



## ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СПЛАВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Fe

А. Л. БОРИСОВА, Ю. С. БОРИСОВ, Е. А. АСТАХОВ, доктора техн. наук, А. П. МУРАШОВ, канд. техн. наук, А. Н. БУРЛАЧЕНКО, Т. В. ЦЫМБАЛИСТАЯ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследования теплозащитных свойств плазменных и детонационных покрытий (двухслойных и градиентных), в которых в качестве керамической компоненты использован  $ZrO_2$ , стабилизированный  $Y_2O_3$ , а в качестве металлической — сплав системы Al–Cu–Fe, содержащий квазикристаллическую  $\psi$ -фазу.

*Ключевые слова:* плазменное напыление, детонационное напыление, диоксид циркония, квазикристаллический сплав системы Al–Cu–Fe, теплозащитные покрытия, детали двигателей внутреннего сгорания

Одним из современных путей повышения эффективности работы газотурбинных и дизельных двигателей, увеличения срока службы их компонентов является применение теплозащитных покрытий (ТЗП) [1–4], получивших практическое использование в газотурбинных двигателях (ГТД). В этом случае обычная конструкция ТЗП состоит из трех слоев: NiCrAlY — подслоя, обеспечивающий прочность сцепления ТЗП с поверхностью детали и защиту ее от окисления при рабочих температурах 900...1100 °С;  $Al_2O_3$  — промежуточный слой, служащий барьером для диффузии кислорода к подслою и обеспечивающий адгезию керамики с жаростойким подслоем, и внешний слой  $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ , отличающийся теплоизолирующими свойствами. Для нанесения таких покрытий применяют способы атмосферного плазменного напыления, плазменного напыления при сниженном давлении и электронно-лучевого испарения [1, 5]. В качестве материала деталей для ГТД используют жаропрочные никелевые и железные сплавы.

Другой областью применения ТЗП являются дизельные двигатели, где условия их работы и задачи отличаются от таковых в ГТД. Так, температура нагрева компонентов камеры сгорания в дизелях составляет 350...400 °С. Применение ТЗП позволяет повысить температуру газа в камере сгорания до 850...900 °С, что обеспечивает полноту сгорания топлива, снижение его расхода (на 15...20 %) и увеличение мощности двигателя (на 8 %) [3, 6].

Важнейшей задачей, решение которой связано с использованием ТЗП дизельных двигателей, является повышение экологической эффективности их работы путем снижения объема выбросов в

атмосферу. Результаты исследований показали возможность их уменьшения на 10...11 % [7]. В настоящее время актуальность этой задачи возрастает в связи с ужесточением требований к сокращению объема выбросов в соответствии с переходом в 2012 г. на новый показатель Евро VI [8]. Отличием ТЗП в дизельных двигателях от ГТД является также состав конструктивных материалов дизелей, где все больший объем занимают сплавы алюминия и титана.

Основными способами нанесения ТЗП на поверхность камеры сгорания дизелей является плазменное напыление. Условия формирования ТЗП и их эксплуатации на поверхности таких материалов различны по сравнению с жаропрочными сплавами деталей ГТД. Указанные различия в условиях работы ТЗП для ГТД и дизельных двигателей обуславливают необходимость применения для последних верхних теплоизоляционных слоев с большой толщиной (до 1 мм и более), изменение требований к материалу подслоя, которому не требуется противостоять высокотемпературному окислению и крипу, как в случае покрытий системы Me–Cr–Al–Y [1, 2, 6].

Таким образом, разработка новых составов ТЗП для применения в условиях работы дизельных двигателей и технологии их нанесения на поверхность алюминиевых и титановых сплавов представляет собой актуальную задачу для данной области техники.

В последнее время большой интерес исследователей и технологов вызывают сплавы с квазикристаллической структурой, прежде всего сплавы системы Al–Cu–Fe [9–11]. Так, сплав  $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ , по своему химическому составу отвечающий области существования квазикристаллической  $\psi$ -фазы, имеет такие характеристики, как низкая теплопроводность (1...2 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>), высокие значения коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) (1·10<sup>-5</sup> К<sup>-1</sup>) [12], а также твер-



дости (до 10 ГПа) [13], способность к упругому восстановлению ( $H/E < 0,02$ ), коррозионную стойкость во многих агрессивных средах [14–17], жаростойкость до температуры 500 °С [18–21] и износостойкость [22–25]. Все это позволяет предположить возможность использования покрытий из сплава системы Al–Cu–Fe в качестве связующего промежуточного слоя в ТЗП с  $ZrO_2$ , в том числе для алюминиевых сплавов. По теплопроводности этот квазикристаллический сплав близок к  $ZrO_2$ , что снижает уровень внутренних напряжений между слоями подслоя и керамического покрытия, а по КЛТР, равному  $(14...18) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , довольно совместим с защищаемыми деталями из алюминиевых сплавов (КЛТР составляет  $(20...24) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ), что должно способствовать снижению остаточных напряжений на границе с основой и повышению прочности сцепления.

