

УДК 620.192.34

Р. Р. ГАРЕЕВ, Н. М. ЦИРЕЛЬМАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ С ПОДЛОЖКОЙ

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. *Прочность сцепления плазменного покрытия; тепловой неразрушающий контроль; обратная задача нестационарной теплопроводности*

ВВЕДЕНИЕ

Детали многих ответственных изделий, выпускаемых промышленностью, работают в условиях эксплуатации, приводящих к их ускоренному износу. К этим условиям относятся, в частности, высокие температуры и давления газовых потоков, коррозионное и кавитационное воздействие в процессе эксплуатации и др. Восстановление и защиту таких изделий можно осуществить, 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, что было выявлено нами в работе [1]. Это позволяет использовать изменение температуры покрываемой поверхности подложки в качестве критерия прочности сцепления покрытия. Таким образом, 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 температур 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 многочисленные 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. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ ОТ КАЧЕСТВА СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ

Прежде всего, покажем в численном эксперименте, насколько чувствительна температура подложки со стороны покрытия к качеству сце-

пления покрытия, и с этой целью решим прямую задачу нестационарной теплопроводности, когда плотность теплового потока, проходящего через наружную поверхность покрытия, постоянна во времени. Тыльную сторону подложки будем полагать идеально теплоизолированной. Такая постановка задачи об определении температурного поля в подложке соответствует простейшим граничным условиям второго рода (ГУ-II) на ее ограничивающих поверхностях.

Естественно, что в этом случае распределение температуры в плоском образце, представляющем собой напыленную с одной стороны пластину (подложку), будет одномерным, т. е. изменяющимся лишь по координате x . Это возможно, к тому же, если в начальный момент времени температурное поле везде является одномерным и, в частности, если температура везде одинакова. Теплофизические характеристики материала подложки полагались линейно зависящими от температуры, как у подавляющего большинства материалов, используемых, например, в авиационном двигателестроении:

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

При такой постановке исходной задачи температурные поля в подложке определялись нами с использованием численного метода конечных разностей (метода сеток) по неявной схеме, которой соответствует следующий конечно-разностный аналог уравнения Фурье:

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

где i – порядковый номер пространственного шага; n – номер временного слоя; подстрочный индекс k – род среды (покрытие, контактное сопротивление в виде воздушного зазора, подложка) [2].

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 решалась известным методом прогонки.

Результаты расчетов прямой задачи приведены на рис. 1, из 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 дает возможность использовать относительные значения поверхностной температуры подложки для количественной оценки прочности сцепления покрытия.

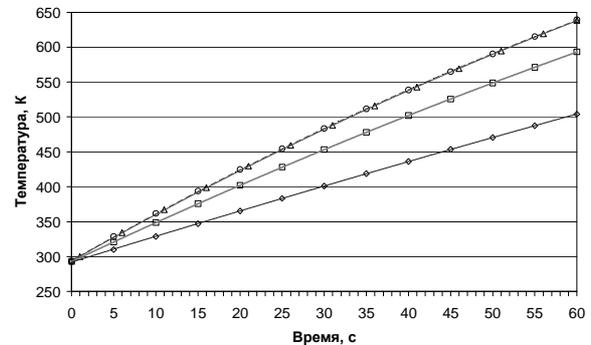


Рис. 1. Изменение температуры покрываемой поверхности во времени в образцах: —○— без воздушного зазора (с идеальной адгезией); —△— с толщиной воздушной прослойки 0,001 мм; —□— с толщиной газовой прослойки 0,05 мм; —◇— с толщиной газовой прослойки 0,1 мм

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

2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

При этом выявлялась точность и чувствительность решения обратной задачи нестационарной теплопроводности (ОЗТ) к входным данным, в качестве которых служили решения ПЗТ и результаты экспериментов. В работе использовались развитые в [3] 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

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

Решая эту задачу, мы находим температуру в точках с координатами $x > 0$ по установленным из решения ПЗТ или в эксперименте временным зависимостям температуры от времени $f(\tau)$ и ее градиента $\varphi(\tau)$ на тыльной стороне подложки (рис. 2).

