно изменяются, что проявляется в повышении коэффициента поглощения зоны В.

Профиль поверхности, полученный с помощью механического профилометра вдоль линии, отмеченной пунктиром на рис. 2, представлен на рис. 3.

Как видно на рисунке общая толщина слоя, как и было отмечено выше, составляет 400 мкм, а в зонах абляции В и А — 100 и 300 мкм соответственно. При этом глубина ЛА не пропорциональна количеству проходов. Более того, с увеличением количества проходов от зоны В к зоне С (на рис. 3 не представлена), она практически не изменяется. Однако визуально зона С кажется очищенной и идентичной области без напыления в месте крепления образца.

Тот факт, что глубина абляции не изменяется после примерно 50 проходов, можно объяснить оптической прозрачностью керамического слоя для электромагнитного излучения 1 мкм. Когда толщины слоя хватает, чтобы поглотить достаточное количество лазерного излучения, наблюдается эффективная абляция. С умень-

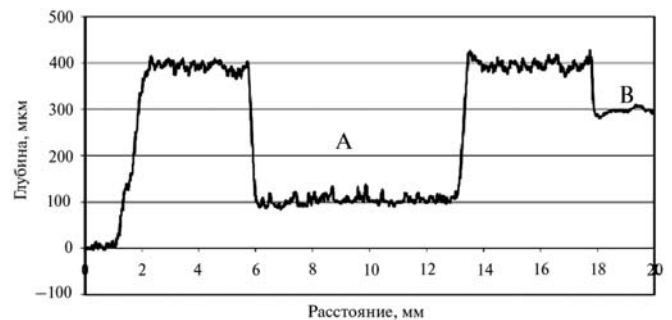


Рис. 3. Профиль поверхности зон ЛА А и В

шением толщины слоя все меньшая часть энергии лазерного импульса остается в слое. И в момент, когда толщина слоя становится совсем незначительной (зона С), прошедшее через слой лазерное излучение отражается от подложки и, вновь пересекая слой, выходит из зоны обработки. Лишь незначительная его часть задерживается слоем. Таким образом, можно сделать вывод, что энергетической мощности лазера IPG недостаточно для полного удаления теплоизоляционного покрытия.

Следует отметить, что для очистки слоя под сверление отверстий крайне важно оценить качество пограничного слоя между обработанной и необработанной зоной на предмет модификации, растрескиваний, поскольку планируемая область обработки порядка 1 мм² значительно меньше рассмотренных зон абляции.

Приведенные на рис. 4 снимки, сделанные с помощью оптического микроскопа, показывают пограничные участки зон обработки А и С. Несмотря на перекрытие лазерных импульсов в изображенных зонах, видно, что приграничный материал модифицирован незначительно.

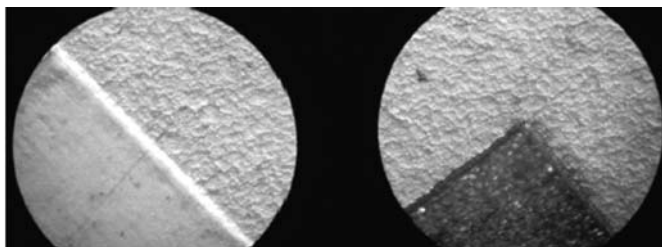


Рис. 4. Микроскопическое изображение пограничных зон ЛА А и С

Для повышения энергетической мощности ЛА был использован лазер DPSSL-50S. В режиме очистки скорость сканирования составляла 300 мм/с с шагом 30 мкм. После 200 проходов в таком режиме визуально глубина была гораздо больше, чем на всех предыдущих зонах. Внешний вид соответствующей зоны ЛА представлен на рис. 5 (отмечен буквой D). Как видно даже визуально зона D имеет хорошую отражающую способность.

Для проверки подготовки очищенной поверхности к ЭЭО были произведены замеры электрического сопротивления разных зон. Значения электрического сопротивления, по-

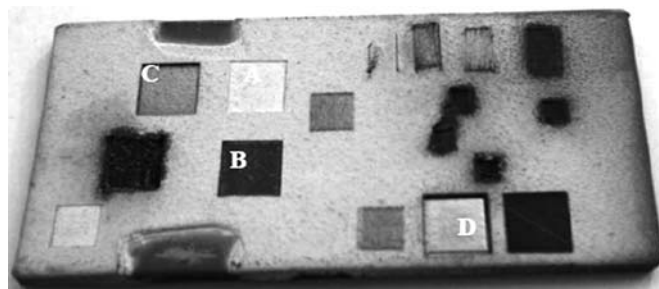


Рис. 5. Зона ЛА D, полученная лазером DPSSL-50S

лученные с помощью мультиметра, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Измерения электрического сопротивления зон абляции

Зона	Электрическое сопротивление, Ом	Толщина слоя, мкм
Покрытие	∞	400
A	∞	300
B	0,6	100
C	0,4	10
D	0,2	0
Реверс	0,2	0

Идентичные данные электрического сопротивления зоны D и обратной стороны образца (реверса) без покрытия свидетельствуют о том, что с помощью ЛА можно полностью удалить термобарьерный керамический слой и подготовить очищенную зону к ЭЭО.