В настоящее время довольно хорошо исследованы условия газотермического напыления покрытий из сплава системы Al–Cu–Fe на различные металлы, в том числе алюминий, изучены их свойства [11].

При этом установлено, что основные характеристики покрытий (твердость, теплопроводность, коррозионная стойкость, жаропрочность и др.) зависят от фазового состава напыленного слоя, прежде всего содержания квазикристаллической  $\psi$ -фазы.

Зависимость квазикристаллическости напыленных покрытий от температурных условий их формирования сопряжена с тем, что размер области существования квазикристаллической  $\psi$ -фазы на диаграмме фазового равновесия зависит от температуры. При ее снижении область  $\psi$ -фазы сужается, что сопровождается расширением соседней области аппроксимантной кристаллической фазы в результате небольших смещений атомов. Вместе с тем аппроксимантные фазы, расположенные вблизи границ существования квазикристаллической фазы, могут иметь такие же свойства (в том числе теплофизические), как и квазикристаллы [26].

В настоящей работе представлены результаты исследования теплозащитных свойств плазменных и детонационных покрытий различной структуры (двух- и многослойных, градиентных), в которых в качестве материала защитного керамического слоя использован частично стабилизированный диоксид циркония ( $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$ ), а в качестве материала подслоя наряду с традиционным жаростойким сплавом NiCrAlY — такие материалы, как сплав AlCuFe с квазикристаллической  $\psi$ -фазой и AlCuFeTiCrSi с аппроксимантной  $\alpha$ -фазой.

Теплозащитные свойства покрытий изучали на стенде с помощью прямого нагрева образцов струей пламени газовой горелки ГН-2. Горючей служила смесь  $C_3H_8$  и  $O_2$ . Горелку располагали на расстоянии 50...60 мм от поверхности образца.

Образцы нагревали в течение 5 с, затем охлаждали сжатым воздухом в течение 30 с.

Для измерения динамики процесса нагрев–охлаждение в образце диаметром 30 мм и толщиной 3 мм с покрытием из алюминиевого сплава с противоположной стороны от покрытия зачеканивали термопару на глубину 2 мм. Температуру измеряли цифровым мультиметром UT70B. Предел измерения прибора равнялся 40...1000 °С, разрешение — 1 °С, погрешность в зависимости от диапазона измерений — 1...3 %. Для каждого типа покрытий проведено до десяти циклов нагрева–охлаждения, а максимальная температура образца без покрытия, регулируемая расстоянием до образца и тепловой мощностью горелки, составляла около 400 °С. Это соответствовало рабочей температуре деталей поршневой группы двигателей внутреннего сгорания (ДВС), изготавливаемых из алюминиевых сплавов [3].

Исследованы теплозащитные свойства покрытий, полученных детонационным и плазменным способами из порошков AlCuFe с квазикристаллической  $\psi$ -фазой, из смеси порошков 75 % AlCuFe + 25 %, содержащего аппроксимантную  $\alpha$ -фазу TiCrSi, двухслойных покрытий с керамическим теплозащитным слоем  $ZrO_2$  и металлическим подслоем NiCrAlY или AlCuFe, а также трехслойных и пятислойных (градиентных) покрытий из указанных компонентов. При этом ставилась задача установить зависимость эффективности теплозащитных свойств газотермических покрытий от таких факторов, как способ напыления, структура и фазовый состав покрытия, толщина напыленного слоя.

Для нанесения покрытий использовали технологические параметры, установленные по результатам работ [27–29], посвященных изучению структуры и фазового состава газотермических покрытий AlCuFe, содержащих квазикристаллическую фазу (табл. 1, 2).

