



СТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Fe, СОДЕРЖАЩИХ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ ФАЗУ, В УСЛОВИЯХ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Ю. С. БОРИСОВ, А. Л. БОРИСОВА, доктора техн. наук, В. Ф. ГОЛЬНИК, канд. хим. наук, З. Г. ИПАТОВА, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследована износостойкость в условиях газоабразивного изнашивания при разных углах атаки абразива детонационных и плазменных покрытий из порошков на основе сплава Al–Cu–Fe, легированных скандием и хромом. Установлена зависимость износа покрытий от угла атаки абразива, метода нанесения и состава покрытий, а также содержания в нем квазикристаллической фазы.

Ключевые слова: газотермические покрытия, сплав системы Al–Cu–Fe, квазикристаллическая фаза, газоабразивное изнашивание

С момента открытия квазикристаллического состояния вещества важной проблемой является практическое применение этого класса материалов, сочетающих комплекс таких уникальных свойств, как высокие твердость и износостойкость, низкие значения коэффициента трения и поверхностной энергии, способность к упругому восстановлению, сверхпластичность при высоких температурах и др.

На сегодня открыто более 200 квазикристаллических сплавов, которые не нашли пока широкого применения на практике, в том числе и по причине недостаточного исследования свойств, представляющих практический интерес. Одной из важных служебных характеристик является их поведение в различных условиях изнашивания. Сведения о таких характеристиках квазикристаллических материалов ограничены и относятся в основном к материалам системы Al–Cu–Fe.

Высокую износостойкость газотермических покрытий из сплава системы Al–Cu–Fe в условиях абразивного изнашивания в первую очередь связывают с содержанием в них квазикристаллической ψ -фазы, твердость которой может превышать $HV\ 1000$ МПа [1]. В то же время в зависимости от условий триботехнических испытаний большое значение приобретают такие характеристики покрытий, как трещиностойкость, пористость, размер зерна, наличие оксидных включений. В работе [2] приведены результаты исследования триботехнических свойств плазменных покрытий из сплава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ в условиях абразивного изнашивания (закрепленный абразив из шлифовальной шкурки, содержащей SiC, зернистостью 400, $P =$

$= 10$ кПа, $v = 240$ об/мин). В этих условиях размер зерна порошка ($d_{\text{ср}} = 25...45$ и $45...75$ мкм) незначительно повлиял на износостойкость, в то время как отжиг при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч в аргоне существенно (в 4...5 раз) повысил износостойкость покрытия, при этом коэффициент трения также возрос с 0,1 до 0,4. Повышение износостойкости покрытий в результате отжига связано с практически полным превращением двухфазной ($\psi + \beta$) в однофазную ψ структуру с одновременным снижением пористости и «залечиванием» трещин. Возрастание коэффициента трения после отжига покрытия авторы связывают с увеличением адгезионного износа и снижением роли продуктов изнашивания (вторичных структур), играющих роль смазки в зоне трения.

В работе [3] приведены результаты исследования изнашивания газотермических покрытий из сплава системы Al–Cu–Fe в условиях сухого трения. Испытания проводили методом «пин-он диск» при нагрузке 50 Н и скорости скольжения 0,01 м/с, в качестве контртела использовали стальной шарик с твердостью $HV1-750$. Были испытаны три типа покрытий: плазменные (APS), содержащие смесь ψ - и β -фаз; APS-покрытия, отожженные при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч, содержащие только ψ -фазу, и сверхзвуковые газоплазменные (HVOF) покрытия, полностью состоящие из β -фазы. Максимальную твердость имели отожженные APS, минимальную — HVOF-покрытия, т. е. наблюдалась корреляция твердости покрытий с содержанием в них ψ -фазы. Коэффициент трения покрытий отличался незначительно и находился в диапазоне 0,09...0,11. Однако наиболее высокая износостойкость отмечена в HVOF-покрытиях, состоящих из более мягкой, чем ψ - и β -фазы. Как показали металлографические

исследования, эти покрытия наиболее плотные и практически не содержали трещин. При отжиге двухфазных ($\psi + \beta$) плазменных покрытий их плотность возросла, однако при этом увеличилось и количество трещин, что связано с объемными изменениями в результате ψ - β -превращения. Поэтому отожженные APS-покрытия, состоящие из ψ -фазы, показали более низкую стойкость к изнашиванию, чем однофазные HVOF-покрытия, содержащие более мягкую β -фазу.

