

УДК 53.06

Метод лазерно-искровой спектроскопии в дефектоскопии лопаток турбореактивного двигателя гражданского воздушного судна

Д.В. Апексимов, А.В. Климкин, А.Н. Куряк, М.В. Тригуб*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 5.03.2022 г.

Представлены результаты модельных экспериментов по регистрации спектральных характеристик эмиссионного свечения остаточного количества вещества постороннего предмета после воздействия этого предмета на лопатку турбореактивного двигателя самолета. Измерения спектров осуществлялось методом лазерно-искровой спектроскопии, что позволило выделить эмиссионные линии этих веществ на фоне спектра материала лопатки. Такой подход может позволить оперативно провести диагностику лопаток на месте осмотра воздушного судна перед полетом и сделать выводы о возможном разрушении фюзеляжа и критичности повреждений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, лазерно-искровая спектроскопия, деформация конструкционных материалов; non-destructive testing, structural material deformation, laser induced breakdown spectroscopy, LIBS.

Введение

Авиационные газотурбинные двигатели в процессе эксплуатации подвержены повреждениям проточных частей. Характер типичных повреждений двигателей зависит от назначения и места эксплуатации воздушного судна [1]. В значительной мере определяют эксплуатационные характеристики двигателей элементы проточных частей компрессоров турбореактивных двухконтурных двигателей — рабочие лопатки [1, 2]. Среди основных причин повреждений лопаток выделяются усталость материала при опасных резонансных колебаниях и попадание посторонних предметов [1, 3]. Кроме естественных объектов в воздухе, таких как птицы или аэродроны, в двигатель могут попадать предметы, которые «не должны летать», например конструкционные элементы самого самолета (заклепки, крепежные элементы и прочее). Кроме того, посторонние предметы могут попасть в двигатель с взлетно-посадочной полосы, опасность также представляют куски льда, образовавшегося во входном устройстве и т.п.

Одна из задач специалистов при обнаружении следов воздействия на лопатку — определение типа объекта, вызвавшего деформацию. Ключевой момент здесь — проведение оперативной диагностики лопаток на месте осмотра воздушного судна перед полетом.

В таких условиях рационально применение технологий неразрушающего контроля, в число которых входит метод лазерно-искровой спектроскопии (LIBS — Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) [4–6]. Это современный метод, обеспечивающий высокоточный многоэлементный анализ химического состава пробы в режиме реального времени. Метод основан на возбуждении атомов материала импульсом лазерного излучения, сфокусированным на поверхность пробы, и регистрации спектра их излучения.

Цель настоящей работы — апробирование спектроскопического метода неразрушающего контроля для выявления компонентов, входящих в состав предметов, причинивших не критические повреждения лопаткам турбореактивных двигателей воздушных судов.

Эксперименты

Кроме непосредственно предмета, вызвавшего повреждение (далее — предмет), существует ряд внешних факторов, влияющих на чистоту и качество поверхности лопатки. Это пыль, окислы на поверхности, остаточное количество веществ, с которыми образцы контактировали ранее и др. При основных типах повреждений в месте контакта лопатки и предмета влияние внешних факторов незначительно. Поэтому в настоящей работе мы рассматриваем идеальную ситуацию, когда в месте повреждения на лопатке остался только тонкий слой вещества, из которого изготовлен предмет. Для отработки методики определения состава остатков вещества

* Дмитрий Владимирович Апексимов (areximov@iao.ru); Антон Владимирович Климкин (anton@iao.ru); Алексей Николаевич Куряк (kurjak@iao.ru); Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru).

на реальных лопатках, получивших повреждения, мы ограничились случаем, когда предмет изготовлен из сплава алюминия. В качестве модельных образцов использовались пластины из сплава алюминия Д16 и сплава титана ВТ1-0 [7]. Здесь и далее для обозначения материала мы будем использовать названия сплавов «алюминий» и «титан», а для химических элементов — «Al» и «Ti».

Для проведения экспериментов была разработана методика и создан экспериментальный стенд, обеспечивающий детектирование этих элементов в составе исследуемого объекта методом лазерно-исковой эмиссионной спектроскопии. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение лазера 1 фокусируется кварцевой линзой 2 с фокусным расстоянием 200 мм. Положение контрольного образца 3 выбиралось несколько ближе (~2 мм) фокуса линзы, чтобы исключить оптический пробой в воздухе и увеличить площадь взаимодействия излучения с образцом для получения устойчивого сигнала при минимальном разрушении его поверхности. Спектры эмиссионного свечения регистрировались спектрографом 6 при помощи оптоволокну 5, защищенного фильтром 4, которое располагалось на удалении в 10 мм от места взаимодействия лазерного излучения с образцом. Контроль над работой спектрографа, сбор данных с него и дальнейшая их обработка осуществлялись компьютером, синхронизованным с лазером.