Следующим этапом экспериментального исследования удаления рассматриваемого керамического покрытия является применение ЛА на реальной лопатке турбины, представленной на рис. 1. Для этого использовался только лазер DPSSL-50S, позволяющий, как было отмечено выше, получить достаточную плотность мощности для полной абляции керамики.

С целью имитации реального технологического процесса размер и форма зон обработки были выбраны соответственно предполагаемым охлаждающим отверстиям (см. рис. 1). В рассматриваемом случае это эллипс с осями, примерно равными 1,5 и 2,5 мм.

На рисунке 6 приведен внешний вид лопатки с обработанными участками.

Зоны 1–5 соответствуют разным режимам ЛА, зона 6 — без покрытия. При проведении

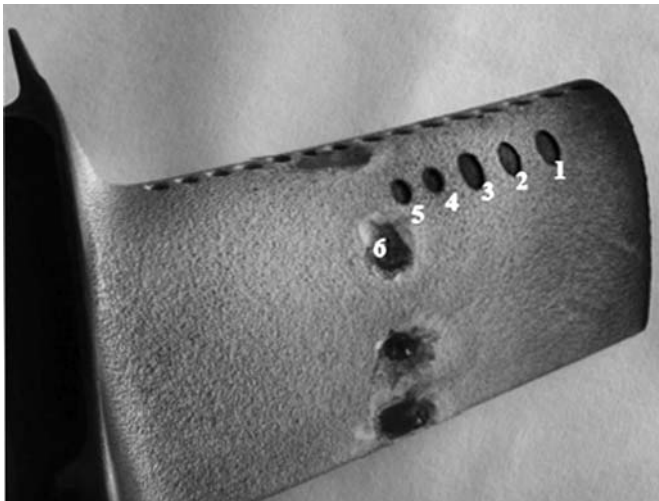


Рис. 6. Зоны (1—5) ЛА лопатки турбины реактивного двигателя

эксперимента в первую очередь варьировалась частота следования импульсов, а затем количество проходов. Качество очистки оценивалось по омметрическим данным, описанным выше. Режимы очистки и соответствующие им сопротивления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Электрическое сопротивление зон абляции лопатки турбины

Номер зоны	Электрическое сопротивление, Ом	Режим абляции		
		Частота, импульсов кГц	Скорость сканирования, мм/с	Количество проходов
1	0,33	5	100	40
2	∞	5	250	100
3	0,39	5	250	150
4	0,28	5	100	80
5	0,24	10	200	100
6	0,25	—	—	—

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют о том, что зоны 4—5 очищены полностью, поскольку имеют сопротивление, близкое к непокрытой зоне 6, а зоны 1—3 имеют некоторый остаточный слой. Исходя из этих данных, можно заключить, что оптимальный режим очист-

ки рассматриваемого керамического покрытия представлен для зоны 5 (10 кГц, 200 мм/с), что также можно наблюдать визуально.

Выводы

Представленное в данной работе решение технологической задачи изготовления эффузионных охлаждающих отверстий в лопатке турбины предполагает использование способа ЛА, предваряющего сверление ЭЭО. Такой подход позволяет получить отверстия требуемого качества с нанесенным термобарьерным покрытием на поверхности лопатки.

Экспериментальные результаты, подтвержденные независимыми измерениями, убедительно демонстрируют возможность применения ЛА для полного удаления керамического слоя на реальной детали. Определен состав необходимого оборудования и оптимальный режим для подготовки зон сверления отверстий.

Литература

1. Елисеев Ю.С. Перспективные технологии производства лопаток ГТД // Двигатель. 2001. № 5 (17). С. 4—8.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.Е. Байеупов, Ю.М. Барон и др.; под общ. ред. В.А. Валосатого. Л.: Машиностроение, 1988. 719 с.
3. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев; под ред. В.И. Конова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 312 с.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов Н.И., Мисуров А.И. Технологические процессы лазерной обработки; под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
5. Corcoran A., Sexton L., Seaman B., Ryan P., Byrne G. The laser drilling of multi-layer aerospace material systems // Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 123. N 1. P. 100—106.
6. Voisey K.T., Clyne T.W. Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings // Surface and Coatings Technology. 2003. Vol. 176. N 3. P. 296—306.

Статья поступила в редакцию 06.03.2012