Авторы работы [4] отмечают, что изнашивание покрытий в условиях сухого трения-скольжения ($P = 250$ г, линейная скорость 2,5 см/с) существенно зависит от их плотности и топографии поверхности и в меньшей мере от их химического состава. Такой вывод подтверждают результаты испытаний покрытий, полученные методами APS, вакуумного плазменного (VPS) и сверхзвукового газоплазменного (HVOF) напыления. Покрытия отличались по содержанию ψ -фазы, плотности и твердости. Максимальные твердость и содержание ψ -фазы наблюдались у VPS-, а максимальная плотность — у HVOF-покрытий. В порядке возрастания коэффициента трения покрытия можно расположить следующим образом: APS \rightarrow VPS \rightarrow HVOF, причем значения f почти на порядок отличаются от данных, приведенных в работе [3] (0,6...1,2 по сравнению с 0,09...0,11). При исследовании триботехнических свойств газотермических покрытий из сплавов $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, $Al_{64}Cu_{18}Fe_8Cr_8$ и $Al_{67}Cu_9Fe_{10,5}Cr_8Si_3$ методом склерометрии при постоянной нагрузке 20 Н установили зависимость коэффициента трения от материала и диаметра шарового индентора, а также степени шероховатости поверхности покрытия. При этом повышение последней уменьшает коэффициент трения в случае алмазного и увеличивает в случае стального индентора [5].

Рассмотренные работы, посвященные исследованию триботехнических свойств газотермических покрытий, содержащих квазикристаллическую фазу, свидетельствуют о перспективности применения для защиты от изнашивания деталей из легких сплавов и необходимости продолжения исследований с целью расширения областей их практического применения. Так, полностью отсутствуют данные о поведении этих покрытий в условиях газоабразивного изнашивания, являющегося весьма распространенным в практических условиях.

На механизм газоабразивного изнашивания покрытий влияет целый ряд факторов. В этих условиях износостойкость покрытий зависит не только от твердости и хрупкости материала покрытия, но и от их структуры, в том числе пористости, размера и распределения структурных составляющих. Прямой зависимости между износостойкостью и твердостью газотермических пок-

рытий (так же, как и пористых порошковых материалов) не наблюдается. Так, в работе [6] отмечалось, что при малых углах атаки с увеличением твердости покрытия относительная износостойкость повышается, а при больших снижается. В то же время увеличение модуля упругости материала покрытия приводит к повышению относительной износостойкости как при малых, так и при больших углах атаки. Такая закономерность характерна для материалов, которые имеют остаточную пористость. Для практически беспористых материалов (например, наплавленных покрытий) увеличение модуля упругости при малых углах атаки приводит к возрастанию, а при больших — к уменьшению износостойкости покрытий. Любая пористость в материале снижает его износостойкость при воздействии абразивной струи, при этом степень ее влияния зависит от угла атаки.

В начале при изнашивании пористых материалов в абразивном потоке возможно их шаржирование частицами абразива, что не только компенсирует износ образца, но и увеличивает его массу. Поэтому в данной работе при испытаниях измерения проводили после окончания некоторого инкубационного периода, после установления стационарной скорости износа. Вместе с тем поры в материале, являющиеся концентраторами напряжений, при ударе абразивных частиц могут служить источниками зарождения трещин.

По степени сопротивления газоабразивному воздействию (в зависимости от угла атаки α абразивных частиц) порошковые материалы и покрытия условно делятся на две группы [6]: $\alpha < 35^\circ$ — максимальное изнашивание для пластичных и $\alpha > 45^\circ$ — для хрупких материалов.

