

УДК 621.793:620.17

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ КРИТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

В. А. БОГУСЛАЕВ^{а+}, В. Л. ГРЕШТА^б, Д. В. ТКАЧ^б, В. И. КУБИЧ^б, Е. Г. СОТНИКОВ^а,
З. В. ЛЕХОВИЦЕР^а, А. В. КЛИМОВ^б

В работе проведён первоначальный этап комплексного многофакторного исследования износостойкости теплозащитных уплотнительных покрытий сектора турбины газотурбинного двигателя (ГТД) в условиях действия критических нагрузок без учёта влияния структурно-фазовых превращений, которые могут протекать в материалах покрытий при запуске двигателя и последующем длительном воздействии высоких температур (порядка 1150 °С) на детали ГТД. В соответствии с ГОСТ 30480–97 было проведено моделирование процесса изнашивания свойственного натурному трибосопряжению и получены фрикционно-износные характеристики (коэффициент трения, интенсивность износа, работа трения) при заданных условиях для дальнейшего анализа процесса изнашивания и получения исходных данных для натурных испытаний. Полученные результаты триботехнических испытаний позволяют сделать предварительные выводы о влиянии легирования уплотняющих покрытий на основе никеля иттрийсодержащими лигатурами на их поведение в процессе фрикционного взаимодействия и предложить покрытия, которые могут быть рекомендованы к проведению последующих этапов комплекса исследований в условиях высокотемпературного воздействия, сопровождающегося объёмными изменениями изделий и покрытий в результате структурно-фазовых превращений в многокомпонентных составах покрытий.

Ключевые слова: уплотняющие покрытия, истираемые материалы, износостойкость, газотурбинный двигатель.

Введение. При производстве газотурбинных двигателей особое внимание всегда уделялось повышению его коэффициента полезного действия (КПД) и, соответственно, снижению потребления топлива [1, 2]. Поскольку величина радиального зазора между ротором и статором значительно влияет на КПД турбины [3], его снижение позволяет наименее затратным способом решить данную проблему. Однако, в процессе эксплуатации двигателя возможны ситуации соприкосновения ротора и статора, что может привести к разрушению двигателя.

Для обеспечения необходимой величины зазоров наиболее целесообразно применять уплотнительные покрытия различных составов в зависимости от конкретных условий работы той или иной детали [4]. Покрытия, применяемые в турбинах, должны соответствовать ряду противоречивых требований, таких как высокая жаростойкость, адгезия покрытия с основным материалом и эрозионная стойкость в условиях воздействия агрессивной высокотемпературной газовой среды, низкая работа врезания, что обеспечит минимальные зазоры и позволит существенно уменьшить износ торцевой поверхности лопатки [4–7].

Уплотнительные покрытия на основе никеля и твёрдой смазки широко применяются при производстве деталей газотурбинных двигателей [6–8]. Однако, при температурах порядка 1150 °С применение покрытий такого типа не может гарантировать сохранение стабильной величины зазора в процессе эксплуатации, поскольку их функциональные характеристики сохраняются при температурах до 900 °С. Дальнейшее повышение температуры в турбине может приводить к ускорению развития газовой корро-

а АО “Мотор Сич”. Украина, 69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15.

б Запорожский национальный технический университет. Украина, 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: darynka.odarkivna@gmail.com.

зии и дальнейшему разрушению покрытия. Следовательно, разработка уплотняющего покрытия, которое могло бы успешно применяться при температурах 1100–1200 °С является актуальной задачей.

Свойства и работоспособность покрытий на основе никеля, с точки зрения сопротивления износу, значительно зависят от формирования в покрытии определённой структуры с наличием тугоплавких интерметаллидов и нитридов, что может в значительной мере повысить температурные режимы и эрозионную стойкость работающих деталей. В работах [8, 9] показано, что в процессе газопламенного нанесения покрытий, отличающихся по составу, формируются различные интерметаллиды, теоретически отличающиеся сопротивлением износу. Поскольку какая-либо информация о влиянии образующихся фаз на сопротивление покрытий высокотемпературному износу отсутствует, необходимо установить особенности проявления триботехнических характеристик покрытий опытных составов в эксплуатационных условиях работы узлов трения [9].

Цель работы — получение исходных сведений о характере проявления триботехнических характеристик покрытий без учёта влияния структурно-фазовых превращений, обусловленных высокотемпературным воздействием в рамках первого этапа исследований.