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 следующие соотношения для нахождения функций $C_n(\tau)$:

1) при x^0

$$(a + bf)f' = 2(l + df)C_2(\tau) + d\varphi^2, \quad (11)$$

откуда вычисляется $C_2(\tau)$;

2) при x^1

$$\begin{aligned} (a + bf)\varphi' + b\varphi f' &= \\ = 6(l + df)C_3(\tau) + 6d\varphi C_2(\tau), \end{aligned} \quad (12)$$

откуда получаем $C_3(\tau)$ при уже найденном $C_2(\tau)$;

3) при x^2

$$\begin{aligned} (a + bf)C_2'(\tau) + b\varphi\varphi' + C_2(\tau)bf' &= \\ = 12(l + df)C_4(\tau) + 12d\varphi C_3(\tau) + 6dC_2^2(\tau), \end{aligned} \quad (13)$$

откуда при установленных $C_2(\tau)$, $C_3(\tau)$ получаем $C_4(\tau)$;

4) при x^3

$$\begin{aligned} (a + bf)C_3'(\tau) + b\varphi C_2'(\tau) + b\varphi' C_2(\tau) + \\ + bf' C_3(\tau) = 20(l + df)C_5(\tau) + \\ + 20d\varphi C_4(\tau) + 20dC_2(\tau)C_3(\tau), \end{aligned} \quad (14)$$

получаем $C_5(\tau)$.

Можно показать, что для $n = 4, 5, 6, \dots$ получаем рекуррентную формулу для определения искомым функций времени в виде

$$C_{n+2} = \frac{1}{(l + df)(n+1)(n+2)} \times \left[\begin{aligned} &(a + bf)C_n' + b\varphi C_{n-1}' + b\varphi' C_{n-1} + \\ &+ C_n b f'' + b \sum_{k=2}^{n-2} C_k C_{n-k}' - \\ &- d\varphi(n+1)n C_{n+1}' - \\ &\times \left[-d \sum_{k=2}^n C_k C_{n-k+2} k(k-1) - \right. \\ &- 2d\varphi(n+1)C_{n+1}' - \\ &\left. - d \sum_{k=2}^n C_k C_{n-k+2} k(n-k+2) \right] \end{aligned} \right] \quad (15)$$

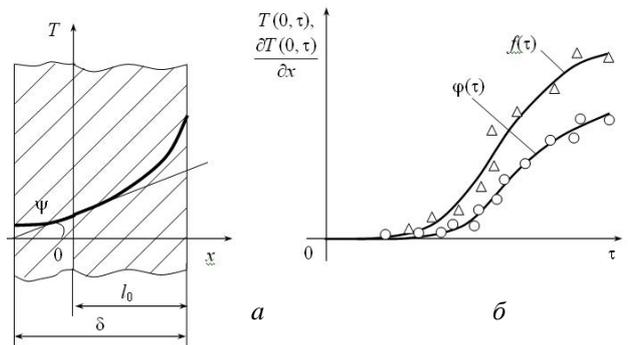


Рис. 2. Распределение температуры в подложке в фиксированный момент времени (а) и вид функции зависимости температуры от времени $f(\tau)$ и ее градиента $\varphi(\tau)$ в точке $x = 0$ (б)

Таким образом, формально решение нелинейной задачи (7)–(9) в виде ряда (10) получено, но не исследована его сходимость. Можно показать, что используя формулу (15), нельзя получить оценку величин $|C_n|$, $|C_n'|$, т. е. нельзя показать, что они ограничены положительной постоянной

$$|C_n| \leq M, \quad |C_n'| \leq M, \quad (16)$$

где $M > 0$, $\varphi(\tau) = 0$, т. е. что место измерения температуры $f(\tau)$ идеально теплоизолировано. Тогда из формул (11)–(15) следует, что $C_{2n+1} = 0$, $n = 1, 2, \dots$. Далее, пусть $|C_{2k}| \leq M$, $|C_{2k}'| \leq M$ для $k = 1, 2, \dots$

В этом случае из (15) получаем оценку

$$\begin{aligned} |C_{2n+2}| \leq \frac{1}{|l + df|(2n+1)(2n+2)} \\ \left\{ M(|a + bf| + |bf'|) + |b|M^2(n-2) + \right. \\ + |d|M^2[2 \cdot 1 + 4 \cdot 3 + \dots + 2n(2n-1)] + \\ \left. + |d|M^2[2 \cdot 2n + 4(2n-2) + \dots + 2n \cdot 2] \right\} = N. \end{aligned} \quad (17)$$

Если бы мы показали, что при больших n выполняется неравенство $N \leq M$ то оценка (16) была бы верна для любого n . Однако нелиней-