Проведены исследования износостойкости в условиях газоабразивного изнашивания детонационных и плазменных покрытий из порошков нелегированного сплава системы Al-Cu-Fe ($Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$), а также из порошков сплавов, легированных скандием (0,265 и 0,44 ат. % Sc) или хромом (8 ат. % Cr). Порошки для нанесения покрытий получены методом диспергирования расплава аргоном или водой высокого давления (таблица). Детонационные покрытия* наносили при следующих технологических режимах на установке «Перун-С»: расход рабочих газов, м³/ч: — 0,35 (пропан-бутан); 0,95 (кислород); 0,4 (воздух); дистанция напыления — 110 мм. Размер частиц порошка 40...63 мкм.

Плазменные покрытия наносили при следующих технологических параметрах на установке «Киев-7»: сила тока 200 А, напряжение 340 В, дистанция напыления 200 мм, расход плазмооб-

* Детонационные покрытия получены под руководством д-ра техн. наук Е. А. Астахова, плазменные — М. Коломыцевым.



разующего газа (воздуха) $20 \text{ м}^3/\text{ч}$. Размер частиц порошка 40...63 и 25...40 мкм. Покрытие нанесли на стальную основу при комнатной температуре и на основу, подогретую до 270 и 400 °С.

Покрытия системы Al–Cu–Fe и Al–Cu–Fe–Sc состояли из смеси твердой и хрупкой квазикристаллической ψ - и более мягкой кристаллической β -фаз. Содержание ψ -фазы во всех случаях, за исключением плазменного напыления порошка сплава системы Al–Cu–Fe на подогретую до 400 °С основу (поз. 5 таблицы), было ниже по сравнению с исходным порошком. В случае детонационного напыления порошка $\text{Al}_{66}\text{Cu}_{18}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ (поз. 9 таблицы) в результате нагрева происходит не только увеличение содержания β -фазы, но и образование вместо ψ -фазы кристаллического аппроксиманта декагонального квазикристалла — фазы O_1 . Четкой корреляции между количеством квазикристаллической ψ -фазы и микротвердостью покрытия не наблюдалось и это связано с тем, что она определяется не только фазовым составом, но и размером зерна, а также плотностью покрытия, которые, в свою очередь, зависят от характеристик исходного порошка, метода и режима нанесения.

Исследования газоабразивного изнашивания покрытий выполнены на центробежном ускорителе твердых частиц модели ЦУК-3М [6, 7] в соответствии с ГОСТ 23.201–78. В качестве абразивного материала использовали кварцевый песок с размером частиц 0,5...0,9 мм и относительным содержанием влаги не более 0,15 %. Частота вращения ротора установки была постоянной и составляла 3000 ± 50 об/мин, что соответствует линейной скорости потока абразивных частиц

38 м/с . Исследования выполняли при фиксированных углах атаки абразива: 30, 45, 60 и 90°.

В качестве показателя износостойкости приняли интенсивность изнашивания в миллиграммах на килограмм (средняя потеря массы образцов на 1 кг абразива, попавшего на образец). Общее количество абразива, израсходованного для каждой серии образцов, составляло 30 кг, а количество образцов с покрытием одного типа (толщина покрытия ~ 500 мкм) — не менее трех.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы о влиянии характеристик исходного порошка и метода нанесения покрытий на их стойкость в условиях газоабразивного изнашивания.

Для всех исследованных покрытий, независимо от их состава и метода получения, наблюдается снижение износостойкости при увеличении угла атаки. Наиболее существенное влияние угла атаки на износостойкость покрытий наблюдается у детонационного покрытия из сплава системы Al–Cu–Fe, легированного 0,265 ат. % скандием (снижение износостойкости при увеличении угла от 30 до 90° в 3,8 раза), а наименее — для плазменного покрытия, полученного при напылении на основу, подогретую до 400 °С — снижение всего в 1,5 раза (соответственно поз. 6 и 4 таблицы).