Материалы и методы исследований. В соответствии с требованиями ГОСТ 30480–97 методика исследования поведения материалов покрытий предполагает проведение лабораторных испытаний на малогабаритных образцах в условиях моделирования воспроизведения заданного процесса изнашивания свойственного натурному трибосопряжению с целью получения фрикционно-износных характеристик при заданных условиях для анализа процесса изнашивания и получения исходных данных для натуральных испытаний. При этом классически в группу триботехнических измеряемых величин включены: коэффициент трения; интенсивность износа; работа сил трения, и в группу спектра нагружения — продолжительность нагружения, динамическая составляющая нагрузки [10].

Поскольку фрикционное взаимодействие контактных поверхностей рассматриваемого трибосопряжения значимо с точки зрения эффективного протекания процесса изнашивания, что обуславливает последующую сплошность их прилегания, и соответственно качество уплотнения, то наряду с классическими триботехническими величинами предполагалось использовать их приведённый вид — удельное время постоянства коэффициента трения [11].

В основе проведения триботехнических испытаний покрытий лежит предварительный натяг в контакте между сплошной торцевой неподвижной поверхностью пластины и прерывистым профилем вращающегося диска, имеющего равномерно расположенные выступы треугольной формы с усечённой вершиной. Такое взаимодействие элементов трибосопряжения “диск—пластина” способно воспроизвести и физически смоделировать контактное взаимодействие элементов лабиринтного газодинамического уплотнения между ротором и статором в турбине ГТД. Особенностью взаимодействия элементов моделируемого лабиринтного уплотнения является то, что на начальном этапе происходит приработка покрытия, сформированного на внутренней поверхности статора, сопровождаемая внедрением выступов на внешней части ротора на определённую глубину. Глубина определяется технологическими параметрами сборки узла и может составлять до 300 мкм.

Для проведения испытаний использовались покрытия на основе никеля № 1–5, состав которых приведён в табл. 1, отличающиеся компонентным и фазовым составом. Покрытия наносились газопламенным способом на торцы пластин из жаропрочного никелевого сплава толщиной 2,0–2,5 мм размером 15×15×3 (рис. 1, а). Количество образцов — пластин составляло 5 для каждого из оцениваемых покрытий. Диски изготавливались из жаропрочного сплава на основе никеля диаметром $D = 50$ мм, толщиной $b = 14$ мм (рис. 1, б, в). На наружной поверхности диска выполнялись три равномерно располо-

Таблица 1. Состав исследуемых покрытий

№ состава	Состав покрытия	Содержание иттрия
№ 1	КНА-82 + NiY	0,3
№ 2	КНА-82 + Y	2,1
№ 3	КНА-82 + CoNiCrAlY	0,1
№ 4	КНА	—
№ 4	КНА-82	—

женные канавки на глубине 4 мм с углом образующих сторон 30° с шагом по вершинам выступов 3,5 мм и его шириной 0,5 мм.

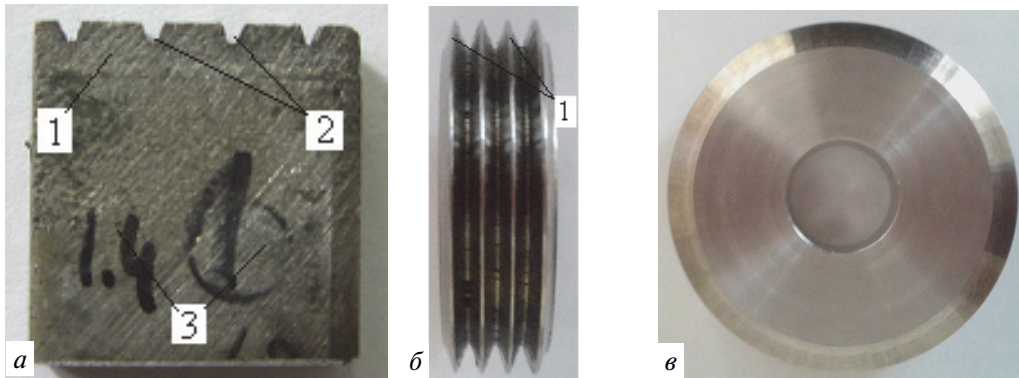


Рис. 1. Образцы модельного трибосопряжения: *а* — пластина с покрытием: 1 — покрытие; 2 — результат изнашивания; 3 — тело пластины; *б* — диск, вид спереди: 1 — выступы профиля; *в* — диск, вид сверху

Моделирование трибологического контакта элементов лабиринтного уплотнения производилось на машине СМЦ-2 для испытания материалов на трение и износ. При этом диски крепились на нижнем валу, а для установки пластин в держателе подвижной каретки дополнительно была изготовлена оправка, которая фиксировалась в центре держателя винтами, торцевые поверхности которых при последующем ввинчивании в тело оправки закрепляли размещённую в её прорези пластину.

