

УДК 620.192.34

Р.Р. ГАРЕЕВ, Н.М. ЦИРЕЛЬМАН

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Получены новые результаты в отношении использования решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) при зависящих от температуры свойствах материала подложки для идентификации прочности сцепления покрытия с подложкой. Экспериментальные исследования прочности сцепления покрытия с подложкой проведённые на разрывных машинах и результаты решения ОЗТ, подтвердили возможность реализации такого метода неразрушающего контроля. Исследования микротвёрдости и пористости образцов показали высокую чувствительность метода и возможность его использования для подбора технологического режима напыления с целью снижения пористости получаемого покрытия.

Ключевые слова: прочность сцепления плазменного покрытия, тепловой неразрушающий контроль, обратная задача нестационарной теплопроводности.

Введение

В работе [1] нами была показана возможность суждения о прочности сцепления покрытия с подложкой по изменению температуры поверхности подложки в зоне контакта с покрытием при нагревании образца со стороны покрытия. При этом зависимость этой температуры от времени устанавливалась из решения нелинейной обратной задачи нестационарной теплопроводности (ОЗТ) с использованием в качестве исходных данных математического описания тепловой обстановки на тыльной (непокрываемой) поверхности подложки с учётом зависимости свойств её материала от температуры.

Необходимо обратить внимание на то, что при аналитическом решении граничной ОЗТ не нужно знать начального распределения температуры в теле, что является несомненным достоинством метода [2].

Решая эту задачу, мы находим температуру в точках с координатами $x > 0$ по устанавливаемой в эксперименте временной зависимости температуры от времени $f(\tau)$ и её градиента $\varphi(\tau)$ на тыльной стороне подложки (рис. 1).

Численными методами была выявлена приемлемость идентификации прочности сцепления покрытия с подложкой данным методом.

Проведённые на разрывных машинах экспериментальные исследования прочности сцепления покрытия с подложкой подтвердили этот факт.

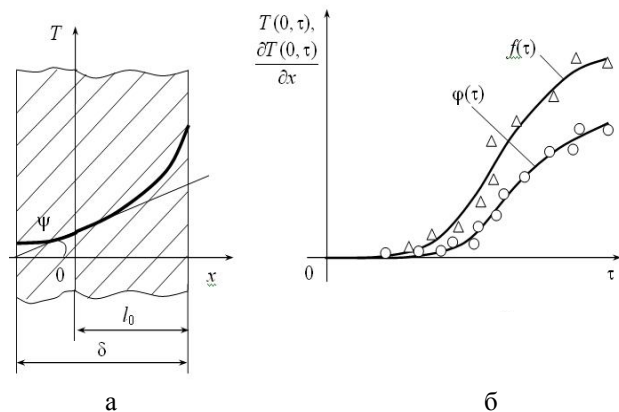


Рис. 1. Распределение температур в подложке в фиксированный момент времени (а) и вид функции зависимости температуры от времени $f(\tau)$ и её градиента $\varphi(\tau)$ в точке $x = 0$ (б)

В настоящей работе приводятся результаты дальнейшего исследования свойств полученных покрытий.

В них нами были получены новые результаты, более полно раскрывающие возможности метода.

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. 2).

После этого полученные поверхности шлифовались, потом полировались и были протравлены раствором соляной кислоты. Фотографии образцов приведены на рис. 3.

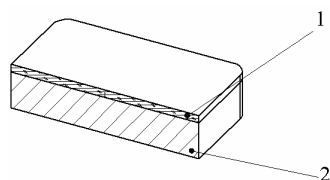


Рис. 2. Образец разрезанный для проведения тепловых исследований:
1 – покрытие, 2 – подложка

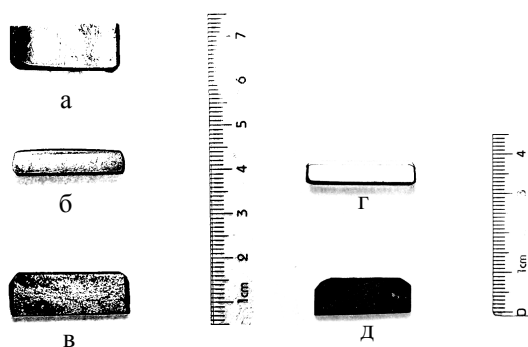


Рис. 3. Фотографии разрезанных образцов:
а – вид образцов снизу (непокрытая сторона);
б, г – «шлифы» образцов;
в, д – вид образцов сверху (покрытие)

1. Исследование микротвёрдости образцов

Для исследования микротвёрдости 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. Микротвёрдость определялась по результатам измерения диагонали отпечатка от алмазной пирамидки, при нагрузке 0,1 кг в течение 15 секунд.