Четкой корреляции между газоабразивной износостойкостью покрытий и содержанием в них ψ -фазы не наблюдается. Однако для покрытий, полученных одним и тем же методом напыления из порошка одинаковой дисперсности, наблюдается снижение износостойкости с повышением содержания ψ -фазы, что связано с увеличением хрупкости покрытий. Так, для детонационного

покрытия с 36 % ψ -фазы по сравнению с 17 % (поз. 1 и 2 таблицы) износостойкость в зависимости от угла атаки ниже в 1,1...1,5 раза.

Вместе с тем применение подогрева основы до 400 °С при плазменном напылении, которое наряду с повышением содержания ψ -фазы приводит к повышению когезионной прочности и плотности покрытий, повышает также и их износостойкость (поз. 3 и 4 таблицы).

Детонационные покрытия в целом превосходят плазменные по стойкости в условиях газоабразивного изнашивания. Так, например, детонационные покрытия из порошка системы Al–Cu–Fe с размером частиц 40...63 мкм по износостойкости

Износостойкость газотермических покрытий, содержащих квазикристаллическую фазу, в условиях газоабразивного изнашивания

№ позиции	Напыляемый порошок	Метод нанесения ¹ покрытия	Температура основы, °С	Характеристика порошка		
				Метод получения ²	Размер частиц, мкм	Содержание квазикристаллической фазы ψ , мас. %
1	$\text{Al}_{63}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}$	ДН	20	АР	40...63	45
2	$\text{Al}_{63}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}$	ДН	20	ВР	40...63	53
3	$\text{Al}_{63}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}$	ПН	20	АР	40...63	45
4	$\text{Al}_{63}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}$	ПН	400	АР	40...63	45
5	$\text{Al}_{63}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}\text{Sc}_{0,265}$	ПН	270	АР	25...40	50
6	$\text{Al}_{62,735}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}\text{Sc}_{0,265}$	ДН	20	ВР	40...63	72
7	$\text{Al}_{62,735}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}\text{Sc}_{0,265}$	ПН	20	ВР	40...63	72
8	$\text{Al}_{62,256}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}\text{Sc}_{0,44}$	ДН	20	ВР	40...63	73
9	$\text{Al}_{66}\text{Cu}_{18}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$	ДН	20	ВР	40...63	42

¹ДН — детонационное, ПН — плазменное напыление. ²АР — порошок, распыленный аргоном, ВР — водой.

Окончание таблицы

№ позиции	Характеристика покрытия		Средний износ при разных углах (град) атаки абразива, мг/кг			
	Содержание квазикристаллических фаз (ψ), мас. %	HV, ГПа	30	45	60	90
1	36	6,4 ± 1,0	49,9	104,4	113,7	118,2
2	17	5,5 ± 1,0	33,4	87,6	88,4	103,6
3	36	5,5 ± 0,9	148,0	220,9	227,9	238,2
4	45	6,6 ± 1,9	142,5	147,7	156,3	206,5
5	36	6,9 ± 1,5	105,2	186,4	260,6	269,4
6	35	5,7 ± 1,2	29,4	65,1	86,2	111,8
7	38	5,9 ± 1,7	75,2	140,6	149,0	236,8
8	32	5,6 ± 1,5	47,8	78,4	91,8	123,8
9	37 (O ₁)	5,8 ± 2,3	93,2	115,8	152,6	186,8

в 2...3 раза превышают плазменные из того же порошка, при этом содержание в них ψ -фазы также одинаковое — 36 мас. % (поз. 1 и 3 таблицы).

Легирование скандием в количестве 0,265 ат. % повышает износостойкость детонационных покрытий, особенно при малых углах атаки (поз. 6 и 1), а при увеличении в покрытии содержания легирующего элемента до 0,44 ат. % эффект его влияния на износостойкость намного ниже и проявляется при углах атаки до 60° (поз. 8 таблицы).