В первую очередь были зарегистрированы калибровочные эмиссионные спектры сплавов алюминия и титана (рис. 2). Спектры возбуждались третьей гармоникой Nd:YAG-лазера (несущая длина волны 355 нм) в моноимпульсном и частотно-импульсном режимах с энергией до 2,5 мДж в импульсе.

На основе снятых спектров для работы были выбраны два диапазона длин волн, соответствующих размеру матрицы CCD-камеры спектрографа:

300 ÷ 320 и 385 ÷ 407 нм. В этих областях находятся потенциально информативные чувствительные линии как Al, так и Ti [8–10], а также присутствуют хорошо определяемые линии железа (Fe), из сплавов которого изготавливаются многие предметы, используемые в конструкции авиалайнера и при его обслуживании и потенциально способные быть источником повреждения лопатки.

Для моделирования повреждения титановой лопатки алюминиевым предметом на титановую пластину был нанесен слой алюминия. Из рис. 2 видно, что в спектре титана с этим слоем остаточного алюминия (кривая 3) присутствуют эмиссионные линии Al и Ti. Здесь появляется сложность с выделением одного сплава на фоне другого спектроскопическими методами, так как модельные образцы содержат набор одинаковых химических элементов с близким процентным содержанием [7] (таблица). Следовательно, при детектировании алюминия на титане в их эмиссионных спектрах могут выделяться линии одних и тех же веществ. Чтобы преодолеть эту сложность, информативный спектр представлен как результат отношения спектра остаточного алюминия на титане к спектру титана (рис. 3). Для сравнения графиков с разной абсолютной интенсивностью все измеренные спектры нормировались на максимум для каждой реализации. На графике хорошо определяются четыре характерных самообращенных линии Al. Спектр на рис. 3 соответствует однократному лазерному воздействию. После третьего импульса линии Al в спектре не определяются.

Апробирование метода осуществлялось на двух фрагментах лопаток первой ступени компрессора низкого давления (LPC) турбореактивного двигателя с характерными повреждениями типа «забоины» (рис. 4, а) и «вмятины» (рис. 4, б), полученными во время эксплуатации самолета. Причины и клас-

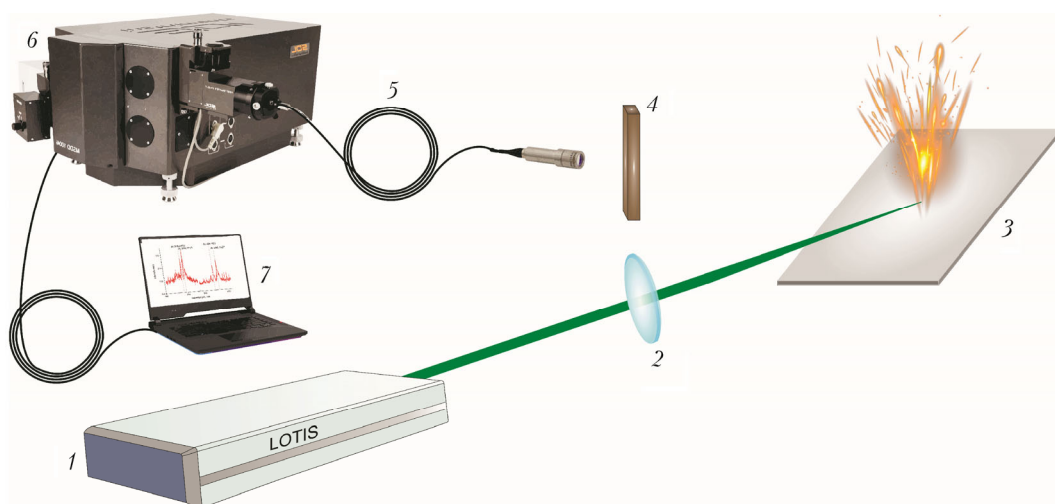


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — Nd:YAG-лазер Lotis TII LS2134UTF (несущая длина волны — 355 нм, длительность импульса — 50 нс, частота повторения импульсов — 10 Гц, энергия в импульсе — до 2,5 мДж, диаметр пучка $d_0 = 5$ мм); 2 — фокусирующая линза диаметром 40 мм с фокусом 200 мм; 3 — контрольный образец; 4 — фильтр Edmund Optics 67-115; 5 — оптоволоконно; 6 — спектрограф, состоящий из монохроматора MSDD 1000 и CCD-камеры Andor DV420A-OE Solis S; 7 — компьютер (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

