

06

Трибологические и электрические свойства дисперсно-упрочненного медно-матричного покрытия, полученного холодным газодинамическим напылением

© В.С. Шикалов, Т.М. Видюк

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: v.shikalov@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 октября 2024 г.

В окончательной редакции 12 ноября 2024 г.

Принято к публикации 21 ноября 2024 г.

Проведено сравнительное исследование трибологических и электрических свойств медного и медно-вольфрамового покрытий, полученных холодным газодинамическим напылением. Показано, что введение упрочняющих микрочастиц вольфрама в медно-матричное покрытие позволяет значительно снизить удельную скорость износа полученного композита в условиях сухого трения-скольжения. Присутствие упрочняющих частиц в медной матрице не оказывает существенного влияния на коэффициент трения, механизмы износа и удельную электропроводность композитного покрытия.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, медно-матричное покрытие, износостойкость, коэффициент трения.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59932.20147

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) — активно развивающийся метод твердофазного нанесения функциональных покрытий, принцип которого заключается в ускорении микрочастиц порошкового материала (металла, сплава или металлокерамики) сверхзвуковым потоком сжатого газа (воздуха, азота или гелия) до скоростей более 400 м/с. При ударе о поверхность основы они пластически деформируются и формируют сплошное покрытие, исключая плавление [1]. Медь за счет своей высокой пластичности является одним из наиболее популярных материалов, используемых в ХГН, а получаемые покрытия характеризуются высокой тепло- и электропроводностью и востребованы в различных отраслях современного производства [2–4]. Для модификации механических и трибологических свойств медных ХГН-покрытий широко применяется подход дисперсного упрочнения микрочастицами керамических порошков путем напыления смеси [5–8]. Введение в покрытие упрочняющих частиц керамики, как правило, способствует повышению адгезионной прочности, твердости и износостойкости, однако за счет высокого электрического сопротивления керамики это приводит к значительному снижению электропроводности. В качестве альтернативного подхода целесообразно рассматривать упрочнение медно-матричных покрытий частицами твердых тугоплавких металлов [9–11]. В настоящей работе проводилось исследование трибологических и электрических характеристик медно-матричного покрытия, дисперсно-упрочненного частицами вольфрама.

В работе исследовалось композиционное покрытие толщиной около 500 мкм с содержанием вольфрама 36 wt.% (Cu–W36), полученное в работе [12]. В качестве референтного материала выступало покрытие из чистой

меди, полученное при тех же параметрах напыления. Пористость покрытий составляла менее 1%. Твердость покрытий измерялась методом инструментального индентирования на оборудовании Наноскан 4D+ (ТИСНУМ, Россия) при нормальной силе 0.1 N. Трибологические испытания проводились на оборудовании UMT-2 (Bruker Nano, Германия) в режиме сухого трения-скольжения по схеме шар–плоскость. Контртело из твердого сплава ВК6 перемещалось возвратно-поступательно с частотой 5 Hz при нормальной силе 25 N в течение 2000 с. Коэффициент трения определялся как отношение силы трения к нормальной силе, которые измерялись соответствующими датчиками. Анализ морфологии и элементного состава поверхности износа проводился с использованием оптического профилометра Contour GT-K1 (Bruker Nano, Германия) и сканирующего электронного микроскопа EVO MA15 (Zeiss, Германия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром X-Max 80 mm² (Oxford Instruments, Великобритания). Удельная электропроводность покрытий измерялась по методу вихревых токов на приборе K6 (Константа, Россия).

Результаты измерения свойств покрытий представлены в таблице. Введение упрочняющих частиц вольфрама в медную матрицу покрытия приводит к увеличению твердости в 1.4 раза и снижению скорости износа в 4.6 раза по сравнению со случаем покрытия из чистой меди. На рис. 1 показаны изображения морфологии поверхностей износа покрытий, полученные с помощью оптической профилометрии и электронной микроскопии в режиме вторичных электронов. Средняя глубина дорожки износа составила 45 и 20 мкм, а ширина 1.1 и 0.7 мм для покрытий Cu и Cu–W36 соответственно. Видно, что процесс износа обоих покрытий сопро-

