

УДК 621.791.927

Д-р техн. наук О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, Н. П. Пасько, Б. А. Власенко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ, СТРОЕНИЕ И МИКРОСТРУКТУРА ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ МЕЖДУ НАПЫЛЕННЫМ СЛОЕМ И ПОДЛОЖКОЙ

Представлен механизм образования, строение и микроструктура переходной зоны между напыленным слоем и подложкой. Установлено, что в случае общей основы граница раздела представляет тонкую линию, на которой отчетливо видны оплавленные вершины первоначальной шероховатости. В этом случае разрушение носит адгезионно-когезионный характер, примерно 50/50. А в случае напыления материалом другой основы по сравнению с основой подложки граница соединения характеризуется четкой интерметаллидной прослойкой различной толщины со скачком величины микротвердости. В этом случае слабым местом оказывается граница раздела подложка-напыленный слой, так что разрушение носит адгезионный характер.

Ключевые слова: плазменное напыление, микроструи, шероховатость подложки, плазменно-металлическая струя, микротвердость.

Свойства напыленных металлических материалов в значительной степени зависят от условий напыления проволоки и формирования напыляемых частиц.

При плазменном напылении токоведущей проволокой образуется гетерофазный поток, состоящий из несущей газовой среды и частиц напыляемого материала. При этом на срезе сопла происходит плавление торца проволоки [1] с образованием капли перегретого материала (рис. 1), а в зависимости от состава распыляемого материала при одинаковых параметрах режима распыления сам торец имеет разные геометрические размеры и внешний вид (табл. 1). Под действием силы тяжести и газодинамического напора капля сходит по цилиндрической поверхности на нижней кромке проволоки, срывается с образовавшегося языка, и диспергируется на множество более мелких капель.

В работе [2] это явление наблюдалось при определенных параметрах режима на расстоянии 5–6 мм от торца проволоки, а сами капли имели вытянутую форму в направлении потока. Последнее связывается с наличием в потоке поверхностно активного элемента – кислорода, что снижает силу поверхностного натяжения.

Это позволяет сделать предположение, что диспергированные капли вытягиваются во множество микроструй различной толщины и протяженности, что подтверждается результатами проведенной видеосъемки процесса распыления медной проволоки марки М1 [3].

При этом обеспечивается однородный по объему, скорости, температуре и давлению на подложку гетерофазный поток, которым происходит обработка напыляемой подложки.



Рис. 1. Внешний вид оплавившегося торца проволоки марки М1

Таблица 1 – Состояние торца проволоки, распыленной плазменной струей

Состав проволоки	Угол среза, °	Внешний вид
X19H9Б	50	Поверхность гладкая, края среза гладкие, равные с небольшими закруглениями
07X20H9Г7Т	45	
М1	55	
65Г	45	
ПП-100X15H2Г2Р	50	
Бронза БрКМц3-1	42	Края среза неровные, с небольшими наплывами с вырывами
А1	65	Срез с неровными рваными краями, на торце кратеры и зазубрины

При распылении в калориметр микроструи сферидизуются в твердые капли размерами 0,1–0,4 мм, количество которых составляет 85–90 % [4], что характерно для материалов, приведенных в таблице.

В работе [5] подробно рассмотрено взаимодействие каплеобразных частиц при столкновении с плоскими полированными подложками, что характерно при использовании порошкообразных материалов в предположении сферичности частиц, а в работе [6] деформация капель алюминия и меди, распыленных на стекло в вакууме, связывается с явлениями кавитации, в результате чего происходит вспучивание или разбрызгивание металла.

Однако на практике напыление осуществляется на поверхность, предварительно подвергнутую обработке с целью создания определенной шероховатости [7].

Возможность управления теплообменом и энергетическим состоянием подложки как на стадии подготовки поверхности, так и в процессе напыления представляется весьма существенным в плане повышения эксплуатационных характеристик покрытия.