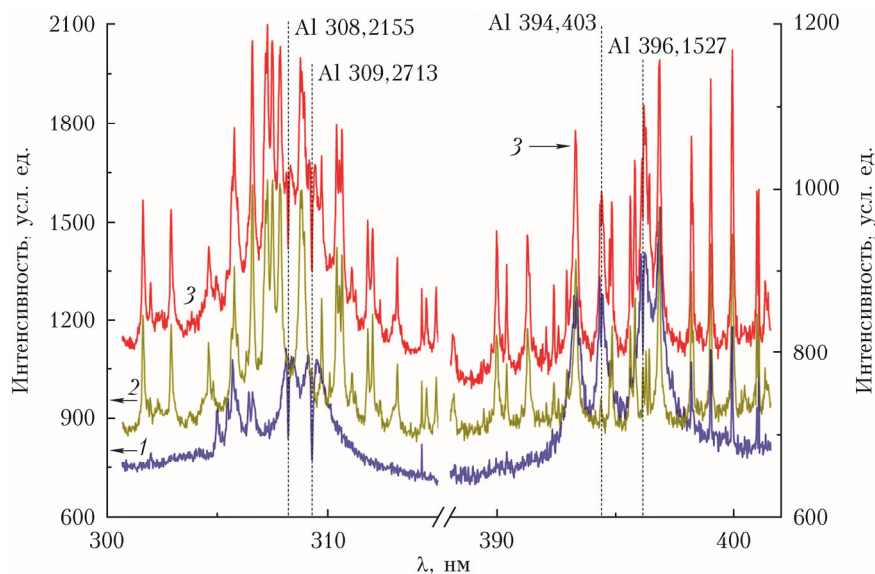


Рис. 2. Эмиссионные спектры алюминия (1) и титана (2) и алюминия на титане (3) (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

сификация повреждений рабочих лопаток подробно описаны в [11, 12]. Марка двигателя не указывается, так как лопатки на всех двигателях, применяемых

в авиационном двигателе, состоят из схожих по химическому составу сплавов металлов [2].

Специфика метода неразрушающего контроля для выявления химических элементов, входящих в состав предметов, причинивших не критические повреждения, связана с бесконтактным детектированием остаточного количества вещества этого предмета на поврежденной лопатке. Так, при значительных повреждениях типа «забоина» (рис. 4, а) или «разрыв» [11, 12] вероятность оставления следа (остаточного количества вещества) постороннего предмета на лопатке выше, чем при повреждениях типа «вмятина» (рис. 4, б) или при воздействии постороннего предмета на лопатку по касательной. При значительных повреждениях типа «забоина» или «разрыв» происходит разрыв или задиры лопатки с взаимным частичным разрушением лопатки и ударившего предмета.

На концентрацию остаточного количества вещества влияют различные факторы: скорость, масса и направление падения постороннего предмета на лопатку, скорость вращения лопатки и ее геометрия [11, 12]. Мы исследуем конкретный тип реальных повреждений, не вдаваясь в подробности их образования.

Для обеспечения гарантированного детектирования остаточного количества вещества, особенно в случаях повреждений типа «вмятина», необходимо определить пороговые уровни энергии и количества импульсов воздействующего излучения. С этой целью были проведены эксперименты с использованием части лопатки без повреждений. На рис. 5 видно, как реагирует поверхность лопатки на число импульсов воздействия — чем дольше воздействие (больше импульсов), тем большая область поверхности и приповерхностного слоя лопатки подвержена температурному воздействию плазменного канала. Это приводит к излишнему «вымыванию» вещества и большей эрозии, а также к увеличению помех от взаимодействия излучения с веществом вне зоны удара.

