

3. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / Под ред. Масумото Ц. Пер. с япон. – Москва: Металлургия, 1987. – 328 с.
4. Герцирикен Д. С., Мазанко В. Ф., Тышкевич В. М., Фальченко В. М. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий. – Киев: РИО ИМФ, 1999. – 435 с.

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова
НАН Украины, Киев
НТУ Украины “Киевский политехнический институт”

Поступило в редакцию 30.01.2007

УДК 621.375.826:621.793

© 2007

В. Ю. Хаскин

Комбинированное лазерно-микроплазменное нанесение керамических покрытий на стали

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины И. В. Кривцуном)

A possibility for the ceramic coating deposition using the laser-microplasma technique without the preliminary abrasive jet machining of the part surface is demonstrated. The coverings obtained have high cohesive resistance and are the chemical compounds of a deposited material with iron. These coverings have high resistance to dynamic loads and sufficient thermostability.

Керамические покрытия обладают рядом полезных эксплуатационных свойств, которые обуславливают их применение в промышленности. В первую очередь, это изоляционные свойства, износо- и коррозионная стойкость, а также термостойкость и жаропрочность [1]. Обычно их применяют в медицине для создания защитных покрытий на металлических протезах, для получения изоляционных покрытий на различного рода инструментах, на поверхностях сопел и трубок, контактирующих с горячим газом или плазмой и т. д. Однако при газотермическом нанесении керамических покрытий возникает ряд трудностей, связанных с геометрией напыляемой поверхности, качеством ее подготовки, использованием дорогостоящих подслоев, подбором режима напыления, возможностями оборудования [2, 3].

Полученное в результате газотермического (обычно плазменного) напыления керамическое покрытие наряду с описанными преимуществами имеет и недостатки. Это хрупкость покрытия, опасность его разрушения даже при сравнительно невысоких динамических нагрузках, а также сравнительно невысокая прочность сцепления с подложкой. С ростом толщины покрытия эти недостатки проявляются в большей мере. Для устранения необходимости в применении дорогостоящих подслоев (например, Ni-Al), повышения прочности сцепления с основным металлом и снижения хрупкости за счет диффузии небольшого количества железа основы в покрытие, предлагается использовать лазерно-микроплазменный способ нанесения покрытий, подробно описанный в [4]. При этом технология комбинированного нанесения керамических покрытий будет отличаться от технологии, предложенной в статье [4], из-за различий в поглощении и рассеянии лазерного излучения металлическими и керамическими частицами присадочных материалов [5]. В первом случае частицы

нагревались поверхностно, а во втором — вероятнее всего будет иметь место объемный нагрев из-за достаточной прозрачности керамических материалов для излучения с длиной волны 10,6 мкм [6]. Последнее обстоятельство может вызвать взрывообразное разрушение частиц, сопровождаемое отскоком осколков от поверхностного расплава на подложке. Такой эффект будет препятствовать получению равномерных покрытий, пригодных к дальнейшей обработке и эксплуатации.

Прикладной задачей, которая решалась в ходе разработки технологии лазерно-микроплазменного нанесения керамических покрытий, было нанесение защитных покрытий на термоэлементы теплонагревателей. Эти элементы представляли собой трубы диаметром (150...200) при длине 6000 мм из стали типа 08кп, внутреннее покрытие которых должно выдерживать газовое пламя температурой порядка 1000 °С, а внешнее — излучать тепло с максимальным коэффициентом излучения ($\epsilon \rightarrow 1$). Исходя из данных критериев нами проведен поиск соответствующих порошковых материалов фракции 0...60 мкм. Для внутреннего покрытия был выбран оксид алюминия Al_2O_3 , а для внешнего — никеля (NiO_2), приобретающий после газотермического напыления черный цвет.

При разработке технологии схему лазерно-микроплазменного нанесения покрытий, приведенную в статье [4], использовали не только для внешних поверхностей вращения, но также для внутренних и на плоскостях. Пределы варьирования параметров режима были те же, что и в [4]. Наилучшие результаты получены при расфокусировке излучения CO_2 -лазера мощностью около 2 кВт в пятно диаметром 4...5 мм. При этом на поверхности стальной трубы образовывалась ванна расплава глубиной около 0,1 мм, в хвостовую часть которой ламинарной струей аргоновой плазмы подавался керамический порошок с массовыми расходами 0,4...0,8 г/с. Такой прием позволил не только устранить необходимость в предварительной абразивной подготовке поверхности и применении подслоев, но также и повысить прочность сцепления наносимых слоев с основным металлом до величин, характерных для лазерной наплавки [7]. Процесс проводили при токах 70...90 А, что позволило на скоростях 20...40 мм/с получать слои высотой 0,2...0,5 мм.