На рис. 1–3 представлены типичные структуры некоторых исследуемых покрытий, а на рис. 4 — циклограммы нагрева–охлаждения образцов без покрытия 1 и с покрытиями из сплава системы Al–Cu–Fe, полученных плазменным 2 и детона-

Таблица 1. Режимы плазменного напыления ТЗП

Состав покрытия	Ток, А	Напряжение, В	Расход аргона, л/мин	Дистанция напыления, мм
AlCuFe	500	30	25	130...140
NiCrAlY	500	30	25	130...140
50 % AlCuFe + 50 % $ZrO_2$	500	50	25	110...120
50 % NiCrAlY + 50 % $ZrO_2$	500	60	25	110...120
$ZrO_2$	500	60	25	110...120



Таблица 2. Режимы детонационного напыления ТПЗ

Состав покрытия	Расход рабочих газов, м <sup>3</sup> /ч			Толщина слоя за выстрел, мкм	Дистанция напыления, мм
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
AlCuFe	1,15	0,5	0,4	10...12	110
NiCrAlY	1,15	0,5	0,4	10...12	110
50 % AlCuFe + 50 % ZrO <sub>2</sub>	0,50	2,0	—	6...8	110
50 % NiCrAlY + 50 % ZrO <sub>2</sub>	0,50	2,0	—	6...8	110

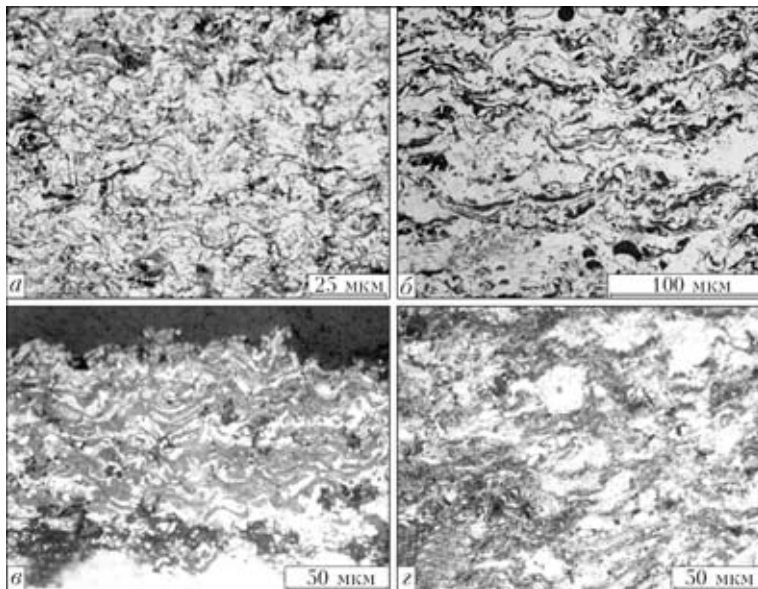


Рис. 1. Микроструктуры однослойных газотермических плазменных (а, б) и детонационных (б, з) покрытий из порошков Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> (а, б) и 75 % Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> + 25 % Ti<sub>60</sub>Cr<sub>32</sub>Si<sub>8</sub> (в, з)

ционным 3 способами. Анализ циклограмм позволил оценить влияние таких параметров, как способ нанесения, толщина напыленного слоя и содержание в покрытии квазикристаллической ψ-фазы (рис. 5) на эффективность тепловой защиты одинаковых по составу покрытий.

С учетом уровня T<sub>макс</sub> содержание ψ-фазы в исходных порошках AlCuFe оказывает наиболее существенное влияние на эффективность теплозащиты при значении этого показателя до 60 мас. % (рис. 5). Переход к использованию порошков AlCuFe, содержащих 80 % ψ-фазы (при толщине покрытия AlCuFe (800±100) мкм), практически не отражается на уровне T<sub>макс</sub>.

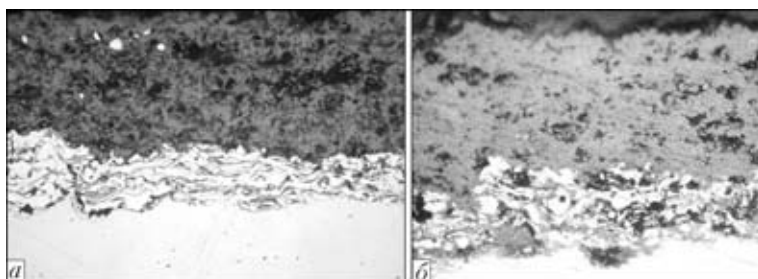


Рис. 2. Микроструктуры (×200) двухслойных газотермических покрытий: а — плазменное NiCrAlY–ZrO<sub>2</sub>; б — детонационное AlCuFe–ZrO<sub>2</sub>