При соударении струй с шероховатой поверхностью возможны варианты взаимодействия с вершиной шероховатости, с ее боковой поверхностью и углубле-

нием (рис. 2). На первом этапе происходит разрушение струи с образованием брызг, причем в случае взаимодействия с вершиной шероховатости (рис. 2 а) она растекается по боковым поверхностям, подплавляя вершину.

Увеличение температуры на микровыступах приводит к повышенной термической активации элементов поверхности и к их подплавлению, в результате чего возрастает локальная адгезия.

Жидкий металл в виде капли, попадая в углубления, растекается вдоль канавки профиля и кристаллизуется.

При попадании струи на боковую поверхность шероховатости (рис. 2 б), струя стекает в углубление, образуя каплю, растекающуюся, как и в предыдущем случае. При попадании струи в углубление (рис. 2 в) образующаяся капля растекается по нему аналогично.

При соударении всех струй имеет место разбрызгивание металла, его мельчайшие частицы имеют шаровидную форму (рис. 3).

После соударения струи с шероховатой подложкой происходит ее деформация, растекание и в конечном итоге затвердевание металла, из множества частичек которого и формируется напыленный материал.

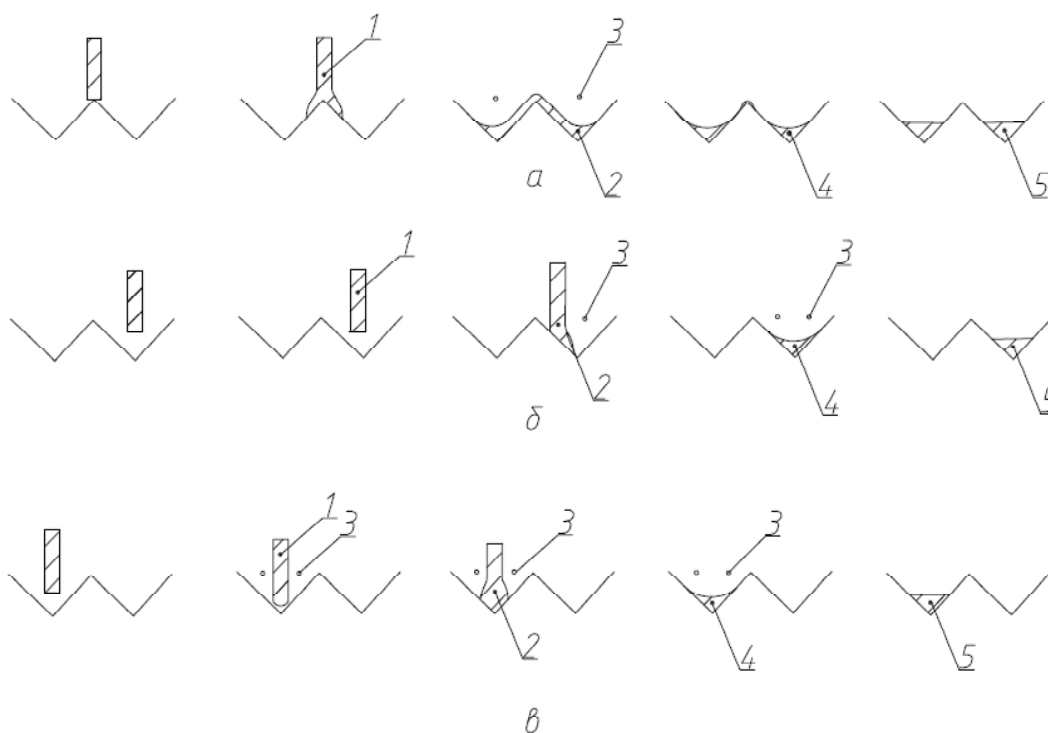


Рис. 2. Схема соударения металлической струи с шероховатой поверхностью:

а – взаимодействие струи с вершиной; *б* – взаимодействие струи с боковой поверхностью; *в* – взаимодействие струи с углублением

- 1 – струя на подлете к подложке
- 2 – струя, растекающаяся по шероховатости подложки
- 3 – брызги после столкновения с подложкой
- 4 – жидкий металл, собравшийся в углублении шероховатости подложки
- 5 – затвердевший металл

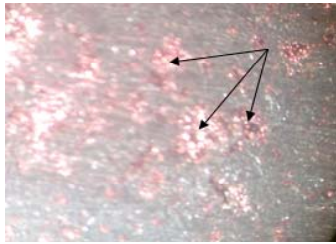


Рис. 3. Частички-брызги, сконденсовані в вигляд мельчайших шариків

Вследствие деформации и растекания частиц физический контакт обеспечивается для подавляющего большинства распыленных частиц.