ность вида T^2 в исходном уравнении (3) дает в N вклад, равный

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{2 \cdot 1 + 4 \cdot 3 + \dots + 2n(2n-1)}{(2n+2)(2n+1)} > \\
 &> \frac{1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 4 + \dots + 2n(2n-1)}{2(2n+2)(2n+1)} > \\
 &> \frac{1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + (2n-1)^2}{2(2n+2)(2n+1)} = \\
 &= \frac{(2n-1)2n(4n+1)}{2(2n+2)(2n+1)}. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Из формулы (18) следует, что при $n \rightarrow \infty$ и $P \rightarrow \infty$. Следовательно, оценка N в неравенстве (17) не ограничена абсолютно постоянной, а именно

$$\lim_{n \rightarrow \infty} N \rightarrow +\infty. \quad (19)$$

Таким образом, для установления сходимости ряда (10) требуется, очевидно, использовать более тонкие оценки, чем приведенные выше.

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

$$f(\tau) = \sum_{k=0}^n a_k \exp(\alpha_k^2 \tau), \quad (20)$$

- полиномиальный ряд вида

$$f(\tau) = \sum_{k=0}^n a_k \tau^k, \quad (21)$$

где τ – время, отсчитанное от начала теплового процесса.

При проведении расчетов установлено, что увеличение количества членов ряда аппроксимирующей функции более двух дает 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 дает использование аппроксимации функции полиномиальными рядами. Кроме того, в этих условиях следует выбирать для аппроксимации большие отрезки времени.

Результаты решения ПЗТ и ОЗТ сопоставлены графически на рис. 3, на котором приведены

зависимости температуры покрываемой поверхности подложки от времени.

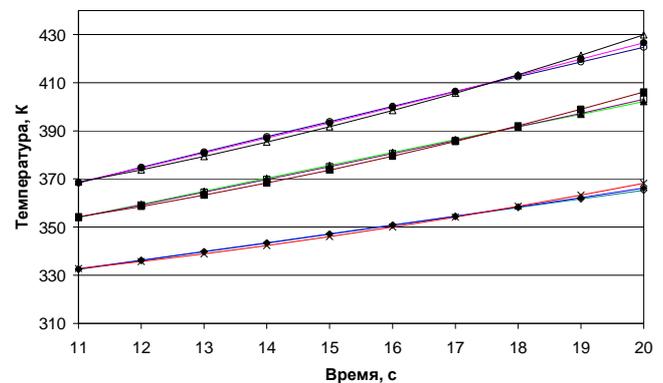


Рис. 3. Временная зависимость температуры покрываемой поверхности в образцах:

—○— ПЗТ – без воздушной прослойки (идеальная адгезия); —●— ОЗТ с использованием экспоненциальных рядов (идеальная адгезия); —△— ОЗТ с использованием полиномиальных рядов (идеальная адгезия); —▲— ПЗТ при толщине воздушной прослойки 0,001 мм; —□— ОЗТ с использованием экспоненциальных рядов (прослойка 0,001 мм); —■— ОЗТ с использованием полиномиальных рядов (прослойка 0,05 мм); —◇— ПЗТ при толщине воздушной прослойки 0,05 мм; —◆— ОЗТ с использованием экспоненциальных рядов (прослойка 0,1 мм); —×— ОЗТ с использованием полиномиальных рядов (прослойка 0,1 мм)

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 ее тыльной поверхности.

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 производственно-экспериментальной базы 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 и пропан, а транспортирующим газом был воздух. Давление плазмообразующего газа составляло $P =$

= 800 кПа, а расход транспортирующего газа составлял $V_{тр} = 2,46$ 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 инструкциям, перед напылением на всех образцах была произведена подготовка поверхности обдувкой шлифпорошком (электрокорунд 25 А) при давлении в 800 кПа. Напыляемый порошок был предварительно просушен и просеян.

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 среза сопла плазматрона. При этом толщина напыленного слоя ориентировочно получалась равной 1 мм. Первая и вторая группы образцов напылялись на расстоянии 150 мм и 130 мм от среза сопла плазматрона соответственно. Вследствие этого наблюдался (с использованием пирометра) значительный перегрев покрытия образцов второй группы, что, вероятно, 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, вероятно, приводило к переохлаждению частиц напыляемого материала в процессе полета к подложке и, как следствие, к ухудшению адгезии.

После напыления образцы для механических испытаний на адгезионную прочность (рис. 4) испытывались в лаборатории ФГУП «ММПШ «САЛЮТ» (г. Москва) по методике, принятой в авиационной промышленности. Результаты испытаний представлены в табл. 1. 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. 6 приведен результат решения ОЗТ, основанный на измерениях температуры на

тыльной стороне подложки по средним температурам для различных групп образцов.