Структура полученного описанным способом покрытия показана на рис. 1, а, б. При нанесении Al_2O_3 на поверхностный слой расплавленного металла (стали 08кп) образовалась область в виде столбчатых зерен, отделенная от сердцевины металла неявно выраженной линией раздела — переходной зоной (ПЗ). Эта область представляет собой алитированный слой, состоящий из α -твердого раствора и Fe_2Al_5 [8]. Последний располагается вдоль границ столбчатых кристаллитов и в виде отдельных выделений в матрице. На поверхности алитированного слоя находится твердая и хрупкая составляющая, склонная к откалыванию при ударах и деформациях (на рис. 1 не показана). Эта составляющая по своей структуре аналогична структуре керамических покрытий, получаемых методом микроплазменного напыления.

Структура зоны металла, прилегающего к алитированному слою (ЗТВ), слегка обогащена углеродом и представляет собой ферритную матрицу с выделениями разрыхленного перлита (HV0,05 — 187...192) (рис. 2). По мере удаления от линии раздела выделения перлитной составляющей измельчаются. Структура основного металла (ОМ) — феррит (HV0,05 — 137) и третичный цементит в виде обособленных частиц на границах ферритных зерен (см. рис. 2). Находящийся на поверхности керамический слой имеет твердость 1–2 ГПа и на рис. 2 не показан).

После проведения металлографических исследований образцы керамических покрытий в течение 3 ч при 830...850 °С подвергали испытанию на термостойкость. После это-

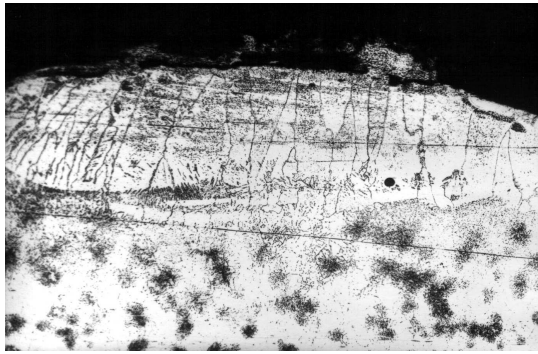
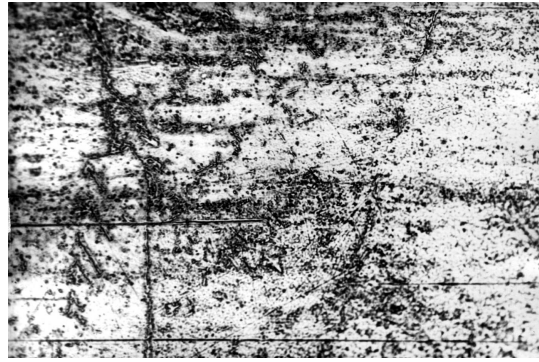
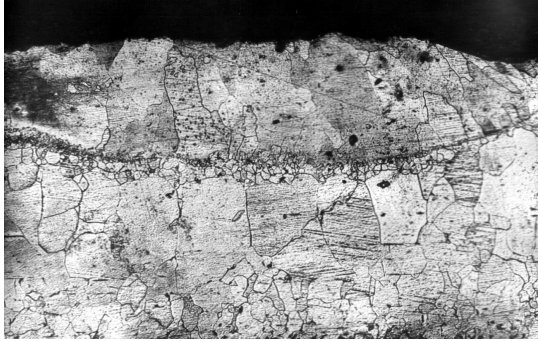
*a**б**в**г*

Рис. 1. Микроструктуры керамического покрытия Al_2O_3 , нанесенного на сталь 08кп, перед испытанием на термостойкость (увел. 100 (*a*), увел. 1000 (*б*)) и после испытания на термостойкость (увел. 100 (*в*), увел. 1000 (*г*))

го исследования повторили. Микроструктуры термообработанных покрытий приведены на рис. 1 (*в*, *г*). Выяснилось, что произошло небольшое, лежащее в пределах допустимого, понижение твердости алитированного слоя (до $\text{HV}_{0,05}$ — 169 ... 183) (см. рис. 2). Внутри столбчатых зерен проявились границы, разделяющие их на равноосные крупные зерна (балл № 3–4 по ГОСТ 5639–82). Выделения Fe_2Al_5 сохранились в виде мелких вкраплений в матрице и иногда вдоль границ столбчатых зерен. По линии сплавления (в ПЗ) наблюдается область измельченных (балл № 8, 9) ферритных зерен с пониженной твердостью $\text{HV}_{0,05}$ — 144. Твердость керамического поверхностного слоя осталась без изменений.