Процесс взаимодействия частиц можно разделить на три этапа: их сближение, образование физического контакта, активация контактных поверхностей, химическое взаимодействие материалов на границе раздела фаз и объемное взаимодействие.

На первой стадии происходит топохимическая реакция между жидкой металлической составляющей и шероховатой основой, образование физического контакта, чему способствуют явление смачиваемости и пропитки рельефа, который может быть уподоблен открытой пористости. При этом под действием напорного давления, происходит инфильтрация расплава под действием капиллярных явлений в пористую структуру подложки, образование межчастичных контактов и завершение диффузионных процессов [8].

Чем выше температура, давление в контакте и больше время их действия, тем полнее происходит активация основы и химическое взаимодействие материалов. Интенсификации взаимодействия способствует процесс струйного растекания при соударении.

Полнота химического взаимодействия определяется степенью заполнения поверхности контакта частицы с основой очагами схватывания. Последние образуются как пластической деформацией в поверхностном слое основы, так и интенсивным радиальным течением материала, при котором разрушаются тонкие оксидные пленки, обеспечивая необходимые ювенильные поверхности, способные к созданию точек схватывания.

Протекающие в контакте подложка – напыленный слой процессы электронного взаимодействия требуют энергии для активации поверхности, одним из видов которой является энергия упругопластической деформации (механическая активация) – дробеструйная обработка поверхности.

С учетом классификации типов поверхности кристаллов (гладкая, размытая, ступенчатая) [9], в размытой не соблюдается гладкость поверхности на атомном уровне, а для ступенчатых поверхностей переход к соседней фазе более резок, так как их профиль имеет вид зубчатой линии. Поэтому имеющиеся на поверхности углубления и выступы способствуют закреплению новых атомов и перемещение размытых поверхностей в перпендикулярном к ним направлении в процессе роста кристаллов, которое протекает быстро. При этом сило-

вые поля молекул на поверхности несимметричны, что приводит к росту свободной энергии системы, а величина численно равна работе обратного изотермического образования единицы поверхности, характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения. У неподготовленной поверхности $\sigma_{т-жс}$ должно быть меньше $\sigma_{т-жс}$ – у дробеструйной поверхности.

Объемное взаимодействие происходит по дефектам структуры вследствие протекания диффузии, которая облегчается пластической деформацией и температурой в области контакта частица-основа, механическим перемешиванием материалов системы покрытие-основа. Особенно легко протекают объемные процессы в самом напыленном материале, чему способствует пористость, дефектная неравновесная структура и искаженная кристаллическая решетка. Перегрев напыляемых частиц выше температуры плавления повышает прочность их соединения с основой и увеличивает площадь пятна химического взаимодействия за счет возрастания контактной температуры. Для основы внешним результатом деформации является образование кратера или лунки на поверхности. Напряжения, возникающие в области удара частицы о поверхность основы, содействуют выходу дислокаций на контактную поверхность и ее активацию за счет разрыва насыщенных связей, что приводит к образованию дополнительных насыщенных центров.

При скорости напыляемых частиц 200 м/с давление в зоне контакта ускоряет процесс приваривания за счет пластической деформации и за счет упругого искажения кристаллической решетки основы в месте удара каждой частицы.

Соединения образуются главным образом за счет выхода дислокаций ввиду их способности передвигаться со скоростью выше некоторого предельного значения, необходимого для достаточно быстрой деформации, когда на поверхности образуется шлейф разорванных связей, которые являются центрами образования очагов схватывания.