Таблица 1

Ведомость испытаний на прочность сцепления (на адгезионную прочность)

№ группы	Усилие разрыва (средний показатель по группе), кГс	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	

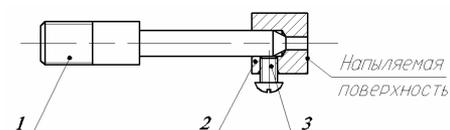


Рис. 4. Схема образца-свидетеля для механических испытаний на адгезионную прочность

Температура тыльной (непокрываемой) поверхности образцов для теплового анализа была измерена на установке, схема которой приведена на рис. 5.

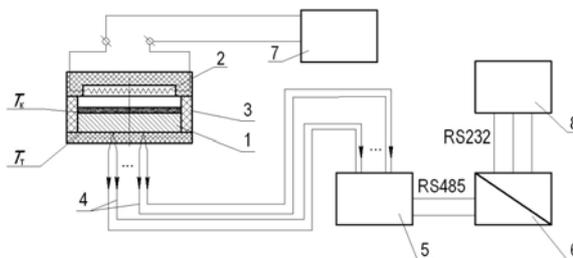


Рис. 5. Схема установки для измерения температуры на тыльной поверхности подложки образцов для теплового анализа

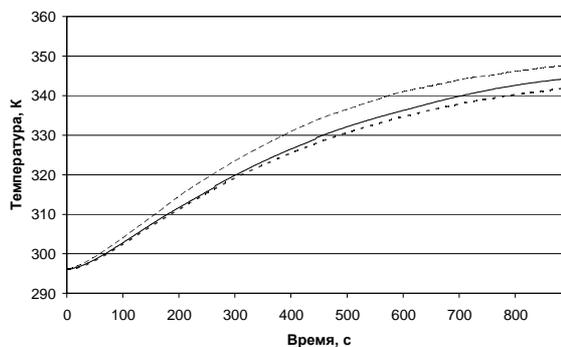


Рис. 6. Временная зависимость температуры покрываемой поверхности подложки:
 - - - - - первая группа образцов;
 ······ вторая группа образцов;
 ————— третья группа образцов

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННОГО ПОКРЫТИЯ

С целью исследования свойств полученных покрытий образцы были разрезаны с помощью электроэрозионного метода для того чтобы покрытие не отслоилось от воздействия механических сил резания (рис. 7).

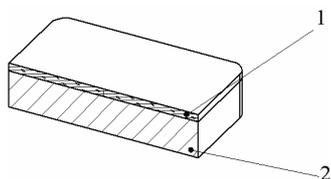


Рис. 7. Образец, разрезанный для проведения тепловых исследований: 1 – покрытие; 2 – подложка

После этого полученные поверхности шлифовались, потом полировались и были протравлены раствором соляной кислоты. Фотографии образцов приведены на рис. 8.

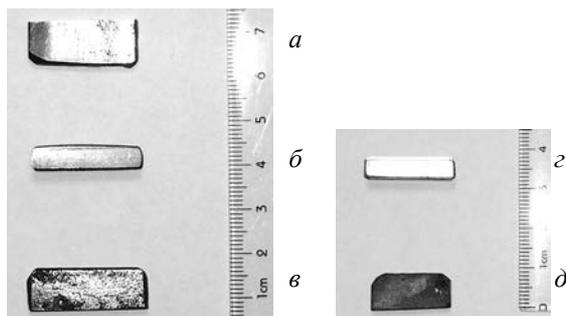


Рис. 8. Фотографии разрезанных образцов, а – вид образцов снизу (непокрытая сторона); б, в – «шлифы» образцов; в, д – вид образцов сверху (покрытие)

5. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ОБРАЗЦОВ

Для исследования микротвердости образцов с покрытием был использован твердомер «MicroMet 5101» американской фирмы «Buehler Ltd» с микроскопом, оборудованным электронной оптической видеокамерой, подключенной к компьютеру с программой обработки полученных изображений. Микротвердость определялась по результатам измерения диагонали отпечатка от алмазной пирамидки при нагрузке 0,1 кг в течение 15 секунд.

Микротвердость определялась в плоскости разреза в трех точках покрытия и подложки: точка 0 находилась на расстоянии 0,3 мм от поверхности покрытия, точка 1 – посередине покрытия, точка 2 – на покрытии с удалением 0,1 мм от границы покрытия и подложки, точка 3 – на подложке на удалении 0,1 мм от грани-

цы, точка 4 – посередине подложки, точка 5 – на расстоянии 1 мм от непокрытой поверхности подложки.