Наименьшую износостойкость среди детонационных покрытий в условиях газоабразивного изнашивания при всех углах атаки имеют покрытия, легированные хромом. Это связано с тем, что они отличаются наиболее высокой хрупкостью и низкой когезионной прочностью, что приводит, как показывает металлографический анализ, к частичному отслоению покрытия от основы.

Таким образом, покрытия с квазикристаллической фазой изнашиваются как хрупкие материалы: с увеличением угла атаки износостойкость снижается, достигая минимальных значений при лобовом столкновении абразивных частиц с поверхностью покрытия ($\alpha = 90^\circ$). При малых углах атаки кинетическая энергия абразивных частиц, которые попали на поверхность, вызывает микрорезание и выделение продуктов износа. При больших углах происходит образование лунок, которые охватывают несколько зерен покрытия вследствие отрыва слабо связанных частиц. Основным критерием износостойкости таких хрупких покрытий является трещиностойкость, кото-

Wear resistance was studied under the conditions of gas-abrasive wear at different angles of incidence of the abrasive of detonation and plasma coatings from Al-Cu-Fe based powders, alloyed with scandium and chromium. A relationship is established between coating wear and abrasive angle of incidence, coating deposition method and composition, as well as quasicrystalline phase content.

рую можно увеличить при получении непористой или малопористой структуры с равномерно распределенными равновесными порами в мелкозернистой структуре покрытия. Кроме того, другим важным фактором структурного состояния газотермических покрытий является когезионная прочность, отражающая прочность связи между отдельными структурными элементами покрытия (ламелями). Такая структура покрытия обеспечивается путем выбора оптимальных технологических вариантов и режимов нанесения.

Исходя из результатов данной работы, максимальная износостойкость в условиях газоабразивного изнашивания газотермического покрытия, содержащего квазикристаллическую фазу, была достигнута при использовании детонационного метода нанесения нелегированных порошков сплава системы Al-Cu-Fe или порошков, легированных небольшим количеством скандия (~0,3 мас. %). Увеличение содержания в покрытии ψ -фазы или легирование хромом не оказывает заметного влияния на износостойкость сплава системы Al-Cu-Fe в условиях газоабразивного изнашивания.

Коллектив авторов выражает благодарность Научно-техническому центру Украины за финансовую поддержку при выполнении данной работы в рамках проекта 1630.

1. Газотермічні покриття, що містять квазікристалічну фазу, властивості і застосування (Огляд) / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, Л. І. Адєєва та ін. // Фіз. і хімія твердого тіла. — 2005. — № 1. — С. 124–136.
2. Friction and wear behavior of thermally sprayed Al-Cu-Fe quasicrystal coatings / S. De Palo, S. Usmani, S. Sampath et al. // Therm. Spray: A. United forum for scientific and technolog. advances. — Publ. by ASM Intern., Materials Park, Ohio, USA. — 1997. — P. 135–139.
3. Thermal spray quasicrystalline coatings Pt II: Relationships among processing, phase assemblage, and tribological response / S. De Palo, S. Usmani, K. Kishi et al. // Proc. of the 15th Intern. thermal spray conf., 25–29 May, 1998, Nice, France. — P. 705–710.
4. Microstructure and wear behavior of quasicrystalline thermal sprayed coatings / D. J. Sordelet, P. D. Krotz, R. L. Jr. Daniel, M. F. Smith // Proc. of the 8th Nation. thermal spray conf., 11–15 Sept., 1995, Houston, Texas. — P. 627–632.
5. Dubois J.-M., Kang S. S., Massiani Y. Application of quasicrystalline alloys to surface coating of soft metals // J. of Non-Crystalline Solids. — 1993. — 153-154. — P. 443–445.
6. Кулу П. Износостойкость порошковых материалов и покрытий. — Таллин: Валгус, 1988. — 120 с.
7. Клейс И. Р. Центробежный ускоритель ЦУК-3М для определения относительной износостойкости материалов при абразивной эрозии // Тр. Таллин. политехн. ин-та. — 1970. — Сер. А. — С. 23–33.