Вместе с тем при оценке влияния толщины покрытия AlCuFe на его теплозащитные свойства (рис. 6) установлено, что данный эффект уменьшается по мере увеличения толщины от 200 до 900 мкм. Снижение уровня T<sub>макс</sub> по сравнению с образцом без покрытия, отнесенное к 100 мкм толщины покрытия, составляет при 200 мкм покрытия 37,0...43,5 °С, при 500 мкм — 23,8...24,0, при 900 мкм — 14,3 °С. Установлено, что плазменные покрытия AlCuFe по сравнению с детонационными эффективнее защищают основу от воздействия тепловых потоков, что, по-видимому, связано с меньшим содержанием в последних ψ-фазы. Это обусловлено более интенсивным окислением материала напыляемых частиц, размер которых при детонационном напылении в 1, 5...2,0 раза меньше, чем при плазменном.

Сравнивали эффективность тепловой защиты газотермических покрытий в зависимости от состава и внутренней структуры (двух- и многослойные) на образцах с одинаковой общей толщиной защитного слоя, равной 500...600 мкм (рис. 6). Анализ результатов показал, что снижение температуры защищаемой основы, свидетельствующее об эффективности теплозащиты покрытий, зависит от следующих факторов:

состава покрытия. Покрытия AlCuFe в качестве металлического компонента превосходят покрытия NiCrAlY (значение T<sub>макс</sub> ниже на 24...47 °С);

структуры покрытия. Наибольший эффект достигается у пятислойных (градиентных) покрытий, которые превосходят традиционные двухслойные покрытия (снижение T<sub>макс</sub> на 125...135 °С против 95 °С);

способа нанесения. Для всех исследуемых покрытий плазменный способ напыления имеет некоторые преимущества по сравнению с детонационным (разница в снижении значения T<sub>макс</sub> составляет 20...30 °С).

С увеличением толщины защитного слоя эффективность защиты возрастает, однако при этом повышается и уровень внутренних напряжений, приводящих к отслоению покрытия от основы из-за различных ТКЛР. С этой точки зрения покрытия AlCuFe имеют преимущества над NiCrAlY при нанесении их на алюминиевые сплавы в связи с близостью значений их ТКЛР. Данные, приведенные на рис. 6, свидетельствуют о наличии оптимального значения толщины пок-

