

Исследования по формированию объединенного температурного поля поверхности и его расшифровке по изображениям термоиндикаторных покрытий, полученных с помощью видеозндоскопа IPLEX FX для определения температурных полей в труднодоступных местах элементов авиационных двигателей

А.А. Кобцева^{1,2}, М.Р. Мирная², А.С. Сорожкин², К.А. Иванов²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

² ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»

Создание и доводка двигателей требует измерения высокотемпературных полей на поверхностях элементов ГТД, которое можно успешно осуществлять с помощью многопереходных термокрасок, которые имеют несколько цветовых переходов в широком интервале температур.

К цветовым термоиндикаторам относятся вещества или устройства, обладающие способностью резко изменять свой цвет при определенной температуре, называемой критической или температурой перехода. Термокраска представляет собой суспензию термочувствительных соединений, наполнителей, связующих и растворителей, которая после нанесения на любую твердую поверхность затвердевает при высыхании в виде тонкого слоя и изменяет свой цвет при температуре перехода, что позволяет использовать всю поверхность как температурный датчик и измерять температуру в неограниченном числе точек и, что даёт возможность построить изотермы температурных полей.

Термоиндикаторы почти не влияют на количество излучаемого поверхностью тепла и на распределение температуры по исследуемому изделию, следовательно, получаемая при исследовании наглядная информация о распределении температур по поверхности не содержит искажений, связанных с установкой температурных датчиков. Термокраски позволяют измерять температуру поверхностей любой формы, что позволяет использовать их в местах, недоступных для других средств измерения. Термокраски экономичны и просты в использовании, легко наносятся на поверхность, но позволяют определять лишь максимальное значение температуры. Погрешность измерений с их использованием составляет на изотерме 6°C. Осмотр поверхности возможен только после окончания испытаний, в тоже время, фиксация изменений на цифровые носители с целью последующей обработки требует применения дополнительной аппаратуры [1]. Тем не менее, эти особенности нельзя называть недостатками, так как они лишь определяют круг задач, для которых пригодны термокраски.

Температура относится к тем физическим величинам, определение которых связано с использованием каких-либо свойств вещества, поддающихся непосредственному измерению. В случае термокрасок таким критерием является изменение цвета. Идентификация цвета в испытаниях с применением красок чаще всего проводится методом визуального сличения цвета с цветовым эталоном. При использовании многопереходных термокрасок, имеющих как контрастные (фиолетовый – зеленый, белый – оранжевый), так и оттеночные (сиреневый – светло-сиреневый) цветовые переходы, повышаются требования к оператору по опыту работы и цветовому зрению. Поскольку нет двух людей, идентично воспринимающих цвет, такой метод может привести к значительным ошибкам в определении цвета, а, следовательно, и температуры. В ЦИАМ была разработана методика, включающая в себя компьютерную расшифровку температурных полей по цифровой фотографии поверхности с термокраской [2]. Данный метод отработывался при проведении испытаний элементов камер сгорания на различных материалах и используется до сих пор (рис. 1).

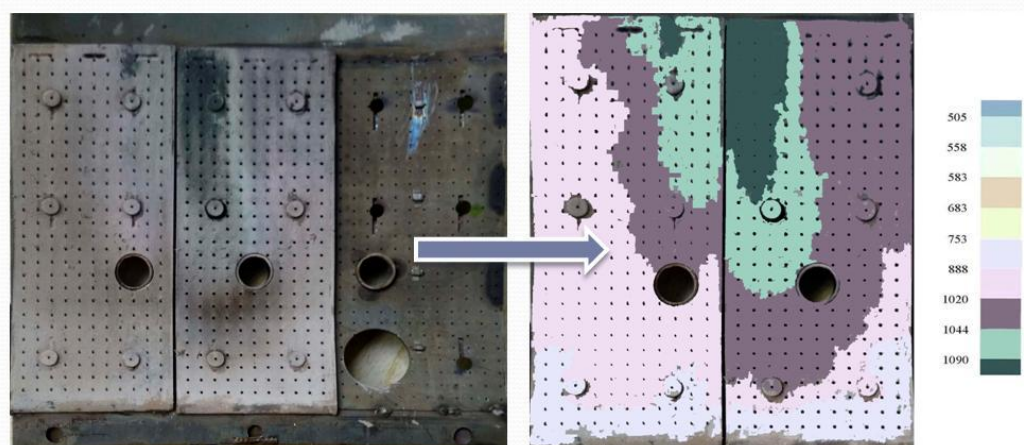


Рис.1. Обработанный и необработанный вариант результата эксперимента

Поскольку такой метод предусматривает расшифровку температурных полей по цифровой фотографии, необходимо рассмотреть аппаратуру, необходимую для качественной съемки. На данный момент в ЦИАМ для этих целей используется цифровой фотоаппарат. Однако такая съемка поверхности имеет существенные ограничения, а именно:

- фотографирование поверхности возможно только после разборки двигателя;
- невозможно фотографирование в труднодоступных местах;
- качественная расшифровка возможна лишь тогда, когда поверхность объекта плоская или близка к плоской. В противном случае искажения освещения на поверхности приводят к ошибкам в расшифровке.