Предварительные результаты исследования позволили предложить следующий порядок проведения триботехнических испытаний. Основной акцент делался на создании предварительного минимального натяга между профилем диска и покрытием пластины. Схема взаимодействия элементов исследуемого трибосопряжения представлена на рис. 2. Натяг может быть автоматически устранён за счёт изнашивания покрытия на определённую глубину в пределах хода предварительно подпружиненной каретки 7, ограниченного упором верхнего рычага 3. Уравновешивающая сила разгрузки P_i контакта — предварительного натяга N_i может быть определена по динамометру 4, а ход — по показанию стрелки индикаторной измерительной головки. При этом обратный ход каретки будет определять глубину внедрения профиля в покрытие.

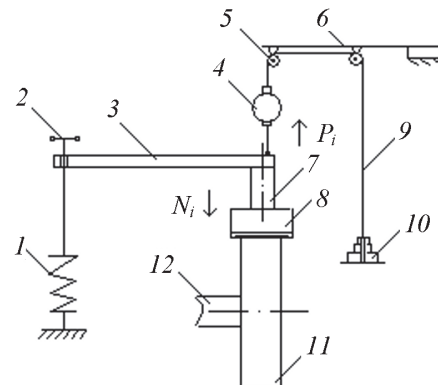


Рис. 2. Схема нагружения контакта: 1 — пружина нагружающего устройства; 2 — винт; 3 — рычаг; 4 — динамометр; 5 — ролик; 6 — балка; 7 — подвижная каретка; 8 — образец — пластина; 9 — трос; 10 — грузы; 11 — образец — диск; 12 — нижний вал машины трения

Частота вращения диска, исходя из технических возможностей машины трения — 300, 500, 1000 мин^{-1} , выбиралась минимальной — 300 мин^{-1} .

Вследствие проведённых экспериментальных исследований представляется возможным:

- термометрированием определить относительное температурное состояние образца пластины;
- в соответствии с трибограммами установить время изнашивания, коэффициент трения;
- по результатам измерения массы образцов-пластин с точностью до 10^{-2} г оценить массовый износ, а с учётом рассчитанного пути трения — интенсивность изнашивания материала покрытия;
- при оценке соотношения углов, образующих канавки профиля диска и профиля покрытия при его изнашивании определить полноту прилегания формирующихся приповерхностных структур при трении.

За основу для расчётно-экспериментальной оценки осреднённой энергетической интенсивности изнашивания покрытий по массе в соответствии с ГОСТ 10851–94 [12] использовано выражение (1), которое с учётом особенностей описанного цикла изнашивания преобразовано в выражение (2) следующим образом.

$$I_m = \frac{10^6(m - m_1)}{f_{cp}NL}, \text{ мкг/Дж}, \quad (1)$$

где m — масса образца до испытаний, г; m_1 — масса образца после испытаний, г; f_{cp} — среднее арифметическое коэффициентов трения за цикл испытания (для всех ступеней испытания); N — усилие прижатия образца, Н; L — путь трения за весь цикл испытания, м.

Тогда, с учётом определения работы сил трения на каждой стадии изнашивания интенсивность изнашивания определится в соответствии с выражением:

$$I_m \approx \frac{2\Delta m}{N_1 L_1 f_1 + \frac{N_2}{n} \sum_{i=1}^n f_j L_j}, \text{ мкг/Дж}, \quad (2)$$

где Δm — массовый износ покрытия, мг; f_j — текущее значение коэффициента трения скольжения на второй стадии цикла; L_j — путь трения, на котором проявляется коэффициент трения f_j , м; n — количество участков трибограммы пути трения со значимым значением коэффициента трения f_j ; N_1 — максимальное усилие прижатия образца — пластины при сдвиге; N_2 — остаточное усилие прижатия образца — пластины, Н; L_1 — путь трения, на котором проявлялся градиент действия максимальной силы прижатия, м.