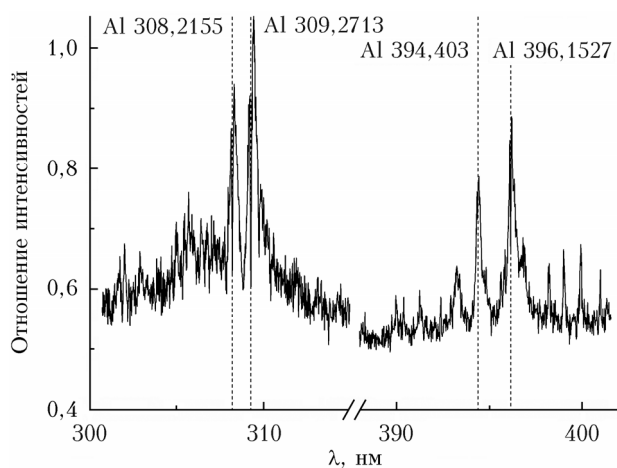


Рис. 3. Информативный спектр алюминия на титане

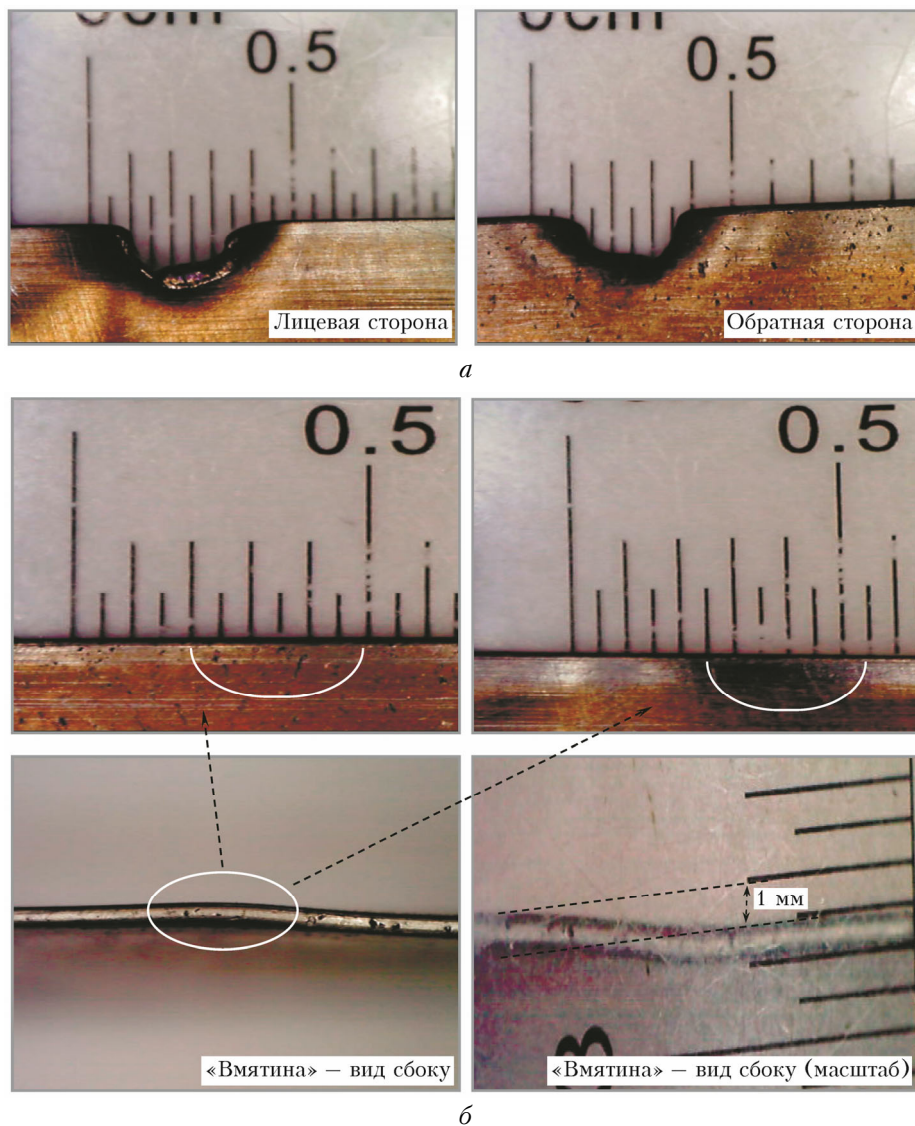


Рис. 4. Характерные повреждения лопаток: *а* — «забоина» (образец 1); *б* — «вмятина» (образец 2) (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