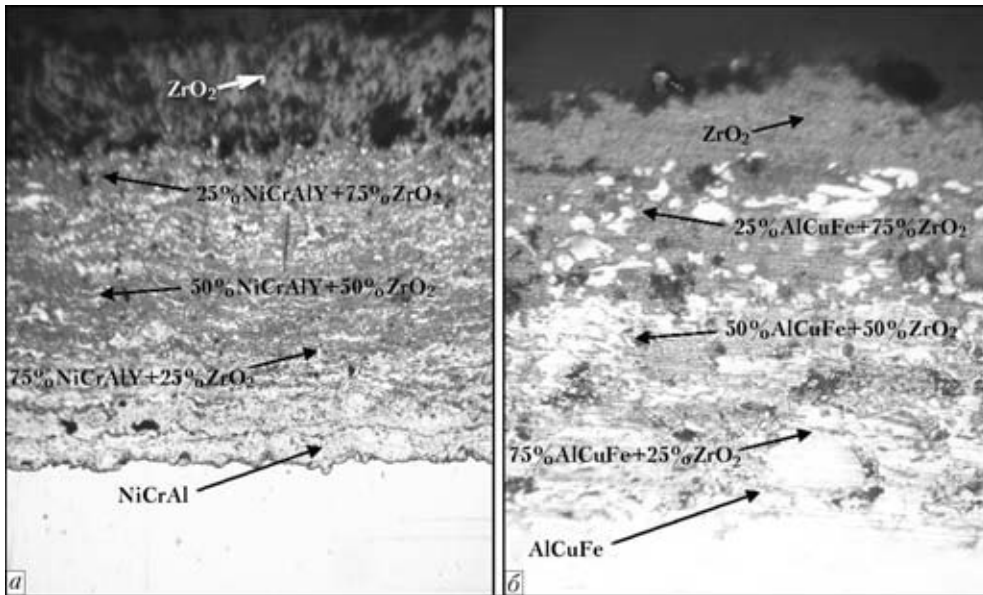


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 100$ ) градиентных газотермических покрытий: *a* — детонационное NiCrAlY–(75 % NiCrAlY + 25 % ZrO<sub>2</sub>)–(50 % NiCrAlY + 50 % ZrO<sub>2</sub>)–(25 % NiCrAlY + 75 % ZrO<sub>2</sub>)–ZrO<sub>2</sub>; *б* — плазменное AlCuFe–(75 % AlCuFe + 25 % ZrO<sub>2</sub>)–(50 % AlCuFe + 50 % ZrO<sub>2</sub>)–(25 % AlCuFe + 75 % ZrO<sub>2</sub>)–ZrO<sub>2</sub>

рытия в связи с затухающим ее влиянием на эффективность тепловой защиты.

Поскольку приведенные результаты показали перспективность использования покрытий AlCuFe, содержащих квазикристаллическую  $\psi$ -фазу, в качестве теплозащитных для деталей ДВС из сплава алюминия, представляет интерес изучить их поведение в условиях, приближенных к рабочим для ДВС.

Испытаны плазменное покрытие AlCuFe, полученное при использовании для напыления порошка с 45 % квазикристаллической  $\psi$ -фазы, детонационное покрытие из порошка сплава AlCuFeTiCrSi, содержащее 50 % аппроксимантной  $\alpha$ -фазы, и для сравнения плазменное покрытие из ZrO<sub>2</sub> с подслоем из сплава NiCrAlY. Покрытия наносили на поршень ДВС диаметром 78 мм, высотой 76 мм, изготовленный из алюминиевого сплава (рис. 7). Толщина покрытия составляла (450±50) мкм. Испытания проводили на стенде

(рис. 8) с использованием нагрева поверхности поршня горелкой, расположенной на расстоянии (55±5) см от поверхности поршня. Нагрев осуществляли в течение 3 с, охлаждение — в течение 30 с, усреднение динамики нагрева днища поршня проводили по результатам 10 термоциклов (рис. 9).

Установлено, что предельная температура днища поршня в течение 3 с нагрева пламенем га-

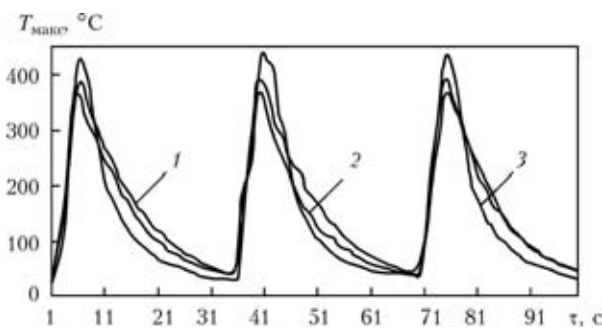


Рис. 4. Циклограмма нагрева и охлаждения образцов из алюминиевого сплава без покрытия *1* и с покрытием из AlCuFe, нанесенным плазменным *2* и детонационным *3* способами (толщина покрытия 400 мкм, содержание квазикристаллической  $\psi$ -фазы — 60 %)

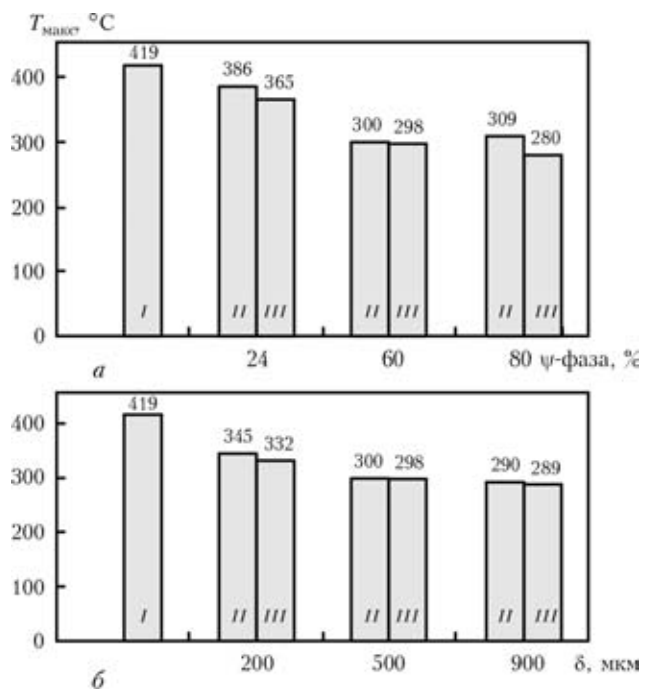


Рис. 5. Эффективность теплозащиты газотермического покрытия толщиной (800±100) мкм из порошка Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> в зависимости от содержания в исходном порошке  $\psi$ -фазы (*a*) и толщины напыленного слоя при содержании  $\psi$ -фазы в исходном порошке 60 % (*б*): *I* — без покрытия; *II* — детонационное; *III* — плазменное покрытие