Полученное выражение, безусловно, не нарушает физический смысл энергетической интенсивности изнашивания, однако представляет собой не абсолютный, а относительный оценочный характер её возможного изменения. Это объясняется тем, что не раскрывается интегральная работа силы трения при градиентном уменьшении силы прижатия. Однако представленный подход позволяет дать сравнительную оценку процесса изнашивания исследуемых покрытий с учётом особенностей контактного взаимодействия. Более того графо-аналитическая оценка характера изменения представленной характеристики изнашивания (её минимальное значение) и поведения коэффициента трения (стабильность текущих значений, что отображает наличие фрикционных связей между взаимодействующими поверхностями), позволит определить состав, обуславливающий наилучшее уплотнение при моделируемых режимах испытаний. Также, качество уплотнения, создаваемого контактным взаимодействием может быть оценено показателем K_y , определяющим отношение средней площади сечения выступа профиля диска S_d и средней площади сечения профиля, образованного в покрытии S_k на глубине максимального внедрения (4). Соответственно при $K_y \rightarrow 1$ состав обеспечивает качественное уплотнение.

$$K_y = \frac{S_k}{S_d} = \frac{a_{cp} + b_{cp}}{a_{cp1} + b_{cp1}} = \frac{a_{cp} + b_{cp}}{2a_{cp1} + 0,53h_{kcc}}, \quad (4)$$

где a_{cp} — длина нижнего основания трапеции профиля в покрытии, мм; b_{cp} — длина верхнего основания трапеции профиля в покрытии, мм; a_{cp1} — длина верхнего основания трапеции профиля диска; h_{kcc} — высота трапеции профиля в покрытии (глубина внедрения диска), мм; $0,53 = \text{tg}(\alpha/2)$, $\alpha = 30^\circ$.

Удельное время постоянства коэффициента трения рассматривается как по отношению к его минимальному, так и максимальному значению на соответствующих участках трибограмм (рис. 3) в соответствии с выражением (4).

$$\frac{\bar{t}}{f_{\min}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{j=1}^m f_{i_{\min}}}, \quad (4)$$

где t_i — время установившегося сопротивления вращению, с; $f_{i,\min}$ — минимальное (максимальное) значение коэффициента трения на соответствующем участке за время t_i .

Результаты исследования и их обсуждение. В результате исследования были установлены ряд особенностей поведения элементов модельного трибосопряжения. При контактом взаимодействии поверхностей под действием градиентного уменьшения нормальной нагрузки послойное фрикционное разрушение покрытий пластин при внедрении выступов диска проявляется неравномерно. Большая часть износа припадает на время действия максимальных нагрузок. Такой эффект хорошо визуализировался, сопровождался акустическим излучением в виде устойчивого писка, и соответствовал пиковым значениям момента сопротивления вращению диска, что фиксировалось самописцем в виде трибограмм. При разгрузке контакта до минимального значения наблюдаемые эффекты исчезали, а трибограммы отображали характер поведения структур покрытий составов № 1–5, который представлялся разнохарактерным, рис. 3, а–д.