Чтобы преодолеть эти ограничения, были рассмотрены имеющиеся методы неразрушающего визуально-оптического контроля, которые широко используются для оценки технического состояния авиадвигателей в процессе их обслуживания на земле, в частности, использование гибких видеоэндоскопов.

Применение эндоскопов имеет ряд очевидных преимуществ, таких как возможность съемки без разборки двигателя и фотографирование в труднодоступных местах, возможность фиксирования изображений поверхности на цифровые носители. К недостаткам использования этого оборудования для расшифровки температурных полей следует отнести источники света, воспроизводящие «голубовато-белый» или «зеленовато-белый» свет, что может существенно влиять на расшифровку температурного поля, а также частую невозможность визуально оценить чистоту поверхности с нанесенным на нее покрытием и отличить ржавчину, масло и другие загрязнения от цветных зон. С первым недостатком можно бороться, если в используемом эндоскопе предусмотрена автоматическая настройка баланса белого цвета, которая призвана компенсировать искажения цветов, вызванные освещением объекта разными источниками и привести к стандарту освещения. Также ряд эндоскопов оборудованы вспомогательными инструментами для очистки поверхности от загрязнений, что должно помочь справиться со вторым недостатком.

На рис. 2 изображен пример съемки термоиндикаторного покрытия с применением видеоэндоскопа. При расшифровке был идентифицирован цветовой переход, соответствующий 753°C. После разборки отсеков было обнаружено, что термоиндикаторное покрытие в этом месте было загрязнено ржавчиной, которая при таком освещении приняла цвет зоны термоиндикаторного покрытия, соответствующей определенной температуре.

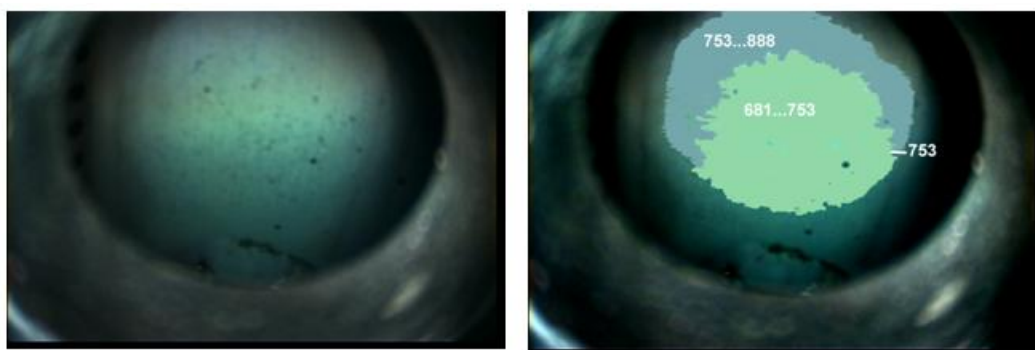


Рис.2. Съемка термоиндикаторного покрытия с помощью видеоэндоскопа

В ЦИАМ был проведен ряд экспериментов, подтверждающих целесообразность применения видеоэндоскопов в качестве фотографирующей техники при исследовании

температурных полей с помощью термокрасок. Во всех проведенных исследованиях использовался промышленный видеозэндоскоп OLYMUS IPLEX FX.

В первую очередь были сделаны выводы о необходимости проведения аттестации процедуры съемки термоиндикаторных покрытий с помощью видеозэндоскопа, поскольку разрешающая способность последнего существенно меньше показателей фотоаппарата Canon EOS 5D Mark II, который используется для фотографирования термоиндикаторных покрытий в настоящее время.

Было проведено фотографирование одних и тех же образцов термоиндикаторных покрытий фотоаппаратом (рис. 3) и видеозэндоскопом (рис. 4). При этом использовалась возможность регулировки баланса белого цвета, представленная в данной модели видеозэндоскопа. Исследования показали, что качество цветопередачи IPLEX FX не уступает цифровой фотосъемке, на полученных изображениях четко видны все цветовые переходы, и температурные поля могут быть качественно расшифрованы.