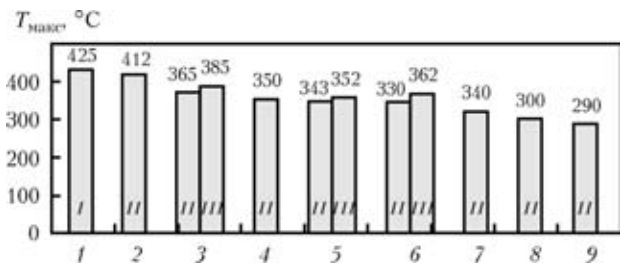


Рис. 6. Эффективность теплозащиты плазменных и детонационных покрытий: 1 — без покрытия; 2 — NiCrAlY; 3 — AlCuFe; 4 — NiCrAlY + ZrO<sub>2</sub>; 5 — NiCrAlY + (50 % NiCrAlY + 50 % ZrO<sub>2</sub>); 6 — AlCuFe + (50 % AlCuFe + 50 % ZrO<sub>2</sub>); 7 — NiCrAlY + (75 % NiCrAlY + 25 % ZrO<sub>2</sub>) + (50 % NiCrAlY + 50 % ZrO<sub>2</sub>) + (25 % NiCrAlY + 75 % ZrO<sub>2</sub>) + ZrO<sub>2</sub>; 8 — AlCuFe + (75 % AlCuFe + 25 % ZrO<sub>2</sub>) + (50 % AlCuFe + 50 % ZrO<sub>2</sub>) + (25 % AlCuFe + 75 % ZrO<sub>2</sub>) + ZrO<sub>2</sub>; 9 — AlCuFeTiCrSi + (75 % AlCuFeTiCrSi + 25 % ZrO<sub>2</sub>) + (50 % AlCuFeTiCrSi + 50 % ZrO<sub>2</sub>) + (25 % AlCuFeTiCrSi + 75 % ZrO<sub>2</sub>); обозначение I–III см. на рис. 5



Рис. 7. Поршень из алюминиевого сплава с теплозащитным покрытием

зовой горелки при отсутствии покрытия составляет 102 °С, для покрытий ZrO<sub>2</sub> с подслоем NiCrAlY, AlCuFe и AlCuFeTiCrSi — соответственно 71, 60 и 56 °С.

Полученные экспериментальные данные о поведении материалов из сплава системы Al–Cu–Fe, содержащего квазикристаллическую ψ-фазу, и сплава системы Al–Cu–Fe–Ti–Cr–Si с аппроксимантной структурой (α-фазой) в качестве теплозащитных покрытий на поверхности деталей из алюминиевых сплавов, свидетельствуют об их высокой эффективности. В условиях циклического нагрева пропан-кислородной струей горелки они по показателю максимально достигаемой температуры основы превосходят традиционное двухслойное теплозащитное покрытие — NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>. Такие теплофизические свойства исследуемых покрытий наряду со значениями ТКЛР, близкими к таковым алюминиевых сплавов, делают их перспективными при разработке

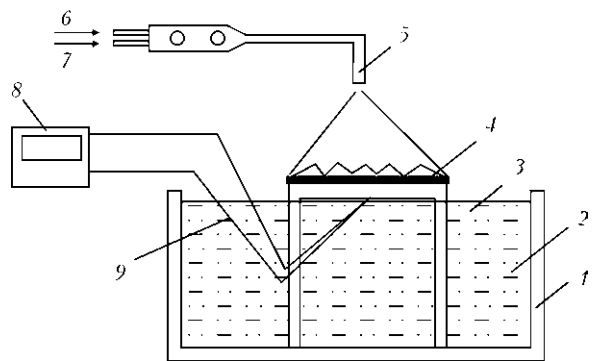


Рис. 8. Схема стенда для испытания теплозащитных свойств квазикристаллических покрытий: 1 — ванна; 2 — вода; 3 — поршень; 4 — покрытие; 5 — газопламенная горелка; 6 — кислород; 7 — пропан; 8 — прибор UT70B; 9 — термопара