На рис. 9–11, представленных ниже, приведены результаты исследования микротвердости образцов (верхняя часть фотографии – это покрытие, а нижняя – подложка).

Суммируя результаты измерения микротвердости образцов, можно констатировать следующее:

- нагревание в процессе напыления не повлияло на свойства материала подложки, так как микротвердость подложки для всех образцов оказалась одинаковой,

- микротвердость покрытия в различных местах имеет существенный разброс, что говорит о гетерогенности структуры покрытия, это связано со структурой частиц напыляемого порошка, с процессами, происходящими при расплавлении частиц порошка в плазменной струе и при их осаждении на подложку.

Наблюдается некоторое повышение микротвердости покрытия на образцах первой группы, но требуются дополнительные экспериментальные данные для подтверждения последнего суждения.

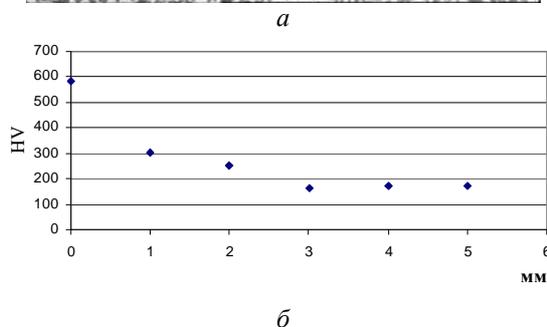
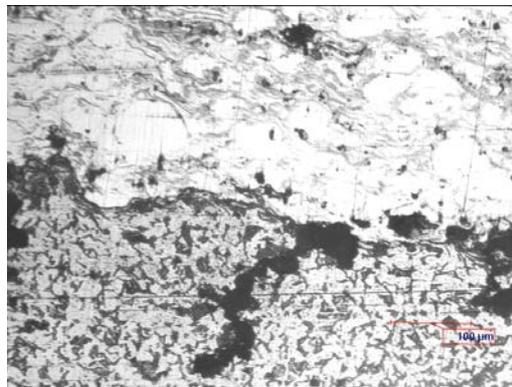
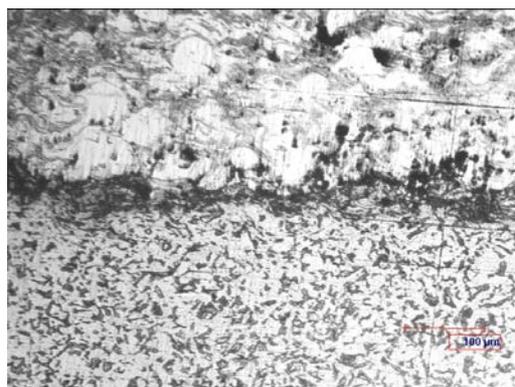
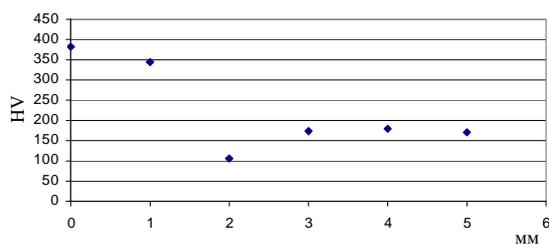


Рис. 9. Результаты исследования одного из образцов первой группы: а – фотография плоскости разреза образца (стократное увеличение); б – твердость по Викерсу, измеренная на этом образце

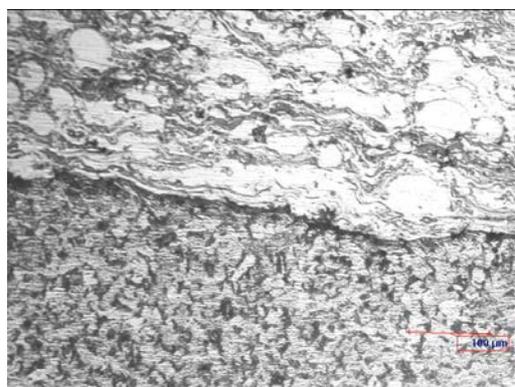


a

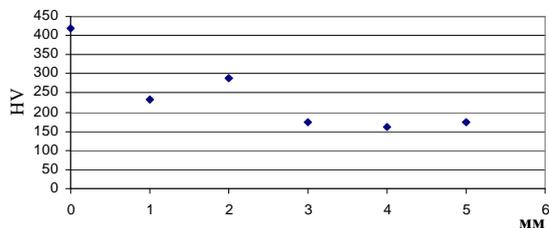


b

Рис. 10. Результаты исследования одного из образцов второй группы: *a* – фотография плоскости разреза образца (стократное увеличение); *b* – твердость по Викерсу, измеренная на этом образце



a



b

Рис. 11. Результаты исследования одного из образцов третьей группы: *a* – фотография плоскости разреза образца (стократное увеличение); *b* – твердость по Викерсу, измеренная на этом образце

6. ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЯ

Для исследования степени пористости покрытия необходимо использование нетравленной поверхности в связи с возможностью выпадения некоторых дисперсных фаз. Электролитическое полирование поверхности также исключается в связи с подтравливанием дефектных и напряженных зон. Это касается, в частности, границ зерен, стыков зерен и областей деформационных полос и различного рода неоднородностей термического типа. Поэтому для исследования микроструктуры покрытия проводилось механическое «ступенчатое» (с использованием шлифшкурки разной зернистости) шлифование поверхности с последующим полированием алмазной пастой «0,1 мкм» и пастой типа «Гойя» с использованием керосина марки КО.

Для анализа параметров микроструктуры пористой поверхности использовалась система анализа изображений «Carl Zeiss» на базе оптического инвертированного микроскопа «Axiovert-100A» и компьютерной программы «KS-300». Оптическое увеличение микроскопа выбирали в диапазоне $50^x - 500^x$ крат при цифровом увеличении на мониторе $\sim 200^x - 2000^x$ крат. Наибольшее количество пор соответствует оптическому увеличению в 50^x крат. Вместе с тем наибольшее разрешение, близкое к теоретическому $\sim 0,2$ мкм, соответствует оптическому увеличению в 1000^x крат. Оптимальным оптическим увеличением с точки зрения выборки данных и разрешения изображения в нашем случае оказалось 100^x крат, поскольку предварительный анализ минимального размера пор соответствовал величине $\sim 2,3$ мкм.

После цифровой съемки микроструктуры пористой поверхности камерой высокого разрешения с помощью компьютерной программы анализа изображений проводилась «пороговая фильтрация» остатков следов микрорисок. Далее выполнялась «геометрическая» калибровка на тест-объекте ($N \sim 615-1213$) и статистическая обработка изображений пор. Затем по статистическим данным строились гистограммы («количественная» и «суммарная») распределений «эквивалентных» диаметров пор по размерам. «Эквивалентный» диаметр пор рассчитывался по формуле $S = \pi D_{\text{экв}}^2 / 4$ из площадей различной конфигурации. С использованием этих же данных рассчитывались основные параметры пористой структуры: D_{min} , D_{cp} и D_{max} и объемная доля пор. Из рассмотрения гистограмм и таблиц видно, что небольшое отклонение от «одноmodalности» в распределении

Таблица 2

Объемная доля пор и их характерные параметры для образца из первой группы

№	Объемная доля пор, %	D_{\min} , МКМ	$D_{\text{ср}}$, МКМ	D_{\max} , МКМ
00	27,3	2,3	6,5	150,5

связано, по-видимому, с неоднородностью размеров пор (D_{\min} , $D_{\text{ср}}$ и D_{\max}) и их объемной доли.

Приводимые ниже рис. 12–14 и табл. 2 демонстрируют результаты исследования микроструктуры покрытия образцов первой группы, рис. 15–17 и табл. 3 – второй группы, рис. 18–20 и табл. 4 – третьей группы.