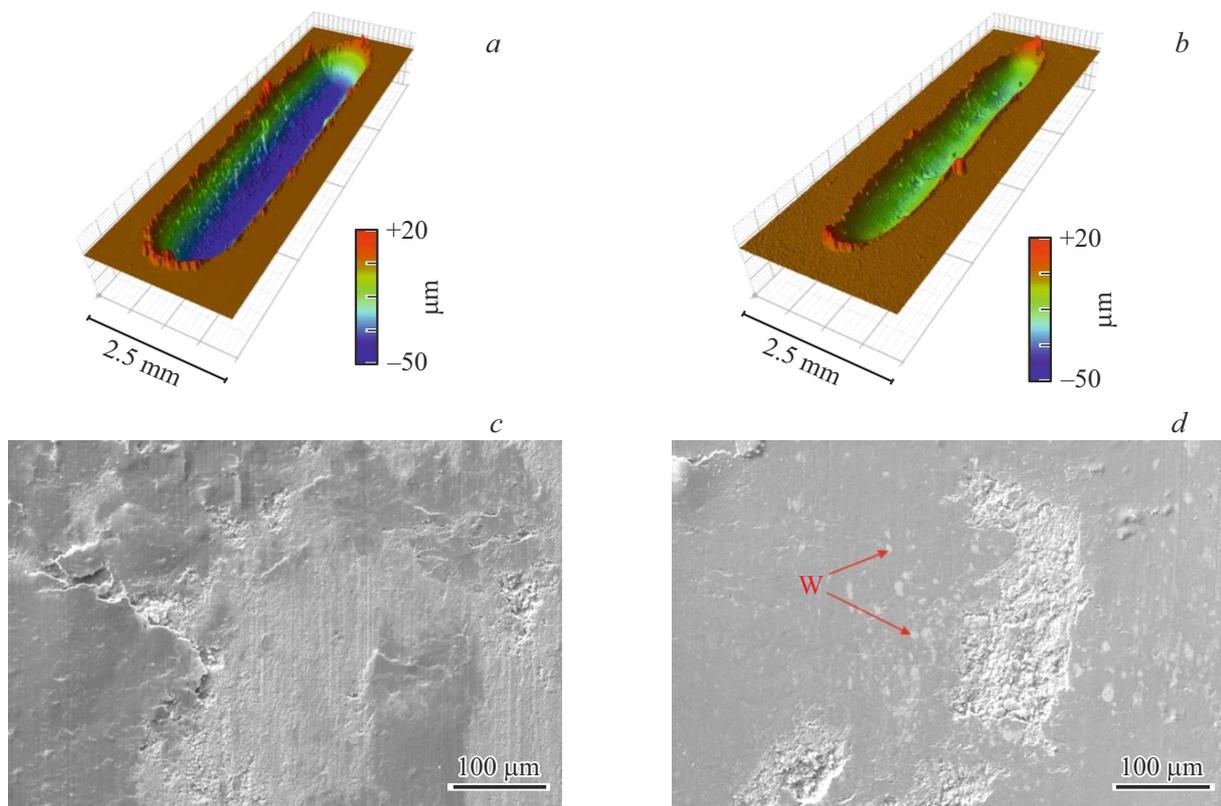


Рис. 1. Изображения морфологии поверхности износа покрытий Cu (*a, c*) и Cu-W36 (*b, d*).

Свойства покрытий

Покрытие	Микротвердость, GPa	Скорость износа $\cdot 10^{-4}$, $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$	Коэффициент трения	Удельная электропроводность, % IACS
Cu	1.7 ± 0.3	0.79 ± 0.07	0.44 ± 0.01	43.2 ± 0.3
Cu-W36	2.5 ± 0.7	0.17 ± 0.01	0.49 ± 0.01	43.6 ± 0.2

воздается вытеснением материала из зоны трения на поверхность, что свидетельствует о пластической деформации (рис. 1, *a* и *b*). На электронных микрофотографиях (рис. 1, *c* и *d*) наблюдаются характерные для адгезионного износа следы схватывания и вырывания материала. Методом энергодисперсионного анализа зафиксировано значительное содержание кислорода на поверхности износа: 36 at.% для покрытия Cu и 41 at.% для покрытия Cu-W36. При этом содержание кислорода в исходных покрытиях, измеренное на поперечных шлифах, составляло около 2 at.%. Тепловыделение в процессе трения способствует диффузии кислорода из окружающей среды, что приводит к образованию оксидного трибослоя. Таким образом, основными механизмами износа обоих покрытий являются окислительный и адгезионный износ.

Из рис. 2 видно, что процесс трения условно можно разделить на две стадии. После ~ 500 s приработки для обоих покрытий процесс стабилизируется и коэффици-

ент трения в среднем остается практически неизменным. Средний коэффициент трения покрытия Cu-W36 оказался незначительно выше, чем для покрытия Cu. По всей видимости, за счет хорошей когезионной прочности частицы вольфрама не выкрашиваются в процессе испытания и образуют микровыступы на поверхности трения (рис. 1, *d*), затрудняющие скольжение [6].

