

УДК 620.192.34

Р.Р. ГАРЕЕВ, Н.М. ЦИРЕЛЬМАН*Уфимский государственный авиационный технический университет***КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ
С ПОДЛОЖКОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ**

Исследована возможность косвенной идентификации прочности сцепления покрытия с подложкой по изменению температуры покрываемой поверхности. Учитывая сложность размещения термодатчиков в этой зоне без искажения реальных температурных полей, зависимость температуры покрываемой поверхности от времени устанавливалась из решения нелинейной обратной задачи нестационарной теплопроводности, с использованием данных тепловой обстановки на тыльной (непокрываемой) поверхности подложки. Верификация метода и экспериментальные исследования выявили приемлемость такой идентификации.

адгезия плазменного покрытия, тепловой неразрушающий контроль, обратная задача нестационарной теплопроводности**Введение**

План развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в рамках энергетической стратегией РФ включает в себя восстановление изношенных энергетических объектов. Особенно остро стоит задача восстановления изношенных в процессе эксплуатации дорогостоящих деталей турбинных энергетических установок. Детали, работающие в узлах и установках ГРЭС, при длительной эксплуатации подвергаются кавитационной эрозии в потоке рабочего газа, усугубляющейся коррозионным воздействием, что приводит к их скорому износу. Восстановления и защиту таких изделий можно решить, в частности, напылением покрытий,

Одним из наиболее важных параметров качества покрытия является прочность его сцепления с подложкой. Большое количество факторов, влияющих на адгезию напыляемого материала с подложкой, требует подбора соответствующих технологических режимов.

Температура покрываемой поверхности подложки зависит от термической проводимости границы системы тел «покрытие – подложка» и в определенной степени характеризует прочность сцепления

покрытия с подложкой и отсутствием или наличием газовых прослоек [1]. Это позволяет использовать изменение температуры покрываемой поверхности подложки в качестве критерия прочности сцепления покрытия. Таким способом, на наш взгляд, можно реализовать эффективный тепловой метод неразрушающего контроля качества сцепления покрытия с подложкой.

Учитывая сложность размещения термодатчиков в зоне контакта без искажения реальных температурных полей, зависимость температуры от времени в этом месте устанавливалась из решения нелинейной обратной задачи нестационарной теплопроводности (ОЗТ) при использовании в качестве исходных данных математического описания тепловой обстановки на тыльной (непокрываемой) поверхности подложки.

Метод был верифицирован решением серии прямых задач нестационарной теплопроводности (ПЗТ) с последующим использованием их результатов при решении обратных задач нестационарной теплопроводности для напыленной конструкции при зависящих от температуры теплопроводности и объемной теплоемкости материала подложки и покрытия. На экспериментальной установке проведены многочис-

ленные опыты, в результате которых была определена временная зависимость температуры поверхности подложки в зоне контакта $t_K(\tau)$ для различных технологических режимов. Прочность сцепления покрытия подложки устанавливалась на разрывных машинах. В работе доказана прямая корреляция этого важнейшего фактора с температурой $t_K(\tau)$.

1. Тестирование метода решением прямой задачи нестационарной теплопроводности

Распределение температуры образца в начальный момент времени принималось равномерным, а теплофизические характеристики полагались линейно зависящими от температуры, как у подавляющего большинства материалов, используемых в авиационном двигателестроении:

$$\rho c(T) = a + bT, \quad \lambda(T) = L + dT. \quad (1)$$

В этих предположениях прямая задача решалась с использованием известных численных методов расчета [3].

Тепловая обстановка со стороны покрытия (со стороны подвода теплоты) соответствовала граничным условиям второго рода (ГУ-II), когда известна плотность теплового потока, проходящего через наружную поверхность покрытия.

Предполагалось, что тепловой поток в образце одномерный, а тыльная сторона подложки, на которой производится измерение, теплоизолирована. Температурные поля определялись по методу сеток с использованием неявной схемы, которой соответствует конечно-разностный аналог уравнения Фурье:

$$\rho_k c_k(T_i^{(n)}) \frac{T_i^{(n+1)} - T_i^{(n)}}{\Delta \tau} = \lambda_k(T_{i-1/2}^{(n)}) \frac{T_{i-1}^{(n+1)} - T_i^{(n+1)}}{\Delta x^2} - \lambda_k(T_{i+1/2}^{(n)}) \frac{T_i^{(n+1)} - T_{i+1}^{(n+1)}}{\Delta x^2}, \quad (2)$$

где i – порядковый номер пространственного шага; n – номер временного слоя; подстрочный индекс k – род среды (покрытие, контактное сопротивление в виде воздушного зазора, подложка).