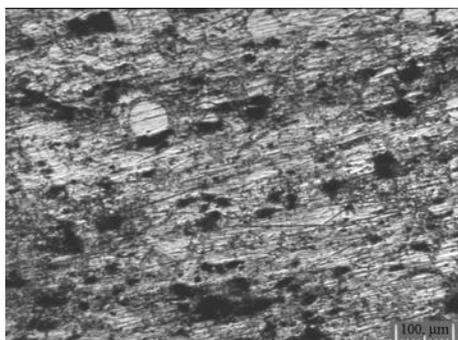


Рис. 12. Микроструктура пористой поверхности слоя для образца из первой группы

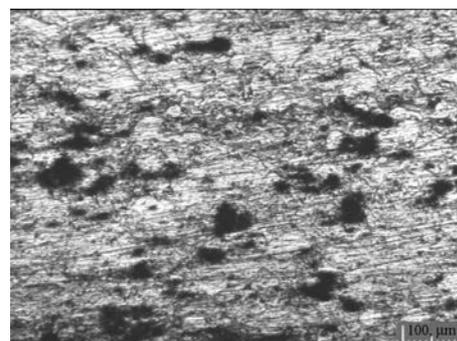


Рис. 15. Микроструктура пористой поверхности слоя для образца № 5

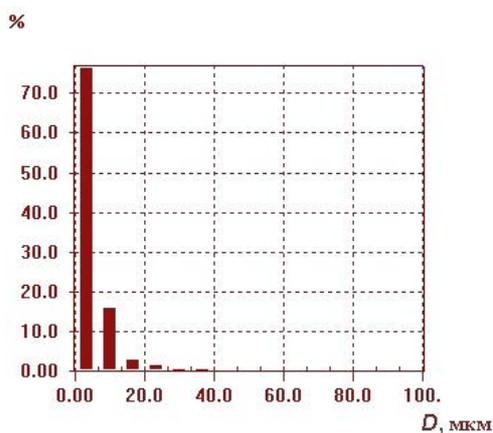


Рис. 13. Гистограмма распределения пор по размерам для образца из первой группы

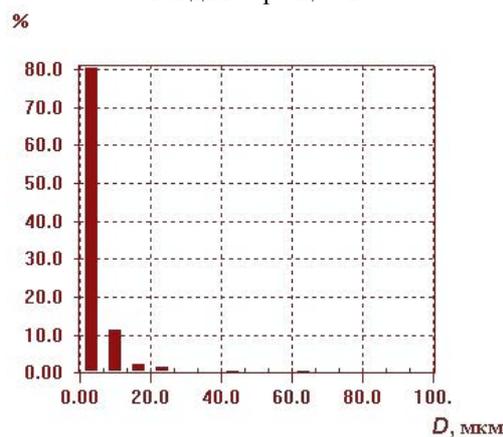


Рис. 16. Гистограмма распределения пор по размерам для образца из второй группы

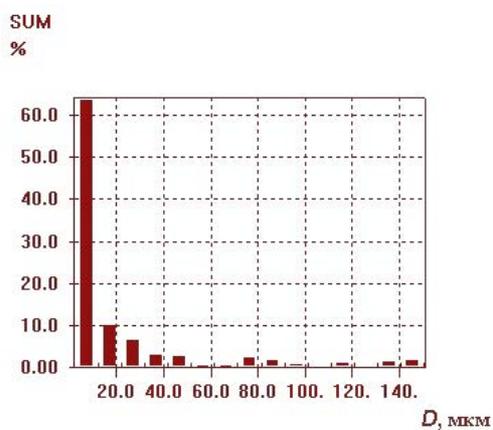


Рис. 14. «Суммарная» гистограмма распределения пор по размерам для образца из первой группы

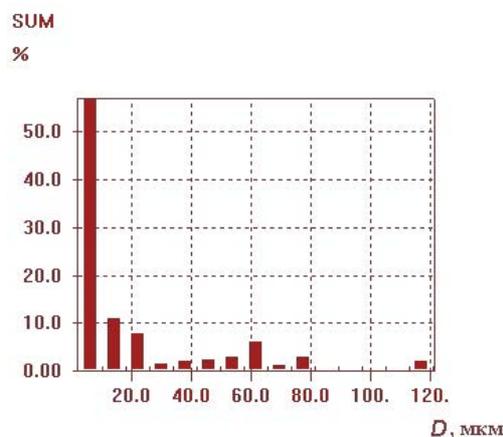


Рис. 17. «Суммарная» гистограмма распределения пор по размерам для образца из второй группы

Таблица 3

Объемная доля пор и их характерные параметры для образца из второй группы

№	Объемная доля пор, %	D_{\min} , мкм	$D_{\text{ср}}$, мкм	D_{\max} , мкм
05	16,4	2,3	6,3	120,8