Рис.3. Изображения, сделанные фотоаппаратом



Рис. 4. Изображения, сделанные эндоскопом в условиях ограниченного пространства и освещения светодиодом

Были проведены исследования возможности очистки термопокрытий от загрязнений с помощью комплектующих видеэндоскопа. В настоящее время очистка поверхностей производится вручную, с помощью резиновых канцелярских ластиков. Для очищения с помощью эндоскопа нужно приспособление для ластика и приспособление для кисточки, чтобы убирать остатки резины после стирания. Было решено для обеих целей использовать имеющийся вспомогательный инструмент External Retrieval Tool (alligator type) ERT-218-A (рис. 5).



Рис. 5. Инструмент ERT-218-A (второй слева)

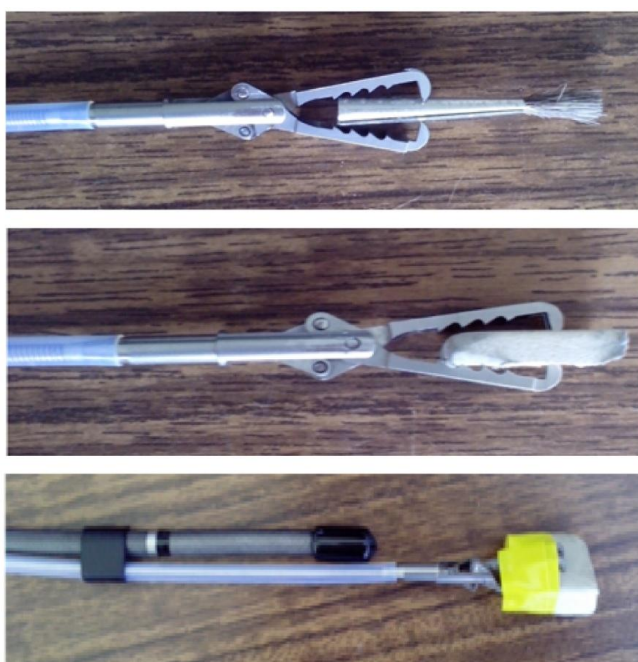


Рис. 6. ERT-218-A с кисточкой, ластиком и прикрепленный к направляющей трубке

ERT-218-A захватывает ластик или кисточку зажимом типа «крокодил» (на рис. 6 для неподвижности ластик так же закреплен клейкой лентой), крепится к направляющей трубке зонда специальными зажимами и представляет собой неподвижное продолжение направляющей трубки и секции изгиба, которое можно перемещать вместе с трубкой, проталкивая всю конструкцию вперед или назад.

Была выработана методика очистки поверхности (здесь и в последующих экспериментах загрязнение моделировалось нанесением слоя графита на поверхность):

1. Поверхность осматривается, оценивается масштаб и степень загрязнения
2. Проводится очистка ластиком, поверхность повторно осматривается
3. При необходимости по усмотрению оператора трубка вынимается, меняется ластик, проводится дальнейшая обработка поверхности;
4. Направляющая трубка зонда вынимается, ластик заменяется кисточкой, убираются остатки резины;
5. Поверхность фотографируется, изображение обрабатывается.

Ряд экспериментов показали, что при незначительных загрязнениях такая процедура очистки практически идентична ручной обработке поверхности. В случаях же очень сильного загрязнения методика уступает ручной очистке.

На рис. 7 приведены результаты эксперимента по очистке поверхности, проведенного в условиях ограниченного пространства, а на рис. 8 – фотографии очищенного покрытия.