Одновременно с протеканием диффузии при объемном взаимодействии возможно образование и интерметаллидных соединений.

Объемное перемешивание может быть обусловлено гидродинамическими и механическими причинами: эрозией материала основы и затеканием напыляемого материала в микротрещины и микрополости, имеющиеся на поверхности материала основы (дробеструйная обработка).

При дробеструйной обработке на поверхности твердого тела образуются круговые вмятины, которые в поперечном сечении представляют собой каналы-капилляры с переменным сужающимся сечением. Жидкий металл проникает в них, создавая устойчивый вогнутый мениск, направленный в сторону узкой части. Жидкий металл перемещается под действием внешнего давления, радиус кривизны уменьшается, капиллярное давление увеличивается, и он заполняет весь объем капилляра [10].

Рельеф шероховатой поверхности может быть уподоблен пористому телу, где жидкая фаза движется в капиллярах

переменной формы сечений в разном направлении.

При этом происходит смена рельефа вследствие спекания, растворения частичек пористого тела в расплаве, в результате чего изменяется его состав и свойства.

С учетом того, что плазменно-металлическая струя содержит перегретую металлическую составляющую частично находящуюся в парообразном состоянии, создаются благоприятные условия для жидкофазного спекания первого слоя с шероховатой подложкой благодаря лучшим условиям её смачивания. При затвердевании нанесенного слоя происходит его усадка, причем, чем лучше смачивание, тем больше усадка, плотнее и прочнее каждый нанесенный слой.

Поэтому механизм образования покрытия может быть следствием протекания двух процессов: спекания нанесенных слоев, состоящих из перегретых фракция 0,1–0,315 мм с одновременной пропиткой пористой массы более мелкими фракциями, переносимыми в парообразном состоянии. В результате образуется псевдосплав, отличающийся своими физико-механическими свойствами от литого сплава аналогичного состава, которые могут быть улучшены в процессе спекания и пропитки.

Как правило, напыленный псевдосплав имеет характерное слоистое или зернистое строение, что определяется температурой, скоростью, агрегатным состоянием, составом и массой материала. При этом границы между нанесенными слоями или зёрнами, трещины и поры имеют различные размеры. Особенно важным представляется межфазная прочность на границе раздела подложка-напыленный слой, при недостаточной величине которой

защитные свойства покрытия будут потеряны от воздействия внешней среды [5]. В случае общей основы, например, при напылении на сталь Ст3 порошковой проволокой ПП-100Х15Н10Г2Р граница раздела 1 представляет тонкую линию, на которой отчетливо видны оплавленные вершины первоначальной шероховатости (рис. 4 а). Ниже границы соединения имеются отдельные темные участки 2, по-видимому, нерасплавившейся полностью шихты, о чем свидетельствует резкое падение микротвердости (рис. 4 б). В этом случае разрушение носит адгезионно-когезионный характер, примерно 50/50.

Если же напыление производится материалом совсем другого состава по сравнению с подложкой, например, алюминий на сталь (рис. 5 а), медь на алюминий (рис. 5 б), то граница соединения характеризуется четкой интерметаллидной прослойкой различной толщины со скачком величины микротвердости (рис. 5 в).

В этом случае слабым местом оказывается граница раздела подложка-напыленный слой, так что разрушение носит адгезионный характер.

Долю адгезионной и когезионной прочности можно определить в случаях, когда соединенные материалы