Конечно-разностная аппроксимация учитывала особенности распределения температуры на стыке различных сред.

Шаг по пространству Δx для каждого слоя выбирался в зависимости от его толщины, а шаг по времени $\Delta \tau$ принимался равным 0,001 с. Система уравнений (2) решалась известным методом прогонки.

Результаты расчетов прямой задачи приведены на рис. 1, из рассмотрения которого видно, что разница в значениях температуры подложки при наличии и отсутствии воздушного зазора существенна: наличие газовых включений в зазоре между покрытием и подложкой при нагреве детали или образца со стороны покрытия приводит к снижению температуры покрываемой поверхности подложки. Это даёт возможность использования относительных значений поверхностной температуры подложки для количественной оценки прочности сцепления покрытия.

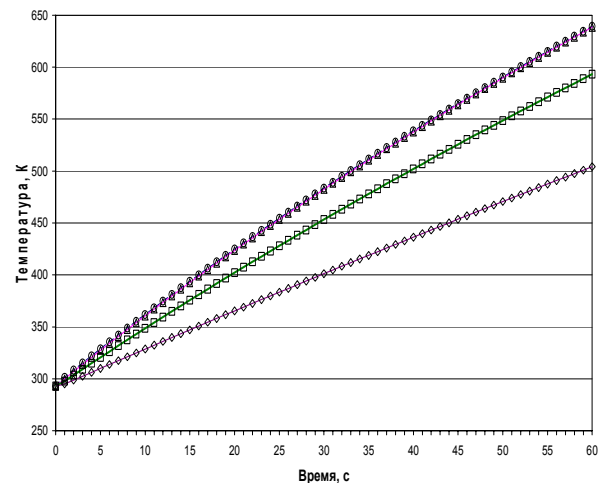


Рис. 1. Изменение температуры покрываемой поверхности во времени в образцах:
 —○— без воздушного зазора (с хорошей адгезией);
 —△— с толщиной воздушной прослойки 0,001 мм;
 —□— с толщиной газовой прослойки 0,5 мм;
 —◇— с толщиной газовой прослойки 1 мм

Именно поэтому приемлема косвенная идентификация прочности сцепления покрытия с подложкой на основе решения обратной задачи теплопроводности.

2. Тестировании метода решением обратной задачи нестационарной теплопроводности

При этом выявлялась точность и чувствительность решения ОЗТ к входным данным, в качестве которых служили решения ПЗТ и результаты экспериментов. В работе использовались развитые в [2] аналитические методы решения ОЗТ, преимуществом которых является, в частности, то, что они не требуют знания теплового состояния конструкции в начальный момент времени.

Постановка нелинейной граничной обратной задачи для неограниченной пластины содержит уравнение процесса нестационарной теплопроводности:

$$(a + bT) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(l + dT) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (3)$$

$$x > 0, \quad \tau > 0,$$

при известных в точке с координатой $x = 0$ изменениях температуры во времени

$$T(0, \tau) = f(\tau), \quad \tau > 0 \quad (4)$$

и ее градиента в том же месте

$$\left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = \varphi(\tau), \quad \tau > 0. \quad (5)$$

Замена

$$T(x, \tau) = u(x, \tau) + x\varphi(\tau) + f(\tau) \quad (6)$$

приводит к ОЗТ с однородными начальными условиями:

$$\begin{aligned} [a + b(u + x\varphi + f)](u_\tau + x\varphi' + f') = \\ = [l + d(u + x\varphi + f)]u_{xx} + d(u_x + \varphi)^2; \end{aligned} \quad (7)$$

$$u(0, \tau) = 0, \quad \tau > 0; \quad (8)$$

$$u_x(0, \tau) = 0, \quad \tau > 0, \quad (9)$$

решение которой ищем в виде ряда

$$u(x, \tau) = \sum_{n=2}^{\infty} C_n(\tau)x^n, \quad (10)$$

обеспечивающего удовлетворение условий (8), (9).

Подставив форму решения (10) в (7) и приравняв в левой и правой части коэффициенты при одинаковых степенях x , получим соотношения для нахождения функций $C_n(\tau)$:

В нашем случае тыльная (непокрываемая) поверхность подложки с координатой $x = 0$, как было уже сказано выше, полагается теплоизолированной и поэтому градиент температуры равен нулю в месте измерения $\varphi(\tau) = 0$.