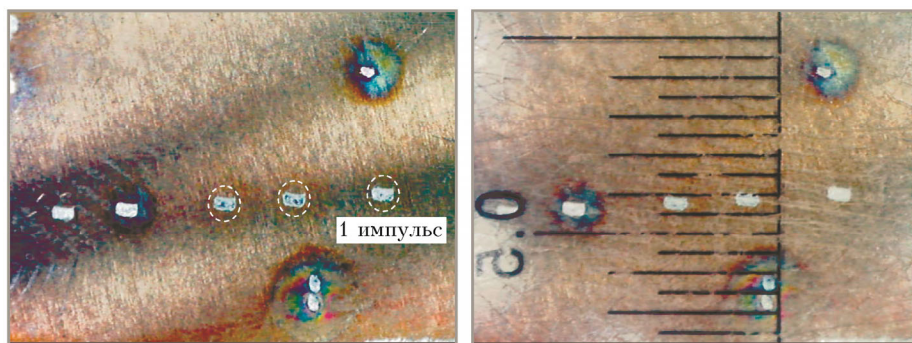


Рис. 5. Лазерное воздействие на лопатку без ее повреждений (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

В результате измерений установлены необходимые требования к параметрам воздействующего излучения на поверхность образца, а также определена вероятность детектирования остаточного количества вещества (рис. 6) в любой точке поверхности. Ве-

роятность детектирования определялась как отношение общего числа лазерных импульсов к числу импульсов, при которых удалось детектировать сигнал от остаточного количества вещества на поверхности образца. Здесь представлена зависимость только

Алексимов Д.В., Клишкин А.В., Курык А.Н., Тригуб М.В.

для повреждений типа «вмятина», т.е. с небольшой концентрацией остаточного вещества на поверхности лопатки. Так как это наихудшие условия для детектирования, то, следовательно, для других типов повреждений достаточным условием будет один импульс с энергией 2 мДж.

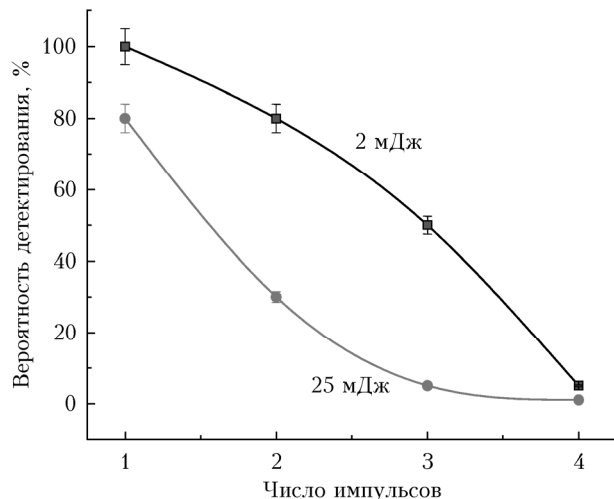


Рис. 6. Зависимость вероятности детектирования от числа воздействующих импульсов с различной энергией

Методика апробировалась непосредственно в областях повреждений лопаток. Расположение этих областей и точек воздействия лазерным импульсом показано на рис. 7.

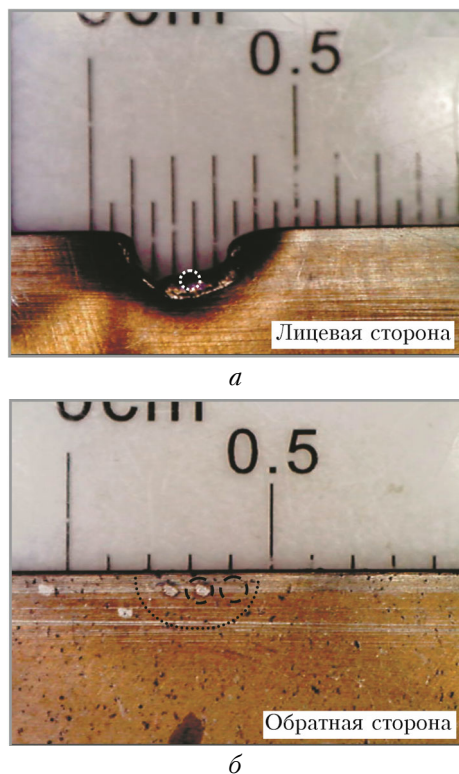


Рис. 7. Результат воздействия одного лазерного импульса на фрагменты лопаток с повреждениями: а – «забоина»; б – «вмятина» (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

Как отмечалось выше, при моделировании после третьего лазерного импульса спектр остаточного вещества на поверхности образца не определялся. Исходя из этого в качестве спектра материала, из которого изготовлена лопатка, был взят эмиссионный спектр, полученный после десятого лазерного импульса в точке около края фрагмента. Для каждого образца был снят свой спектр материала. Как и ранее, для сравнения графиков с разной абсолютной интенсивностью все измеренные спектры нормировались на максимум для каждой реализации.