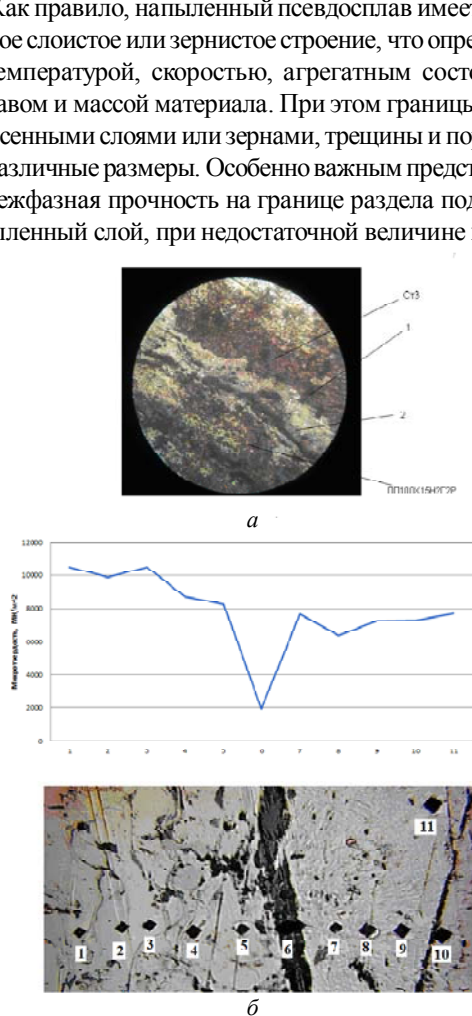


Рис. 4. Структура зоны соединения, напыленного порошковой проволокой ПП-100Х15Н10Г2Р материала на сталь Ст3 (а, $\times 660$) и изменение микротвердости в зоне 2 (б, $\times 440$)

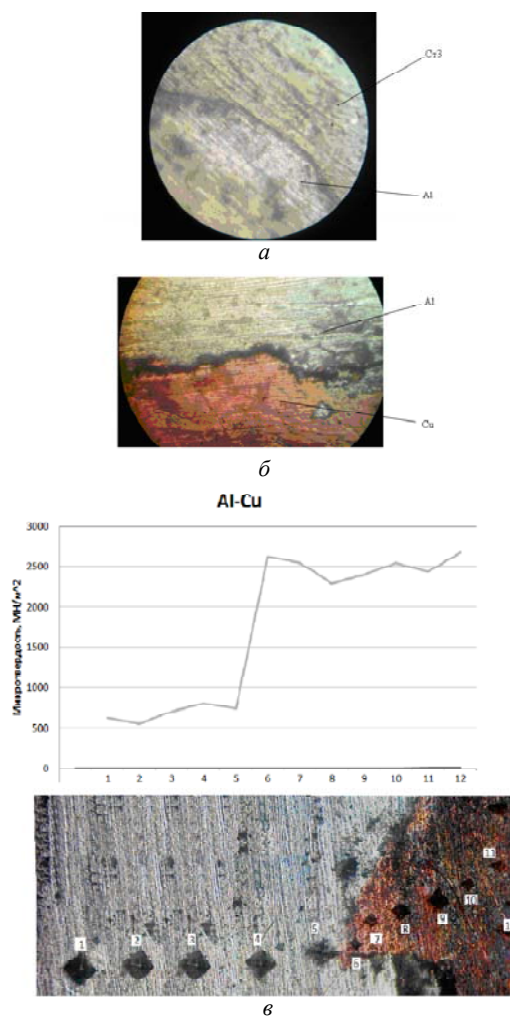


Рис. 5. Структура зоны соединения напыленного слоя алюминия на сталь Ст3 (а), меди на алюминий (б) и изменение микротвердости на границе раздела алюминий-медь (в)

на фрактограммах имеют различную окраску, используя методику, изложенную в работе [11].

Выводы

1. Установлено, что механизм образования покрытия может быть следствием протекания двух процессов: спекания нанесенных слоев, состоящих из перегретых фракция 0,1–0,315 мм с одновременной пропиткой пористой массы более мелким фракциями, переносимыми в паробразном состоянии. В результате образуется псевдосплав, отличающийся своими физико-механическими свойствами от литого сплава аналогичного состава, которые могут быть улучшены в процессе спекания и пропитки.

2. В случае общей основы граница раздела представляет тонкую линию, на которой отчетливо видны оплавленные вершины первоначальной шероховатости. Ниже границы соединения имеются отдельные темные участки, по-видимому, нерасплавившейся полностью шихты, о чем свидетельствует резкое падение микротвердости. В этом случае разрушение носит адгезионно-когезионный характер, примерно 50/50.