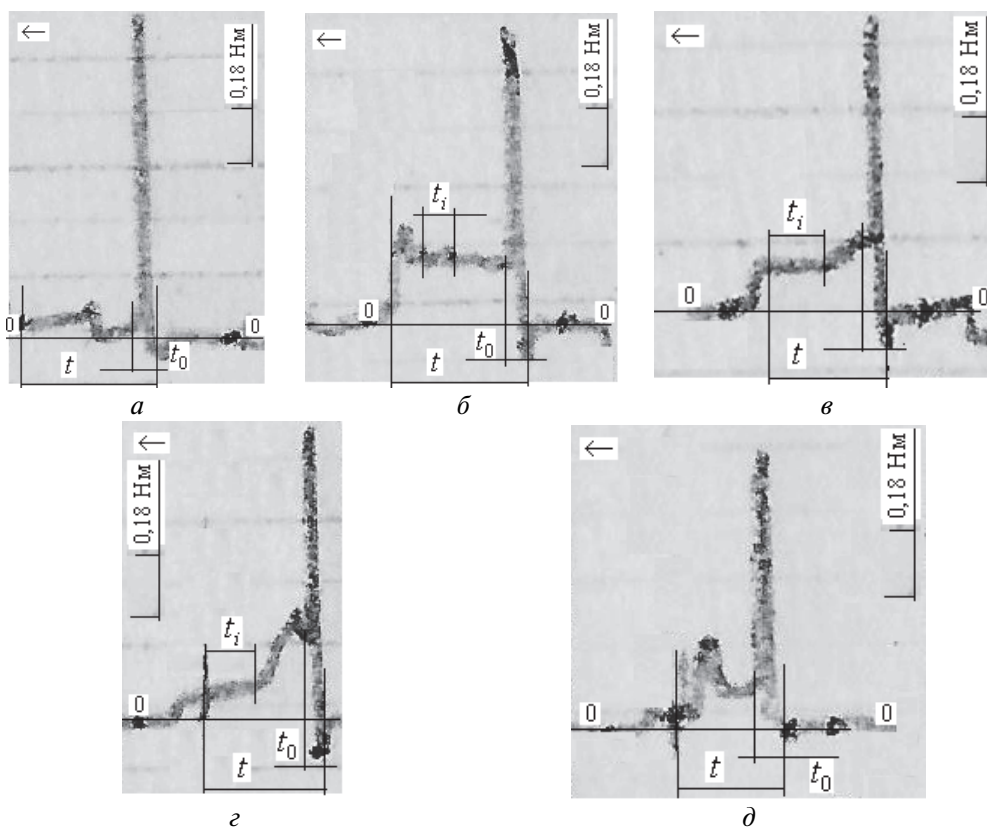


Рис. 3. Трибограммы испытания покрытий: а — состав № 1; б — состав № 2; в — состав № 3; г — состав № 4; д — состав № 5: t — общее время испытания образца, с; t_0 — время активного изнашивания (проявление мгновенной интенсивности изнашивания), с; t_i — время установившегося сопротивления вращению, с; (0 — 0) — нулевое значение сопротивления вращению; ← — направление исчисления времени испытания

Исходя из приведённого, для количественной оценки рассматриваемого процесса изнашивания предлагается использовать осреднённую энергетическую интенсивность изнашивания по массе. Эта характеристика изнашивания наряду с линейной, объёмной и массовой интенсивностью изнашивания на соответствующем пути трения также достаточно часто применяется при исследовании трибологического состояния узлов трения, например, для оценки фрикционных материалов накладок тормозных механизмов [13]. В рассматриваемом контакте классическое [14] определение выбранной характеристики неприемлемо, поскольку износ неравномерен по времени испытания за счёт действия различных сил трения, а сам цикл изнашивания покрытия представляется двухстадийным. Причём первая стадия обусловлена распространением градиента максимальной силы трения покоя при сдвиге,

при котором имеет место проявление мгновенной интенсивности изнашивания, а вторая стадия проявлением сил трения движения, что обуславливает среднюю интенсивность изнашивания.

В результате обработки трибограмм (рис. 3) был получен графический вид вероятной функции среднестатистических значений коэффициента трения, свидетельствующей о наличии установившихся процессов изнашивания в течение определённых интервалов времени, который приведён на рис. 4. Функции построены для второй стадии цикла испытаний. При этом для каждого из построенных прямолинейных участков отклонения от средних значений составляют:

– для коэффициента трения: состав № 1 — 56%; состав № 2 — 20,4%; состав № 3 — 15,4%; состав № 4 — 23,5%; состав № 5 — 38%;

– для длительности интервалов времени: состав № 1 — 35%; состав № 2 — 39,6%; состав № 3 — 42,9%; состав № 4 — 39,3%; состав № 5 — 23%.

В целом соотношение полей отклонений указывает на неоднозначность численных значений рассматриваемых параметров и возможность выполнения индивидуальной оценки для каждой из построенных функций.

Анализ данных приведённых на рис. 4 свидетельствует о том, что, во-первых, имеет место проявления существенных отличий в характере поведения структур материалов покрытий. Для составов № 2 и № 5 характерны всплески коэффициента трения с последующим снижением до значений близких к исходным, причём для состава № 5 всплеск в 3,5 раза больше. Во-вторых, для составов № 3, 4 свойственна тенденция уменьшения коэффициента трения, причём для состава № 4 это проявляется с большей скоростью, и конечное значение в 2,5 раза меньше. В-третьих, имеют место выраженные максимальные значения коэффициента трения для составов № 2–4 в начале стадии испытания, находящиеся изначально в интервале от 0,68 до 0,88 и отличительно снижающиеся с различной скоростью до 0,56 для состава № 3, для состава № 4 до 0,22. В-четвертых, фиксируется проявление триботехнических характеристик, которые со значимой точностью не регистрируются измерительным оборудованием, что характерно для состава № 1.

По результатам анализа изменения функции среднестатистических значений коэффициента трения графики, приведённые на рис. 4 преобразованы в графические зависимости, отображающие общий характер его изменения, рис. 5. Это позволяет более отчётливо представить рассматриваемую характеристику трения.