Первый образец – с повреждением типа «забоина» (рис. 7, а). С целью приведения всех спектральных графиков к единой шкале в качестве первичной обработки спектров проводилось нормирование графика на максимум. Измерения проводились от края фрагмента до зоны повреждения с шагом 4 мм, в зоне повреждения – с шагом 1 мм. В каждой точке записывались спектры от первого и второго лазерного импульса. В спектре от первого импульса в трех точках в зоне повреждения присутствуют две линии, которых нет в спектре от первого импульса на неповрежденном участке.

На рис. 8 показаны участки спектров в области этих линий в пяти точках и спектр материала. В точках вне поврежденного участка линии отсутствуют (кривые 1 и 2). Интенсивность линий оказалась наибольшей (кривая 3) в левом краю повреждения (рис. 7, а) и спадает к правому краю (кривые 4, 5).

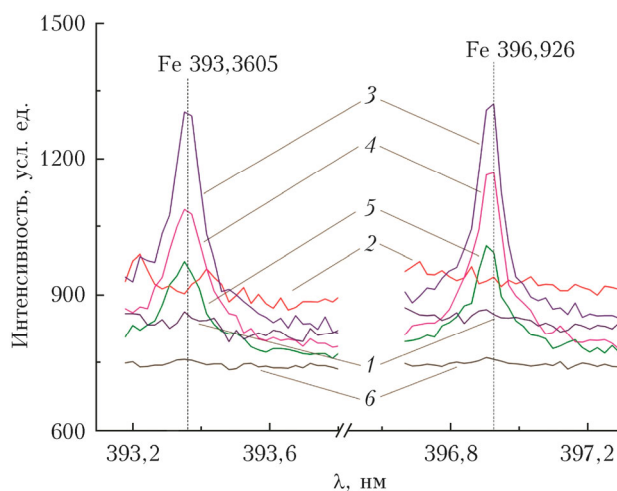


Рис. 8. Эмиссионный спектр на участках характерных линий: кривая 1 – в точке на 8 мм левее повреждения; 2 – на 4 мм левее повреждения; 3–5 – в зоне повреждения слева направо через 1 мм; 6 – спектр материала образца (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

На рис. 9 приведены отношения спектров от первого лазерного импульса на неповрежденном участке и в левом краю зоны повреждения к спектру образца. Рис. 9, а соответствует кривой 1 на рис. 8, рис. 9, б – кривой 3. Эти линии хорошо согласуются со справочными данными для линий Fe. Слабый пик на 404,5815 нм также можно интерпретировать как линию Fe. Такое согласие позволяет

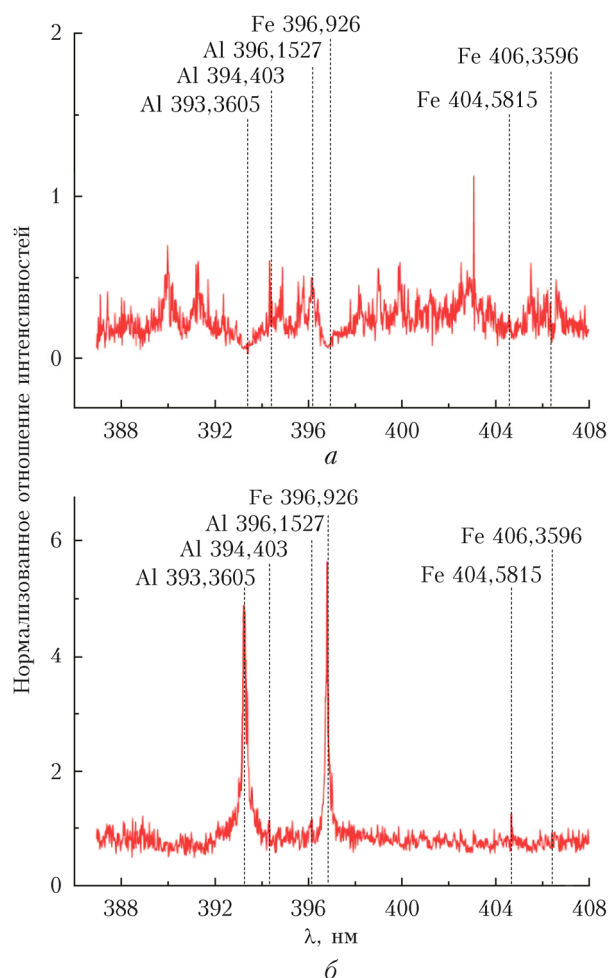


Рис. 9. Отношение спектра от первого лазерного импульса на неповрежденном участке (а) и в левом краю зоны повреждения (б) к спектру образца