3. В случае напыления материалом другой основы по сравнению с основой подложки граница соединения характеризуется четкой интерметаллидной прослойкой различной толщины со скачком величины микротвердости. В этом случае слабым местом оказывается граница раздела подложка-напыленный слой, так что разрушение носит адгезионный характер.

Список литературы

1. Оценка теплового потока из плазмы в торец проволоки-анода из алюминия / [А. В. Ершов, О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, Е. А. Зеленина] // Сварочное производство. – 2015. – № 10. – С. 7–11.
2. Петруничев В. А. К механизму распыления проволоки / В. А. Петруничев, В. В. Титков // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 1. – С. 14–17.
3. Быковский О. Г. Влияние вида материала и технологии распыления на строение плазменной струи величину ее давления на подложку / [О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, А. В. Фоменко, А. В. Четет] // Сварщик. – 2014. – №3. – С. 39–41.
4. Быковский О. Г. Теплосодержание и строение частиц при плазменном напылении токоведущей проволокой / [О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, А. С. Мищенко и др.] // Сварочное производство. – 2015. – № 5. – С. 21–27.
5. Нанесение покрытий плазмой / [В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Беляшенко и др.]. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
6. О взаимодействии жидких капель металла с преградой / [Б. И. Махорин, Н. В. Гревцев, В. Д. Золотухин и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 1. – С. 45–51.
7. Харламов Ю. А. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями / Ю. А. Харламов, Ю. С. Борисов // Автоматическая сварка. – 2001. – №6. – С. 19–26.
8. Куприянов И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. – М.: Наука и техника, 1990. – 176 с.
9. Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах / Миссол В.; пер. с польск. – М.: Металлургия, 1978. – 176 с.
10. Влияние состояния поверхности твердого тела на характеристики смачивания его расплавом / [О. Г. Быковский, В. Е. Самойлов, В. Е. Ольшанецкий и др.] // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2013. – № 2. – С. 55–59.
11. Определение доли адгезионного и когезионного разрушения покрытия, напыленного плазмой / [А. Н. Лаптева, Ю. С. Дмитренко, Н. П. Пасько, О. Г. Быковский] // Сварщик. – 2016. – № 1. – С. 12–13.

Одержано 16.05.2016

Быковский О.Г., Лаптева Г.М., Пасько М.П., Власенко Б.О. Механизм утворення, будова та мікроструктура перехідної зони між напиленням шаром та підложкою

Представлений механізм утворення, будова і мікроструктура перехідної зони між напиленням шаром і підкладкою. Встановлено, що у разі загальної основи межа розділу представляє тонку лінію, на якій чітко видно оплавлені вершини початкової шорсткості. В цьому випадку руйнування носить адгезійно-когезійний характер, приблизно 50/50. А у разі напилення матеріалом іншої основи в порівнянні з основою підкладки межа з'єднання характеризується чітким інтерметалічним прошарком різної товщини зі стрибком величини микротвердості. У цьому випадку слабким місцем виявляється границя розділу підкладка-напилений шар, так що руйнування носить адгезійний характер.

Ключові слова: плазмове напилення, мікрострумені, шорсткість підложки, плазмове-металевий струмінь, микротвердість.

Bykovskii O., Lapteva A., Pasko N., Vlasenko B. The mechanism of the formation, structure and microstructure of the transition zone between the deposited layer and the substrate

The mechanism of formation, structure and microstructure of the transition zone between the deposited layer and the substrate is presented. It was found, that in the case of a common framework the boundary is a thin line, which is clearly seen from the melted-tops initial roughness. In this case, destruction possesses adhesive-cohesive character, about 50/50. And in the case of spraying the material of different basis as compared to the substrate basis border connection is characterized by a clear intermetallic layer of different thickness with a jump in the value of microhardness. In this case, the weak point is interface section of substrate-sprayed layer, so that the destruction possesses adhesive nature.

Key words: plasma spraying, microjet, the roughness of the substrate, plasma metal spray, micro-hardness.