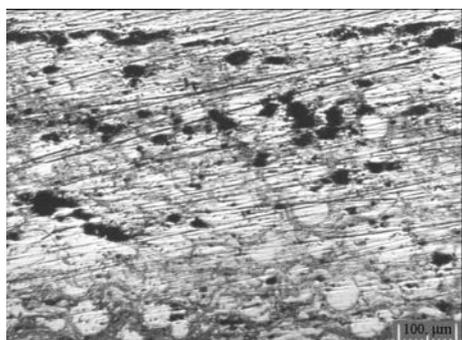


Рис. 18. Микроструктура пористой поверхности слоя для образца из третьей группы

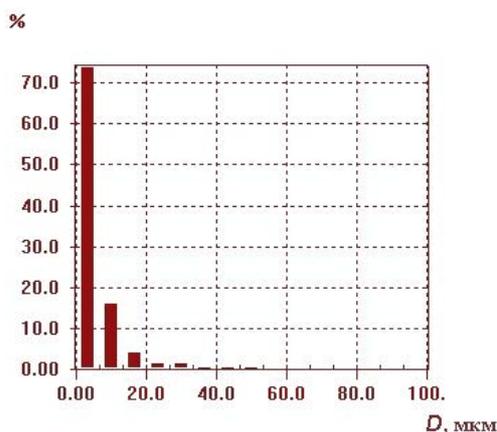


Рис. 19. Гистограмма распределения пор по размерам для образца из третьей группы

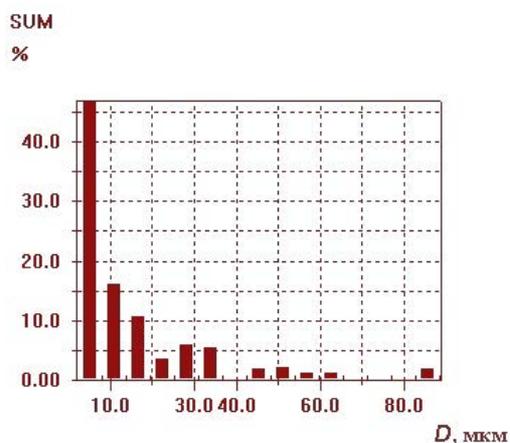


Рис. 20. «Суммарная» гистограмма распределения пор по размерам для образца из третьей группы

Таблица 4

Объемная доля пор и их характерные параметры для образца из третьей группы

№	Объемная доля пор, %	D_{\min} , мкм	$D_{\text{ср}}$, мкм	D_{\max} , мкм
13	10,7	2,3	6,6	88,3

Результаты исследования пористости образцов показали, что в первой группе образцов объемная доля пор оказалась наибольшей и равной 27,3%, а во второй и третьей 16,4% и 10,7% соответственно. Это повлияло на результаты, полученные в ходе теплового анализа второй и третьей группы образцов. Однако устойчивое положение теплового состояния первой группы доказывает, что прочность сцепления подложки с покрытием оказывает более выраженное влияние при тепловом анализе, чем существенное увеличение пористости. Это говорит о высокой чувствительности метода с использованием ОЗТ. Кроме того, некоторое влияние пористости покрытия на температуру поверхности подложки в зоне контакта с покрытием в процессе теплового анализа дает возможность использования данного метода для подбора технологического режима напыления с целью снижения пористости получаемого покрытия.

ВЫВОДЫ

В работе выявлена приемлемость идентификации прочности сцепления покрытия с подложкой по изменению температуры покрываемой поверхности подложки на основе решения обратной задачи нестационарной теплопроводности с использованием в качестве исходных данных математического описания тепловой обстановки на тыльной (непокрываемой) поверхности подложки.

Экспериментальные исследования прочности сцепления покрытия с подложкой, проведенные по штифтовой методике на образцах-свидетелях, и результаты решения ОЗТ, основанные на измерениях температуры и ее градиента на тыльной стороне подложки для различных групп образцов, выявили зависимость температуры поверхности подложки в зоне контакта с покрытием при нагревании образца со стороны покрытия от прочности сцепления покрытия с подложкой. Это обосновывает возможность использования описанного здесь метода неразрушающего контроля прочности сцепления покрытия.

Исследования микротвердости и пористости образцов показали высокую чувствительность

этого метода и возможность его использования для подбора технологического режима напыления с целью снижения пористости получаемого покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гареев Р. Р., Цирельман Н. М.** Контроль прочности сцепления плазменного покрытия с подложкой неразрушающим тепловым методом // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 7 (54). С. 11–15.
2. **Шуп Т.** Прикладные численные методы в физике и технике. М.: Высшая школа, 1990. 239 с.
3. **Цирельман Н. М.** Прямые и обратные задачи тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 2005. 392 с.

ОБ АВТОРАХ



Гареев Руслан Радикович, аспирант. Дипл. инж. по технологии машиностроения (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. численных аналитических экспериментальных исследований в области ТМО.



Цирельман Наум Моисеевич, проф. каф. АТиТ. Дипл. инж.-мех. (ОТИПХАП г. Одесса, 1963). Д-р техн. наук (КГТУ им. Туполева, 1995). Иссл. в обл. численных аналитических экспериментальных исследований в области ТМО.