Результаты тестов по методу вихревых токов показали, что присутствие упрочняющих частиц вольфрама практически не влияет на удельную электропроводность покрытия. С одной стороны, введение в покрытие частиц вольфрама, обладающего более высоким электрическим сопротивлением ($\sim 5.6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) по сравнению с медью ($\sim 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), должно приводить к снижению электропроводности композита. С другой стороны, в процессе напыления композиционной смеси формируемое покрытие, по всей видимости, подвергается интенсивному деформационному наклепу частицами вольфра-

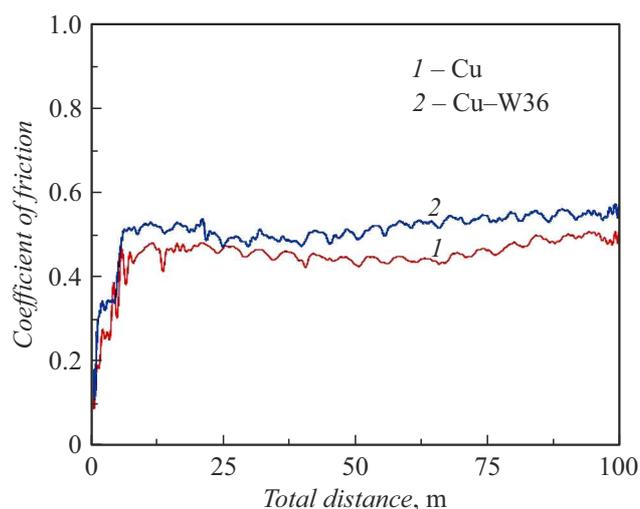


Рис. 2. Эволюция коэффициента трения покрытий.

ма, что приводит к уплотнению межчастичных границ, снижению общего электрического сопротивления и, как следствие, росту электропроводности. Оба этих эффекта предположительно приводят к тому, что удельная электропроводность композитного покрытия в среднем не изменяется по сравнению с таковой для медного покрытия.

Таким образом, показано, что при холодном газодинамическом напылении введение упрочняющих микрочастиц вольфрама в медно-матричное покрытие приводит к значительному снижению удельной скорости износа полученного композита в условиях сухого трения-скольжения. При этом присутствие упрочняющей фазы практически не влияет на коэффициент трения, механизмы износа и удельную электропроводность покрытия.

Благодарности

Исследование проводилось с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Механика“ Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10123 (<https://rscf.ru/project/23-29-10123/>) и Правительства Новосибирской области.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, V. Fomin, *Cold spray technology* (Elsevier Science, Amsterdam, 2007). DOI: 10.1016/B978-0-08-045155-8.X5000-5

[2] R. Singh, J. Kondás, C. Bauer, J. Cizek, J. Medricky, S. Csaki, J. Čupera, R. Procházka, D. Melzer, P. Konopik, *Add. Manuf. Lett.*, **3**, 100052 (2022). DOI: 10.1016/j.addlet.2022.100052

[3] S. Klinkov, V. Kosarev, V. Shikalov, T. Vidyuk, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **125**, 4321 (2023). DOI: 10.1007/s00170-023-11047-3

[4] F.S. da Silva, K.Z. Montoya, S. Dosta, N. Cinca, A.V. Benedetti, *J. Therm. Spray Technol.*, **33**, 1365 (2024). DOI: 10.1007/s11666-024-01783-7

[5] O. Tazegul, O. Meydanoglu, E. Sabri Kayali, *Surf. Coat. Technol.*, **236**, 159 (2013). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.09.042

[6] K.I. Triantou, D.I. Pantelis, V. Guipont, M. Jeandin, *Wear*, **336-337**, 96 (2015). DOI: 10.1016/j.wear.2015.05.003

[7] Y. Zhang, D. Choudhuri, T.W. Scharf, S. Descartes, R.R. Chromik, *Mater. Des.*, **182**, 108009 (2019). DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108009

[8] Q. Chen, M. Yu, K. Cao, H. Chen, *Surf. Coat. Technol.*, **434**, 128135 (2022). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128135

[9] N. Deng, J. Tang, T. Xiong, J. Li, Z. Zhou, *Surf. Coat. Technol.*, **368**, 8 (2019). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.034

[10] P. Petrovskiy, M. Doubenskaia, A. Sova, A. Travyanov, *Surf. Coat. Technol.*, **385**, 125376 (2020). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125376

[11] Y. Chang, P. Mohanty, N. Karmarkar, M. Tahir Khan, Y. Wang, J. Wang, *Vacuum*, **171**, 109032 (2020). DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109032

[12] V.S. Shikalov, T.M. Vidyuk, A.A. Filippov, I.D. Kuchumova, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, **106**, 105866 (2022). DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105866