сделать вывод, что остаток вещества постороннего предмета, нанесшего повреждение лопатке, содержит в большом количестве Fe, что нехарактерно для материала, из которого изготовлена лопатка. Отсутствуют линии Al, характерные для дюралевых сплавов. Таким образом, с большой долей вероятности можно предположить, что этот предмет изготовлен из стали.

Второй образец – с повреждением типа «вмятина» (рис. 7, б). Выбор точек снятия спектра аналогичен предыдущему образцу. В зоне повреждения присутствуют те же две сильные линии (рис. 10). Интенсивность линий максимальна в центре «вмятины» (кривая 4, рис. 10) и спадает к краям (кривые 3 и 5, рис. 10). На рис. 11 приведены отношения спектров от первого лазерного импульса на неповрежденном участке и в центре повреждения к спектрам образца в двух точках. Рис. 11, а соответствует кривой 1 на рис. 10, рис. 11, б – кривой 4. Все четыре линии на рис. 11, б хорошо согласуются со справочными данными для линий Fe, т.е. с большой вероятностью можно предположить, что и это повреждение вызвано стальным предметом.

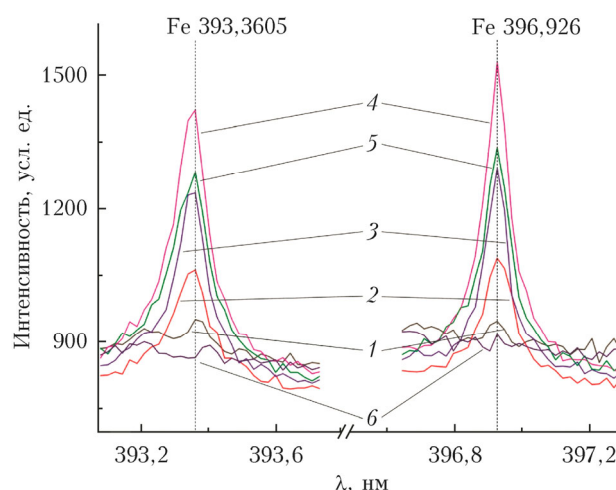


Рис. 10. Эмиссионный спектр на участках характерных линий: кривая 1 – в точке на 6 мм левее повреждения; 2 – на 2 мм левее повреждения; 3–5 – в зоне повреждения слева направо через 1 мм; 6 – спектр материала образца (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