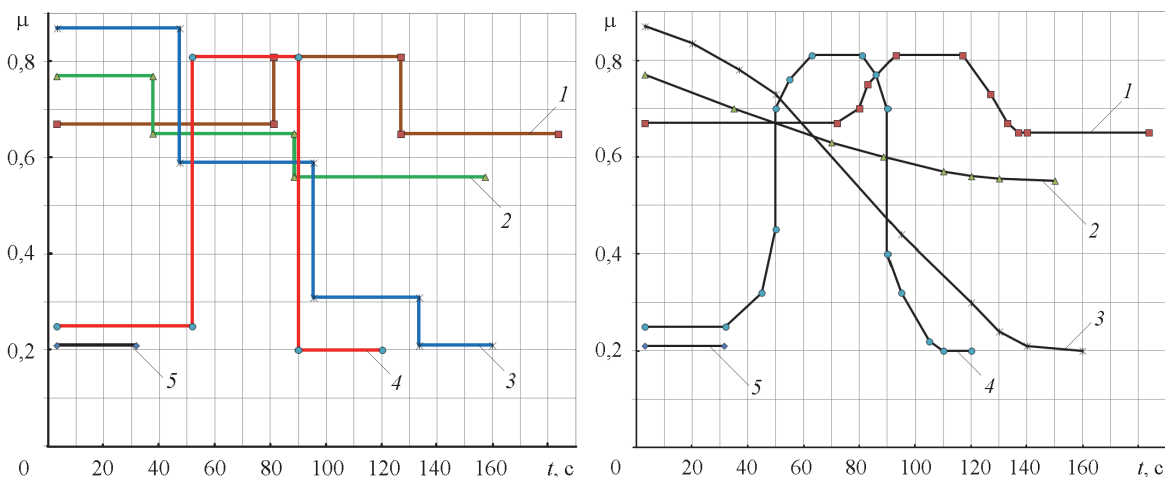


Рис. 4. Функции среднестатистических значений коэффициента трения μ в сопряжениях по времени испытания t : 1 — состав № 2; 2 — состав № 3; 3 — состав № 4; 4 — состав № 5; 5 — состав № 1

Рис. 5. Зависимость коэффициента трения μ в сопряжениях по времени испытания t : 1 — состав № 2; 2 — состав № 3; 3 — состав № 4; 4 — состав № 5; 5 — состав № 1

Диаграммы триботехнических параметров испытаний представлены на рис. 6.

Геометрические размеры профилей определялись с использованием программы КОМПАС-3D V14 путём импортирования рисунков соответствующих образцов, рис. 7.

В результате обработки геометрических размеров трапецевидных профилей покрытий, в соответствии с выражением (4) для коэффициента уплотнения получены результаты, приведённые в табл. 2. Также приведён коэффициент ширины контакта $K_{ш}$, характеризующий полноту фрикционного взаимодействия в зоне максимального сближения, т. е. уплотнение по вершине или по горизонтали.

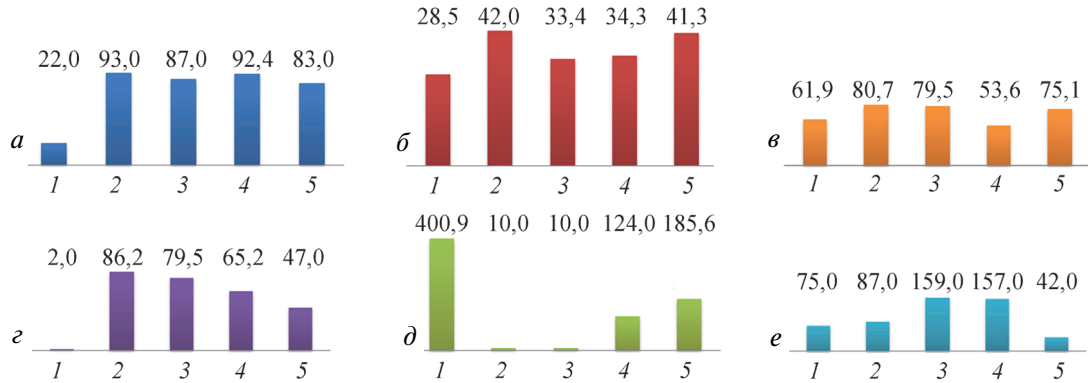


Рис. 6. Диаграммы триботехнических параметров испытания покрытий: *a* — длительность регистрируемого фрикционного взаимодействия, %; *b* — время активного изнашивания, с; *v* — удельное время максимального сопротивления при сдвиге за период активного изнашивания, с; *z* — удельное время постоянства максимального коэффициента трения, с; *d* — удельное время постоянства минимального коэффициента трения, с; *e* — энергетическая интенсивность изнашивания, мкг/Дж.