Для аппроксимации зависимости температуры тыльной стороны подложки от времени $f(\tau)$ были использованы следующие функции:

– экспоненциальный ряд вида

$$f(\tau) = \sum_{k=0}^n a_k \exp(\alpha_k^2 \tau), \quad (11)$$

– полиномиальный ряд вида

$$f(\tau) = \sum_{k=0}^n a_k \tau^k, \quad (12)$$

где τ – время, отсчитанное от начала теплового процесса.

При проведении расчетов установлено, что увеличение количества членов ряда аппроксимирующей функции более двух даёт уточнение результата в сотых долях градуса. Также замечено, что чем быстрее происходят изменения измеряемой температуры во времени, тем меньшие отрезки времени должны выбираться для аппроксимации функцией $f(\tau)$. При малом и плавном изменении температуры тыльной стороны подложки лучший результат даёт использование аппроксимации функции полиномиальными рядами. Кроме того, в этих условиях следует выбирать для аппроксимации температуры на этой стороне большие отрезки времени.

Результаты решения ПЗТ и ОЗТ сопоставлены графически на рис. 2, на котором приведены зависимости температуры покрываемой поверхности подложки от времени.

Таким образом, установлено, что температура поверхности подложки на границе с покрытием может быть с высокой точностью найдена из аналитического решения ОЗТ с использованием измерений температуры на её тыльной поверхности.

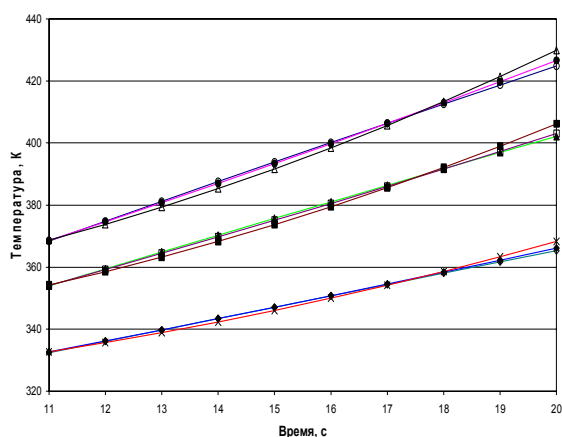


Рис. 2. Временная зависимость температуры покрываемой поверхности в образцах:

- ПЗТ без воздушной прослойки (хорошая адгезия);
- ОЗТ с использованием экспоненциальных рядов (хорошая адгезия);
- △— ОЗТ с использованием полиномиальных рядов (хорошая адгезия);
- ▲— ПЗТ при толщине воздушной прослойки 0,5 мм;
- ОЗТ с использованием экспоненциальных рядов (прослойка 0,5 мм);
- ОЗТ с использованием полиномиальных рядов (прослойка 0,5 мм);
- ◇— ПЗТ при толщине воздушной прослойки 1 мм;
- ◆— ОЗТ с использованием экспоненциальных рядов (прослойка 1 мм);
- ×— ОЗТ с использованием полиномиальных рядов (прослойка 1 мм).

3. Экспериментальная проверка метода

Для этого были изготовлены два типа образцов подложки из Ст3 (ГОСТ 380-91):

- образцы для теплового анализа;
- образцы-свидетели для механических испытаний на адгезионную прочность.

Все образцы были промаркированы и разделены на три группы по четыре представителя в каждой из них. Они напылялись на установке с плазматроном ПУН-1М на производственно-экспериментальной базе Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

При напылении использовались технологические режимы, когда ток дуги плазматрона был равен $I = 100$ А при напряжении дуги $U = 200$ В. В качестве

плазмообразующего газа использовались воздух, пропан, а транспортирующим газом был воздух. Давление плазмообразующего газа составляло $p = 800$ кПа, а расход транспортирующего газа составлял $G_{тр} = 2,46$ л/с. Напыляемый материал ПВ-Х18Н9Т представлял собой коррозионно-стойкий порошок на основе железа с добавлением 18% хрома, 9,5% никеля и 0,8% кремния.

Согласно имеющимся технологическим инструкций, перед напылением на всех образцах была произведена подготовка поверхности обдувкой абразивом (песком) при давлении в 800 кПа. Напыляемый порошок был просушен и просеян.