Микротвёрдость определялась в плоскости разреза, в трёх 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 границы, точка 4 – посередине подложки, точка 5 – на расстоянии 1 мм от непокрытой поверхности подложки.

Результаты исследования трёх образцов из трёх групп показаны на рис. 4 – 6. Эти группы образцов отличались друг от друга технологическими режимами напыления плазменного покрытия. Первая и вторая группы образцов напылялись на расстоянии 150 и 130 мм от среза сопла плазмотрона соответственно. Вследствие этого наблюдался значительный перегрев покрытия образцов второй группы, измеренный пирометром в процессе напы-

ления, 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 плазмотрона, что, предположительно, приводило к переохлаждению частиц напыляемого материала в процессе подлёта к подложке и, как следствие, к ухудшению прочности сцепления покрытия с подложкой. Остальные параметры технологического режима напыления не менялись. 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 плазмотрона.

Механические испытания на адгезионную прочность, проведённые в лаборатории ФГУП «ММПШ «САЛЮТ» (г. Москва) по методике, принятой в авиационной промышленности, и результаты решения ОЗТ, основанные на измерениях температуры на теплоизолированной тыльной стороне подложки для различных групп образцов, показали высокую чувствительность зависимости температуры поверхности подложки в зоне контакта с покрытием при нагревании образца со стороны покрытием от прочности сцепления покрытия с подложкой.

На рис. 4 – 6, представленных ниже, приведены результаты исследования микротвёрдости образцов.

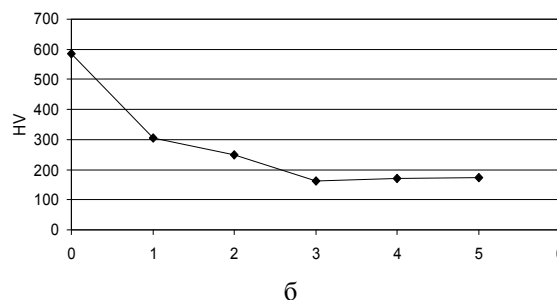
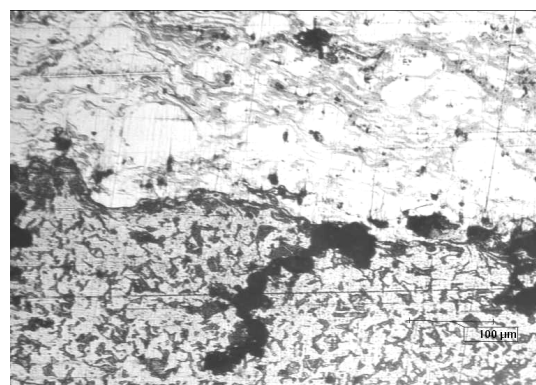
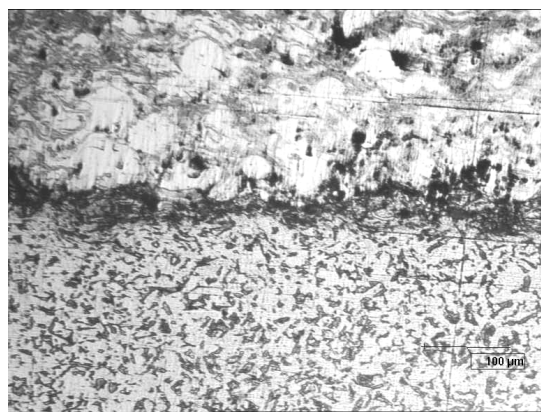
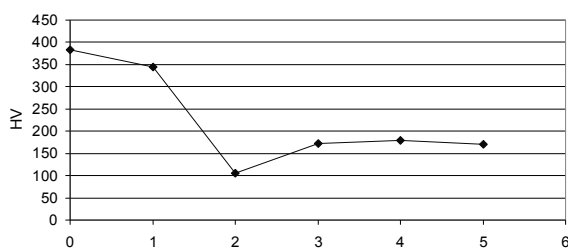


Рис. 4. Результаты исследования одного из образцов первой группы: а – фотография плоскости разреза образца (стократное увеличение); б – твёрдость по Викерсу, измеренная на этом образце