1–5 — сплавы покрытий №№ 1–5, соответственно

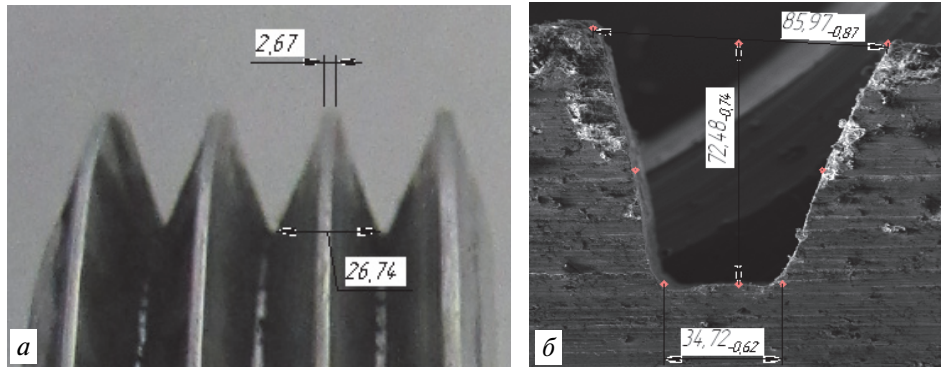


Рис. 7. Профили образцов с размерами: *a* — образец — диск; *b* — образец — пластина

Таблица 2. Геометрические параметры взаимодействия профилей образцов

Наименование	Состав покрытия				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Коэффициент K_y	1,41	1,37	1,35	1,38	1,37
Длина нижнего основания, $a_{ср}$, мм	0,52	0,41	0,38	0,38	0,41
Коэффициент $K_{ш} = a_{ср}/a_{1ср}$	1,73	1,37	1,27	1,27	1,37

Для комплексной оценки рассматриваемых составов, по условиям проводимых триботехнических испытаний, в соответствии с обозначенными параметрами необходимо учитывать следующие аспекты.

Во-первых, материал первоначально должен быть податливым на внедрение твёрдого тела, что должно сопровождаться снижением интенсивности поверхностных разрушений, т. е. сопротивление, обусловленное предварительным натягом, до определённого момента должно уменьшаться до стабилизации. Такой эффект отобразит коэффициент трения. Причём, чем однороднее характер

его изменения и ниже значение в конце стадии внедрения, тем меньше дальнейшая предрасположенность контактных зон к накоплению дефектов, приводящих к последующим разрушениям.

Во-вторых, масса изношенного материала, приходящаяся на единицу работы силы трения должна быть минимальной, что обуславливается в первую очередь требованиями необходимой достаточной глубины внедрения и минимального зазора между поверхностями, образующими уплотнительный контур.

В-третьих, должен иметь место эффект граничного фрикционного контакта по площади в зоне максимального сближения поверхностей уплотнительного контура.

Исходя из обозначенного, материал должен рекомендательно соответствовать таким характеристикам:

– коэффициент трения — плавно снижающийся до минимального значения, с явно выраженной стабилизацией в конце (состав № 3, 4), рис. 5;

– длительность регистрируемого фрикционного взаимодействия, % — минимальная, что обуславливает завершение процесса изнашивания (состав № 1, 3, 5), рис. 6, а;

– время активного изнашивания, с — максимальное, что предопределяет полноту возможного внедрения с последующим минимальным изнашиванием (состав № 2, 3, 4, 5), рис. 6, б;

– удельное время максимального сопротивления при сдвиге, с — минимальное, что предопределяет склонность к накоплению усталостных деформаций, и в конечном итоге — лавинные разрушения (состав № 1, 4, 5), рис. 6, в;

– удельное время постоянства μ_{\max} , с — минимальное (состав № 3, 4, 5), рис. 6, г;

– удельное время постоянства μ_{\min} , с — среднее (состав № 2, 3, 4), рис. 6, д;

– энергетическая интенсивность изнашивания, мг/Дж — минимальная (состав № 1, 2, 5), рис. 6, е;

– коэффициент уплотнения K_y — минимальный (состав № 3), табл. 2;

– коэффициент ширины контакта $K_{\text{ш}}$ — минимальный (состав № 3, 4), табл. 2.

Таким образом, частота соответствия рассматриваемым параметрам составила:

– для состава № 1 — 3;

– для состава № 2 — 3;

– для состава № 3 — 7;

– для состава № 4 — 6;

– для состава № 5 — 5.

В соответствии с частотой проявления, наиболее полно указанным рекомендациям соответствуют составы № 3 и № 4, которые следует рекомендовать для реализации следующего этапа исследований износостойкости уплотняющих покрытий в условиях высокотемпературного воздействия, сопровождающегося объёмными изменениями изделий и покрытий в результате структурно-фазовых превращений в многокомпонентных составах покрытий.