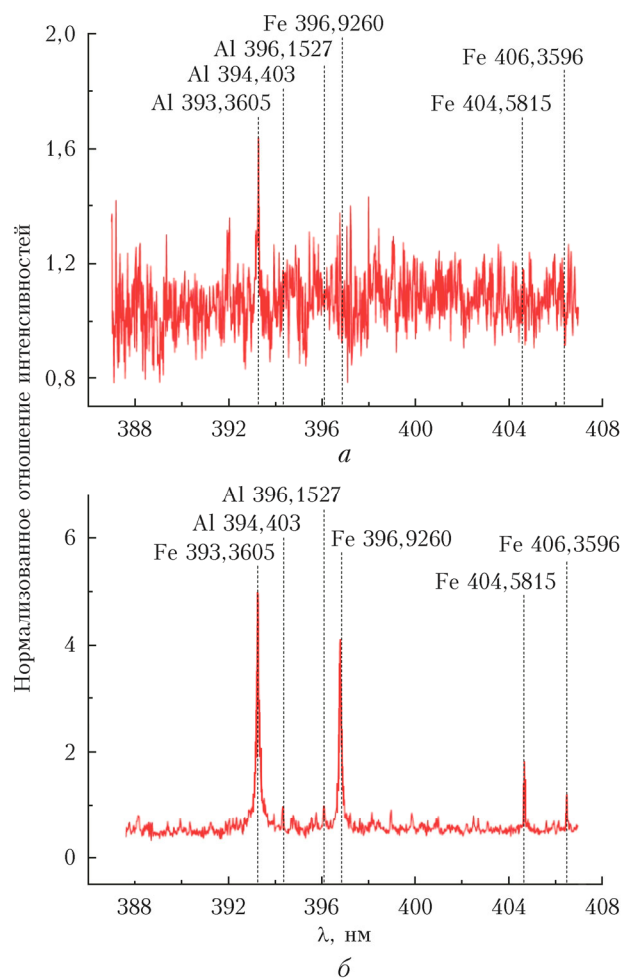


Рис. 11. Отношение спектра от первого лазерного импульса на неповрежденном участке (а) и в центре повреждения (б) к спектру образца

Заключение

Проведенные эксперименты показали возможность применения метода лазерно-искровой спектроскопии для того, чтобы детектировать остаточное количество вещества, оставшегося после воздействия постороннего предмета на лопатку турбореактивного двигателя гражданского воздушного судна, и сделать предположение о природе воздействующего объекта. Установлена зависимость вероятности детектирования от числа воздействующих импульсов для различных энергий в импульсе. Определены необходимые и достаточные условия для регистрации остаточного количества вещества на лопатках, даже при малых его концентрациях. Установлено, что для гарантированного детектирования вещества, из которого состоит посторонний предмет, достаточно воздействия на область повреждения одним лазерным импульсом с энергией 2 мДж.

Специфика апробированной методики — использование спектроскопического метода неразрушающего контроля, т.е. после оперативного «осмотра» лопаток гражданское воздушное судно может оставаться в эксплуатации. В случае некритичного воздействия повреждаются первые два ряда лопаток, поэтому созданная аппаратура позволит проводить такой осмотр без демонтажа и разбора двигателя.

1. URL: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/views/index.php> (last access: 17.02.2021).
2. Сибкин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А., Фокин Ю.В., Егоров И.В., Бакалеев В.П., Семенов В.Л., Копченев В.И. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний

по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор). М.: ЦИАМ, 2004. 424 с.

3. Chichkov B.A., Zaiats M.A. Statistical analysis of damageability of the bypass engines compressor blades // Civil Aviation High Technol. 2018. V. 21, N 1 P. 174–184. (in Russ.). URL: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-1-174-184>.
4. Laser induced plasma and application / L.J. Radziemski, D.A. Cremers (eds.). New York: Marcel Dekker, 1989. 440 p.
5. Laser-induced breakdown spectroscopy elemental analysis. Encyclopedia of Analytical Chemistry / R.A. Meyers (ed.). New York: Wiley, 2000. 2188 p.
6. Букин О.А., Голык С.С., Ильин А.А., Кульчин Ю.Н., Соколова Е.Б., Бауло Е.Н. Лазерная искровая спектроскопия жидких сред с возбуждением импульсами фемтосекундной длительности // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 3. С. 296–300; Bukin O.A., Golik S.S., Il'in A.A., Kul'chin Yu.N., Sokolova E.B., Baulo E.N. Laser-induced breakdown in liquid medium // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 2. P. 209–213.
7. URL: <http://www.splav-kharkov.com/> (last access: 17.02.2021).
8. Meggers W.F., Corliss C.H., Scribner B.F. Tables of Spectral-Line Intensities. US, 1975. 403 p.
9. URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html (last access: 17.02.2021).
10. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Славный В.А., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1977. 800 с.
11. Комов А.А., Белоусов Г.Г. Основные закономерности повреждения лопаток компрессоров авиационных ГТД посторонними предметами. М.: Науч. вестн. МГТУ ГА, 2008. № 134. С. 25–34.
12. Новиков А.С., Пайкин А.Г., Сиротин Н.Н. Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей. М.: Наука, 2007. 469 с.

D.V. Apeximov, A.V. Klimkin, A.N. Kurjak, M.V. Trigub. Non-destructive testing of civil aircraft turbojet engine blades with LIBS.

We present the results of model experiments on recording the spectral characteristics of the emission glow of residual amounts of a substance on a blade of an aircraft turbojet engine after the mechanical impact of a foreign object. The spectra were measured by laser-spark spectroscopy, which made it possible to distinguish the emission lines of this substance against the spectrum of the blade material. This non-destructive testing method makes it possible to quickly diagnose the blades at the site of the aircraft inspection before a flight and to draw conclusions about possible destruction of the fuselage and the danger of the damage.