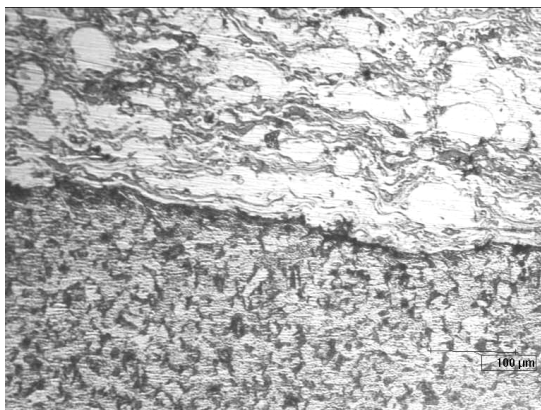


а

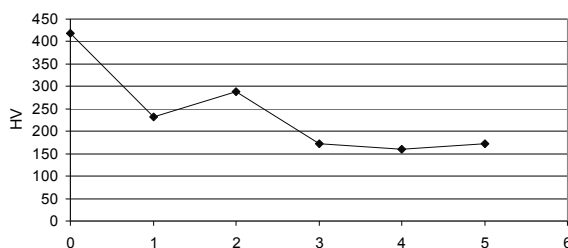


б

Рис. 5. Результаты исследования одного из образцов второй группы: а – фотография плоскости разреза образца (стократное увеличение); б – твёрдость по Викерсу, измеренная на этом образце



а



б

Рис. 6. Результаты исследования одного из образцов третьей группы: а) фотография плоскости разреза образца (стократное увеличение); б) твёрдость по Викерсу, измеренная на этом образце

На рис. 4 – 6. верхняя часть фотографии – это покрытие, а нижняя – подложка.

Суммируя результаты измерения микротвёрдости образцов, можно констатировать следующее:

- нагревание в процессе напыления не повлияло на свойства материала подложки, т.к. микротвёрдость подложки на всех образцах оказалась одинакова,

- микротвёрдость 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 микротвёрдости покрытия на образцах первой группы, но требуются дополнительные экспериментальные данные для подтверждения последнего суждения.

2. 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^{\times} – 500^{\times} крат при цифровом увеличении на мониторе $\sim 200^{\times}$ – 2000^{\times} крат. Наибольшее количество пор соответствует оптическому увеличению в 50^{\times} крат. Вместе с тем, наибольшее разрешение, близкое к теоретическому ~ 0.2 мкм, соответствует оптическому увеличению в 1000^{\times} крат. Оптимальным оптическим увеличением с точки зрения выборки данных и разрешения изображения в нашем случае оказалось 100^{\times} крат, поскольку предварительный анализ минимального размера пор соответствовал величине ~ 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 пересчитывался 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 связано, по-видимому, с неоднородностью размеров пор (D_{min} , D_{cp} и D_{max}) и их объемной доли.

Приводимые ниже рис. 7 – 9 и данные табл. 1 демонстрируют результаты исследования микроструктуры покрытия образцов первой группы, табл. 2 - второй группы и табл. 3 - третьей группы.