Таблица 1

Ведомость испытаний на прочность сцепления (на адгезионную прочность)

№ группы	Усилие разрыва (средний показатель по группе), кг.	Диаметр площадки разрыва, мм.	Прочность сцепления, МПа.	Тип разрушения
1	11,3	3,0	16,0	Адгезионное
2	8,35		11,8	
3	10,7		15,1	

Напыление одной группы образцов для теплового анализа и образцов-свидетелей для механических испытаний на адгезионную прочность производилось в два прохода одновременно при их одинаковом удалении от сопла плазматрона. При этом толщина напылённого слоя ориентировочно получалась равной 1мм. Первая и вторая группы образцов напылялись на расстоянии 150 мм и 130 мм от среза сопла плазматрона соответственно. Вследствие этого наблюдался значительный перегрев покрытия и образцов второй группы, что приводило к возникновению значительных остаточных напряжений при их остывании и к худшему сцеплению покрытия с подложкой. Третья группа образцов напылялась на удалении в 170 мм от сопла плазматрона, что приводило к переохлаждению частиц напыляемого материала в процессе подлёта к подложке и, как след-

стве, к ухудшению адгезии.

После напыления образцы для механических испытаний на адгезионную прочность испытывались в лаборатории ФГУП «ММПП «САЛЮТ» (г. Москва) по методике, принятой в авиационной промышленности.

Температура тыльной (непокрываемой) поверхности образцов для теплового анализа была измерена на установке, схема которой приведена на рис. 3.

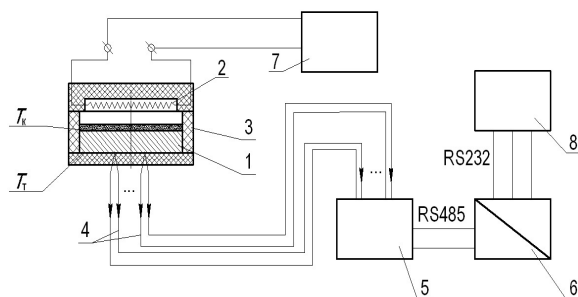


Рис. 3. Схема установки для измерения температуры на тыльной поверхности подложки образцов для теплового анализа

Она включала в себя опытные образцы 1, хромель-копелевый термоэлектронагреватель 2, теплоизолирующий бокс 3, тарированные термопары ТПК-011.05/3 (с диапазоном $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +400\text{ }^{\circ}\text{C}$) хромель – копелевые (толщина проводников 0,5 мм) 4, модуль I-7018P аналогового ввода с термопар фирмы ICP DAS серии I-7000 (основная погрешность: $+0,1\%$, 10 выборок в секунду) 5, I-7520 – преобразователь интерфейса RS-232 в RS-485 серии 7000 (фирмы ICP DAS) 6, трансформатор с регулируемым выходным напряжением 7, персональный компьютер для скоростного ввода данных измерений термопар 8.

На рис. 4 приведен результат решения ОЗТ, основанный на измерениях температуры на тыльной стороне подложки по средним температурам для различных групп образцов.

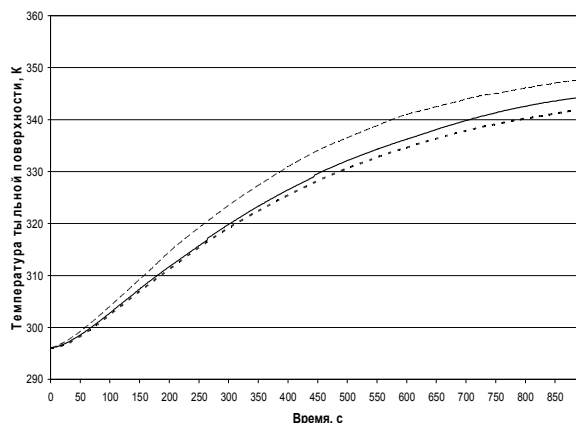


Рис. 4. Временная зависимость температуры покрываемой поверхности подложки:
 - - - первая группа образцов;
 ····· вторая группа образцов;
 — третья группа образцов

Сравнительный анализ решений ПЗТ и ОЗТ выявил приемлемость идентификации прочности сцепления покрытия с подложкой на основе решения обратной задачи нестационарной теплопроводности. Экспериментальные исследования на прочность подтверждают этот факт.

Литература

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Цирельман Н.М. Прямые и обратные задачи тепломассопереноса. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 392 с.
3. Шуп Т. Прикладные численные методы в физике и технике: Пер. с англ. – М.: Высш. шк., 1990. – 239 с.

Поступила в редакцию 12.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук Ф.Г. Бакиров, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.