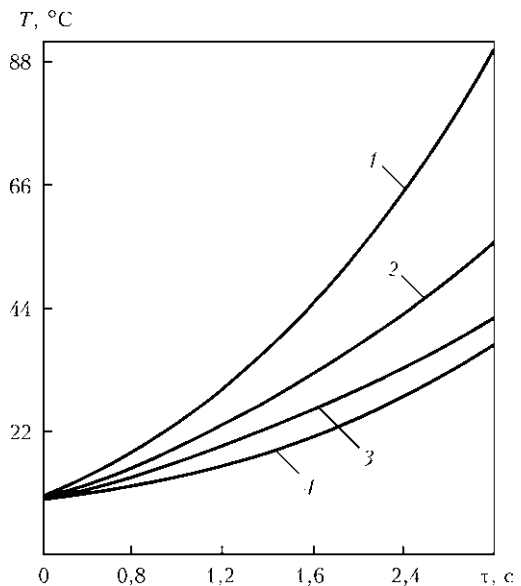


Рис. 9. Динамика нагрева поршня газовой горелкой: 1 — без покрытия; 2 — ZrO<sub>2</sub> с подслоем NiCrAlY; 3 — AlCuFe; 4 — AlCuFeTiCrSi

теплозащитных покрытий для дизельных двигателей, изготавливаемых из легких сплавов. При работе ДВС с теплозащитным покрытием снизятся потери тепла в системе охлаждения, повысится рабочая температура в камере сгорания, улучшатся технико-экономические показатели работы дизельного двигателя. Уменьшение температуры деталей двигателя позволит снизить интенсивность их износа.

1. *Теплозащитные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub>* / А. Ф. Ильющенко, В. С. Ивашко, В. А. Оковитый, С. Б. Соболевский. — Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. — 128 с.
2. *Коломыцев П. Т.* Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. — М.: Металлургия, 1991. — 237 с.
3. *Никитин М. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И.* Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля. — Л.: Машиностроение, 1977. — 168 с.
4. *Zhu D., Miller R. A.* Thermal barrier coatings for advanced gas turbine and diesel engines. — NASA/TM, 1999. — № 209453. — 12 p.
5. *Moskal G.* Thermal barrier coatings: characteristics of microstructure and properties. Generation and directions of de-