Литература

1. **Кофман В. М.** Определение коэффициента полезного действия турбины ГТД по параметрам неравномерных газовых потоков // Вестник УГАТУ. Авиационная и ракетно-космическая техника. — 2012 (16), № 5(50), 28—40
2. **Dieter Sporer, Scott Wilson, and Mitchell Dorfman.** Ceramics for Abradable Shrouds Seal Applications // Proc. of 33rd Int. Conf. on Advanced Ceramics and Composites, January 2009, Florida, US
3. **Иноземцев А. А., Бажин С. В., Снитко М. А.** Вопросы оптимизации радиальных зазоров ТВД авиационного ГТД // Вестник двигателестроения. — 2012, № 2, 149—154
4. **Карпинос Б. С., Коровин А. В., Лобуныко А. П., Ведищева М. Ю.** Эксплуатационные повреждения турбореактивных двухконтурных авиационных двигателей с форсажной камерой сгорания // Вестник двигателестроения. — 2014, № 1, 18—24

5. **Bounazef M., Guessasma S., and Ait Saadi B.** The Wear, Deterioration and Transformation Phenomena of Abradable Coating BN–SiAl–Bounding Organic Element, Caused by the Friction between the Blades and the Turbine Casing // *Materials Letters*. — 2004 (**58**), 3375–3380
6. **Clegg M. A. and Mehta M. H.** NiCrAl/Bentonite Thermal Spray Powder for High Temperature Abradable Seals // *Surface and Coatings Technology*. — 1988 (**34**), 69–77
7. **Siyang Gao, Weihai Xue, Deli Duan, and Shu Li.** Tribological behaviors of Turbofan Seal Couples from Friction Heat Perspective under High-Speed Rubbing Condition // *Friction*. — 2016, no. 4(2), 176–190
8. **Сотников Е. Г., Леховицер З. В., Грешта В. Л., Климов А. В., Ткач Д. В.** Разработка состава теплозащитного покрытия на детали газотурбинных двигателей, работающих в условиях высоких температур // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2015, № 10(127), 6–10
9. **Богуслаев В. А., Жеманюк П. Д., Грешта В. Л., Сотников Е. Г., Леховицер З. В. и др.** Исследование жаростойкости теплозащитных уплотнительных покрытий при их легировании комбинированными лигатурами // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2017, № 8(143), 61–67
10. **Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования: ГОСТ 30480-97.** — [Дата введения в Украине 1999-07-01]. — М.: Из-во стандартов. — 1997
11. **Кубич В. И.** Безразмерный комплекс параметров оценки сближения поверхностей модельных трибосопряжений через смазочные слои // *Наука. Технологии. Производство*. — С. Петербург. — 2015, № 3(7), 75–79
12. **Изделия фрикционные из ретинакса. Технические условия: ГОСТ 10851-94.** — [Дата введения 1996-01-01]. — М.: Из-во стандартов. — 1995
13. **Голубев Ю. А., Иваненко В. В.** Метод определения зависимости энергетической интенсивности изнашивания тормозной накладки от температуры // *Трение и износ*. — 2009 (**30**), № 4, 355–358
14. **Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения: ГОСТ 27674-88.** — [Дата введения 1989-07-01]. — М.: Изд-во стандартов. — 1988

Поступила в редакцию.

Поступила в редакцию 10.11.17.

После доработки 06.11.18.

Принята к публикации 12.11.18.

Boguslaev V. A., Greshtha V. L., Tkach D. V., Kubich V. I., Sotnikov E. G., Lekhovitser Z. V., and Klimov A. V. **Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Sealing Heat Protective Coatings under Critical Loads.**

The initial stage of the complex multifactor study of the wear resistance of heat-shielding sealing coatings of the gas turbine engine (GTE) turbine sector under the influence of critical loads was carried out without taking into account the effect of structural-phase transformations that can occur in coating materials at engine start-up and subsequent long exposure to high temperatures (about 1150 °C). The technique used in accordance with the requirements of GOST 30480–97 assumed the performance of laboratory tests on small-size samples under simulation conditions for reproducing a given process of wear inherent to full-scale tribosystem in order to obtain frictional-difference characteristics (friction coefficient, wear rate, friction work) under given conditions for process analysis of wear and obtaining the initial data for field trials. The results of tribotechnical tests allow us to draw some preliminary conclusions regarding the choice of different coating compositions that can be recommended for the subsequent stages of the complex of durability studies of sealing coatings under high-temperature conditions, accompanied by volumetric changes in products and coatings as a result of structural phase transformations in multi-component coating compositions.

Keywords: sealing coatings, abradable materials, wear resistance, gas turbine engine.