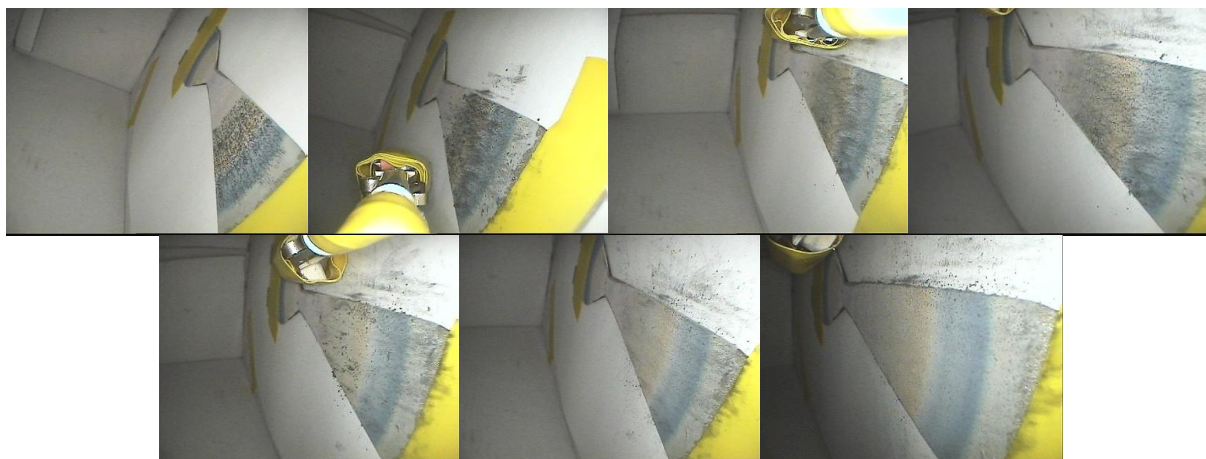


Рис. 7. Очистка поверхности в условиях ограниченного пространства



Рис. 8. Фотографии очищенного покрытия

Очевидно, что эндоскоп в виду условий использования снимает покрытия с неудобных позиций: объектив часто находится под углом к поверхности или на очень близком расстоянии от нее, даже небольшие по площади образцы (12 см^2 каждый) удается снять видеоэндоскопом лишь фрагментарно. Это приводит к необходимости разработки

программного обеспечения для панорамной "склейки" отдельных фрагментов изображений термопокрытия для получения качественной развертки исследуемой поверхности с целью дальнейшей расшифровки температурного поля.

На данный момент в отделении 010 ЦИАМ разработаны основы метода формирования совокупного изображения поверхности цилиндрических объектов из фрагментов изображений термоиндикаторных покрытий [3]. Сформулирован алгоритм, включающий в себя привязку фрагментов изображений к эскизу общей развёртки поверхности, устранение геометрических и оптических искажений и объединение нормализованных фрагментов изображений поверхности в полное. Пример устранения искажений представлен на рис.9.

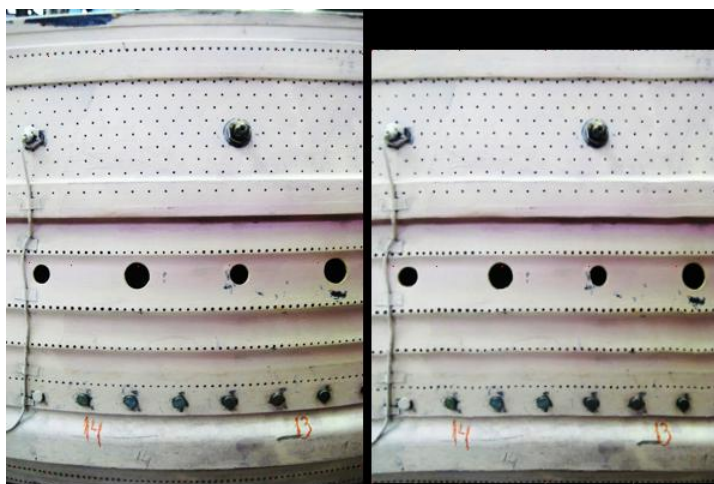


Рис. 9. Результат исправления искажений для формирования совокупного изображения поверхности

Следующим шагом работ в данном направлении будет разработка метода формирования развертки термопокрытий, сфотографированных с помощью видеоэндоскопа.

На рис. 10 представлены результаты съемки термопокрытия на экспериментальном керамическом сегменте соплового аппарата в труднодоступных местах. На рисунке слева показан общий вид сегмента, полученный с помощью фотоаппарата, а справа – фотография труднодоступного места внутри сегмента, полученная с помощью видеоэндоскопа IPLEX FX.



Рис. 10. Съемка термопокрытий в труднодоступных местах

Таким образом, видеоэндоскопы могут быть успешно применены в качестве фотографирующей техники для исследования температурных полей труднодоступных поверхностей двигателей при их термометрировании термоиндикаторами.

Заключение

Видеоэндоскопы могут быть успешно применены в качестве фотографирующей техники для исследования температурных полей частей двигателей при соблюдении ряда условий. В результате работы сформулированы основы метода использования видеоэндоскопа OLYMPUS Iplex FX в подобных задачах и формирования совокупного изображения поверхности из фрагментов изображений и расшифровки термопокрытий, а также проведено опробование метода в лабораторных условиях.

Литература

1. *Абрамович Б.Г., Картавцев В.Ф.* Цветовые индикаторы температуры. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
2. *Мирная М.Р., Иванов К.А., Бородако В.В.* Применение термоиндикаторных красок // Труды ЦИАМ 1980-2000 «Научный вклад в создание авиационных двигателей», 2000. – Т. 2. – с. 485-486.
3. *Сорожкин А.С., Мирная М.Р., Кобцева А.А.* Разработка метода формирования совокупного изображения поверхности из фрагментов изображений термоиндикаторных покрытий // Сборник тезисов внутренней научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» – 2015. – с. 347