- velopment of bond // J. Achiev. in Mat. and Manufac. Eng. — 2009. — **37**, № 2. — P. 323–331.
6. *Development of alternative thermal barrier coatings for diesel engines* / R. Soltani, H. Samadi, E. Garcia, T. W. Coyle // Proc. of SAE Intern. — Toronto, 2005. — № 1. — 6 p.
  7. *Buyukkaya E., Engine T., Cerit M.* Effects of thermal barrier coating on gas emissions and performance of a LNR engine with different injection timings and valve adjustments // Energy Conversion and Management. — 2006. — **47**. — P. 1298–1310.
  8. *Bailey N., Mill B., Whyman P.* New, low cost thermal barrier coating developed specifically for diesel engine applications to solve heat issues associated with 2013 Euro VI emissions introduction // Automotive Industry Today. — 2011. — P. 2.
  9. *Huttunen-Saarivirta E.* Microstructure, fabrication and properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe alloys: a review // J. of Alloys and Compounds. — 2004. — **363**. — P. 150–174.
  10. *Адеєва Л. І., Борисова А. Л.* Квазікристалічні сплави як новий перспективний матеріал для захисних покриттів // Фізика і хімія твердого тіла. — 2002. — **3**, № 3. — С. 454–464.
  11. *Газотермічні покриття, що містять квазікристалічну фазу, властивості і застосування (Огляд)* / А. Л. Борисова, Ю. С. Борисов, Л. І. Адеєва та ін. // Там само. — 2005. — **6**, № 1. — С. 124–136.
  12. *Haberker R., Lindqvist P., Fritsch G.* Transport properties of quasicrystalline AlCuFe // J. of Non-Crystalline Solids. — 1993. — **153/154**. — P. 303–307.
  13. *Edagava K., Kajiyama K., Takeuchi S.* Thermal expansion and Gruneisen parameters of quasicrystals // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. — 1999. — **553**. — P. 403–408.
  14. *Коррозионная стойкость газотермических покрытий на основе сплава AlCuFe, содержащих квазикристаллическую фазу* / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, В. Ф. Гольник, З. Г. Ипатова // Автомат. сварка. — 2007. — № 2. — С. 31–36.
  15. *Rudiger A., Koster U.* Corrosion behavior of Al–Cu–Fe quasicrystals // Mat. Sci. and Eng. — 2000. — **294/296**. — P. 890–893.
  16. *Hot corrosion of AlCuFeCr quasicrystalline coating on titanium alloys with NaCl deposit* / Chungeng Zhou, Rui Cai, Shengkai Gong, Huibin Xu // Surface and Coatings Technology. — 2006. — **201**. — P. 1718–1723.
  17. *Massiani Y., Ait Yaazza S., Dubois J. M.* Electrochemical corrosion behaviour of quasicrystalline coatings in dilute acetic acid // Proc. of the 5th Intern. conf. on Quasicrystals. — 1995. — P. 790–793.
  18. *Oxidation behavior of Al–Cu–Fe nanoquasicrystal powders* / V. Srinival, P. Barua, T. B. Chosh, B. S. Murty // J. of Non-Crystalline Solids. — 2004. — **334/335**. — P. 540–543.
  19. *Yamasaki Michiaki, Tsai An Pang.* Oxidation behavior of quasicrystalline Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> alloys with additional elements // J. of Alloys and Compounds. — 2002. — **342**. — P. 473–476.
  20. *Application of quasicrystalline materials as thermal barriers in aeronautics and future perspectives of use for these materials* / A. Sanchez, F. J. Garcia de Blas, J. M. Algaba et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. — 1999. — **553**. — P. 447–457.
  21. *Oxidation of quasicrystalline and crystalline AlCuFe thin film in air* / A. Haugeneder, T. Eisenhammer, A. Mahr et al. // Thin Solid Films. — 1997. — **307**. — P. 120–125.
  22. *Dubois J. M., Kang S. S., Von Stebut J.* Quasicrystalline low-friction coatings // J. Mat. Sci. Lett. — 1991. — **10**. — P. 537–541.
  23. *Microstructure and wear behavior of quasicrystalline thermal sprayed coatings* / D. J. Solderet, P. D. Krotz, R. L. Daniel Jr, M. F. Smith // Proc. of the 8th National therm. spray conf. (Houstin, Sept. 11–15, 1995). — Houstin, 1995. — P. 627–632.
  24. *Friction and wear behavior of thermally sprayed Al–Cu–Fe quasicrystal coatings* / S. De Palo, S. Usmani, S. Sampath et al. // Ibid. — 1997. — P. 135–139.
  25. *Nanoquasicrystalline Al–Cu–Fe–based alloys. Pt II: Mechanical properties* / M. Galano, F. Audebert, A. Garcia Escorial et al. // Acta Materiala. — 2009. — **57**. — P. 5120–5130.
  26. *Goldman A. I., Kelton R. F.* Quasicrystals and crystalline approximants // Amer. Phys. Soc. Rev. of Modern Physics. — 1993. — **65**, № 1. — P. 213–230.
  27. *Многослойные теплозащитные плазменные покрытия ZrO<sub>2</sub>–NiCrAlY* / А. Л. Борисова, Л. И. Адеєва, А. Ю. Туник и др. // Автомат. сварка. — 2010. — № 10. — С. 29–36.
  28. *Плазменные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub> с использованием в качестве металлического подслоя сплава AlCuFe* / А. Л. Борисова, Л. И. Адеєва, А. Ю. Туник и др. // Там же. — 2010. — № 4. — С. 32–36.
  29. *Исследование структуры и фазового состава детонационных теплозащитных покрытий из квазикристаллического сплава* / Е. А. Астахов, Г. С. Каплина, Н. Н. Кокорина, А. И. Кильдий // Материалы для работы в экстремальных условиях: Сб. тр. междунар. конф. (Киев, 29–30 сент. 2009 г.). — Киев, 2009. — С. 101–105.

Given are the investigation results on thermal-barrier properties of plasma and detonation coatings (two-layer and graded), in which ZrO<sub>2</sub> stabilised by Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is used as a ceramic component, and alloy Al–Cu–Fe containing the quasi-crystalline  $\gamma$ -phase is used as a metallic component.

Поступила в редакцию 10.01.2012