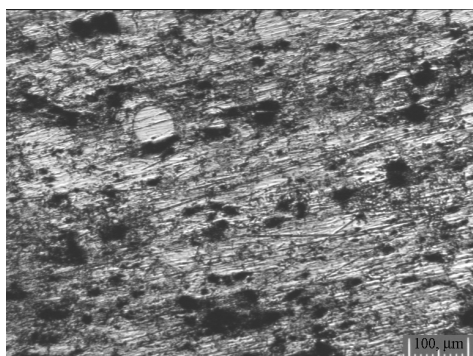


Рис. 7. Микроструктура пористой поверхности слоя для образца из первой группы

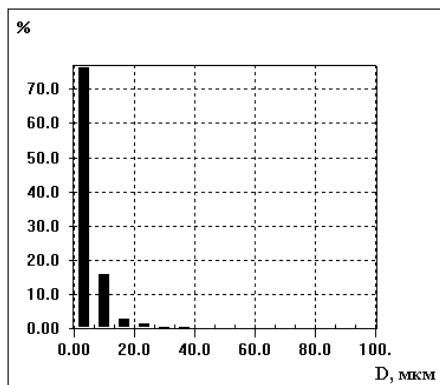


Рис. 8. Гистограмма распределения пор по размерам для образца из первой группы

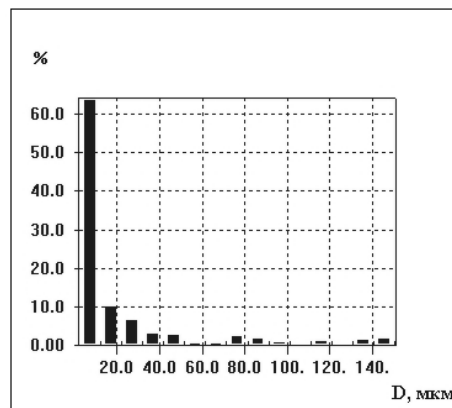


Рис. 9. «Суммарная» гистограмма распределения пор по размерам для образца из первой группы

Таблица 1

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

№	Объемная доля пор, %	D_{min} , мкм	D_{cp} , мкм	D_{max} , мкм
00	27,3	2,3	6,5	150,5

Таблица 2

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

№	Объемная доля пор, %	D_{min} , мкм	D_{cp} , мкм	D_{max} , мкм
00	16,4	2,3	6,3	120,8

Таблица 3

Объемная доля пор и их характерные параметры для образца № 13

№	Объемная доля пор, %	D_{min} , мкм	D_{cp} , мкм	D_{max} , мкм
00	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 даёт возможность использования данного метода для подбора технологического режима напыления с целью снижения пористости получаемого покрытия.

Выводы

Экспериментальные исследования прочности сцепления покрытия с подложкой проведённые по штифтовой методике на образцах-свидетелях и результаты решения ОЗТ, основанные на измерениях температуры и её 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 даёт возможность реализовать метод неразрушающего контроля прочности сцепления покрытия. Исследования микротвёрдости и пористости образцов показали высокую чувствительность метода и возможность его использо-

вания для подбора технологического режима напыления с целью снижения пористости получаемого покрытия.

Литература

1. Гареев Р.Р. Контроль прочности сцепления плазменного покрытия с подложкой неразрушающим тепловым методом / Р.Р. Гареев, Цирельман Н.М. // *Авиационно-космическая техника и технология: науч.-техн. журнал.* – 2008. – № 7 (54). – С. 11–15.
2. Цирельман Н.М. Прямые и обратные задачи теплопереноса / Н.М. Цирельман. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 392 с.

Поступила в редакцию 7.04.2009

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Ю.М. Ахметов, зам. Генерального директора ОАО «НИИТ», Уфа, Россия.

МЕТОД НЕРУЙНИВНОГО КОНТРОЛЮ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ВИРІШЕННЯ ЗВОРОТНИХ ЗАВДАНЬ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Р.Р. Гареев, Н.М. Цирельман

Отримані нові результати відносно використання вирішення зворотних завдань теплопровідності (ОЗТ) при залежних від температури властивостях матеріалу підкладки для ідентифікації міцності зчеплення покриття з підкладкою. Експериментальні дослідження міцності зчеплення покриття з підкладкою проведені на розривних машинах і результати вирішення ОЗТ, підтвердили можливість реалізації такого методу неруйнівного контролю. Дослідження микротвердості і пористості зразків показали високу чутливість методу і можливість його використання для підбору технологічного режиму напылення з метою зниження пористості отриманого покриття.

Ключові слова: адгезія плазмового покриття, тепловий неруйнуючий контроль, зворотне завдання нестационарної теплопровідності.

METHOD OF NONDESTROYING QUALITY CONTROL OF PLASMA COVER ADHESION WITH SUBSTRATE ON THE BASIS OF THE INVERSE HEAT TRANSFER PROBLEM SOLUTION

R.R. Gareyev, N.M. Tsirelman

New results concerning using of the inverse heat transfer problem (IHTP) solution for nondestroying quality control of plasma cover adhesion with substrate are received on the assumption of substrate material properties depending on temperature. Experimental researches of the plasma cover adhesion with substrate spent on tearing machine and results of IHTP solution have confirmed possibility of such nondestroying control method realization. Researches of microhardness and porosity of samples have shown high sensitivity of the method and possibility of its use for plasma covering technological conditions selection for the purpose of decrease cover porosity.

Key words: cover adhesion, non-destructive thermal control, inverse heat transfer problem.

Гареев Руслан Радикович – аспирант кафедры технология машиностроения Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: RuslanGR@ya.ru.

Цирельман Наум Моисеевич – д-р техн. наук, профессор, преподаватель кафедры ТАРД Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: Tard@ugatu.ac.ru.