В ЗТВ, прилегающей к линии сплавления, зерно выросло до 2–3 балла, структура представляет собой ферритную матрицу и выделения третичного цементита по границам зерен в виде мелких обособленных частиц. Здесь также присутствуют зерна более мелкого размера (балл № 7, 8). Они располагаются в центральной части образца. Ближе к противоположному краю зерно снова укрупняется до балла № 2, 3. Твердость ЗТВ после термообработки незначительно ($\text{HV}_{0,05}$ — 168 ... 190) повысилась (см. рис. 2).

В ходе проведения экспериментов по лазерно-микроплазменному нанесению керамических покрытий использовали различные присадочные порошки. Помимо Al_2O_3 , это были оксиды никеля, хрома, циркония и ванадия. Однако в двух последних случаях покрытия не были получены из-за выгорания присадочных материалов. Возможно, это связано с разли-

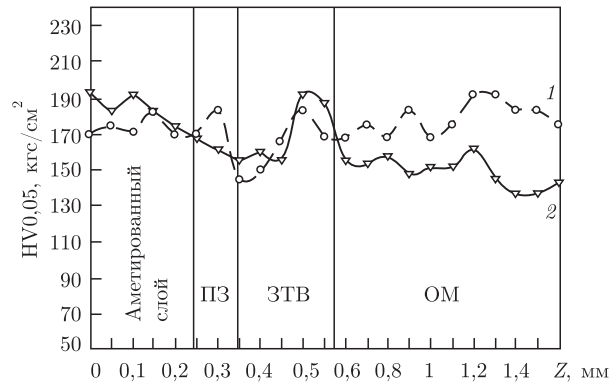


Рис. 2. Распределение микротвердости HV0,05 по глубине Z покрытия и основного металла под ним: 1 — до испытаний на термостойкость; 2 — после испытаний на термостойкость

чем в коэффициентах поглощения излучения CO_2 -лазера использованными веществами, а также с взрывообразным разрушением и разлетом частиц этих веществ [5, 6].

Данные покрытия, кроме термостойкости, испытывали на стойкость к динамическим нагрузкам. Одновременно аналогичные испытания проводили и для покрытий, напыленных микроплазменным способом. Сравнение показало, что в условиях появления сколов в последних, на нанесенных лазерно-микроплазменным способом покрытиях механических повреждений не наблюдалось.

Таким образом, проведенные исследования не только показали принципиальную возможность нанесения керамических покрытий лазерно-микроплазменным способом без струйно-абразивной подготовки поверхности, но и позволяют утверждать, что эти покрытия являются химическими соединениями с содержащимся в основном металле железом. Наличие переходной зоны между покрытием и основным металлом свидетельствует о высокой прочности их сцепления. Наличие примесей, образовавшихся при взаимодействии присадочного материала с основой, делает покрытие более стойким к динамическим нагрузкам, а количество этих примесей снижает термостойкость незначительно.

1. Гладковский В. А., Зинштейн М. Л., Размахнин Г. П. Физико-механические свойства высокопрочных оксидных покрытий, полученных методом плазменного напыления // Повышение прочности и эксплуатационной надежности деталей. — Пермь: Перм. политехн. ин-т, 1968. — С. 78–84.
2. Рыкалин Н. Н., Кулагин И. Д., Кудинов В. В., Синолицын Э. К. Некоторые пути повышения качества металлизационных керамических покрытий // Температуроустойчивые защитные покрытия. — Ленинград: Наука, 1968. — С. 227–231.
3. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л., Ардатовская Е. Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — 544 с.
4. Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Переверзев Ю. Н. Лазерно-микроплазменное легирование и нанесение покрытий на стали // Автомат. сварка. — 2006. — № 2. — С. 3–6.
5. Бушма А. И., Кривцун И. В. Особенности нагрева мелкодисперсных керамических частиц лазерным излучением // Физика и химия обработки материалов. — 1992. — № 2. — С. 40–48.
6. Белов Н. Н. Оптические поля внутри корундовых частиц в спектральном диапазоне излучения CO_2 -лазера // Журн. прикл. спектроскопии. — 1986. — 44, № 6. — С. 948–952.
7. Хаскин В. Ю., Величко О. А. Прочность сцепления слоя, наплавленного лазерным излучением, с металлом основы // Автомат. сварка. — 1994. — № 7./8 (496. /497). — С. 51–52.
8. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка стали. — Москва: Машиностроение, 1950. — 432 с.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 14.02.2007