

Повышение надежности слоев, напыленных композиционными порошками на основе  $Al_2O_3$  плакированных ультратонким слоем меди

Д.т.н. Елагина О.Ю., Слободяников Б.А., Буклаков А.В. (РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина)

Кривошеин В.Г., к.т.н. Черемисинов Е.М., к.т.н. Штутман Б.А.,

Напыленные покрытия из  $Al_2O_3$  используются, как правило, для защиты деталей, работающих в тяжелых условиях. Они показывают высокую стойкость во многих агрессивных и окислительных средах, обеспечивая высокую степень защиты деталей при работе в условиях высоких температур. Кроме того, порошки на основе оксида алюминия имеют невысокую стоимость, что определяет экономическую эффективность их применения. Целью данной работы является изучение особенностей формирования и эксплуатационных характеристик композиционных напыленных покрытий, полученных на базе порошка  $Al_2O_3$  плакированного слоем меди.

При напылении оксидных покрытий наиболее важными факторами, влияющими на качество полученного слоя, являются диссоциация оксидов при нагреве и обеспечение требуемой прочности сцепления напыленного слоя с основой. Высокая температура плавления и низкая теплопроводность оксидов затрудняет прогрев напыляемых частиц и приводит к формированию повышенной пористости напыленного слоя. В то же время применение источников нагрева с высокой энтальпией, способствуя прогреву частиц до температур близких к температуре плавления, вызывает диссоциацию оксидов до низших, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик поверхностного слоя. Оксид алюминия характеризуется температурой плавления  $2040\text{ }^{\circ}C$ , что несмотря на его высокую термодинамическую устойчивость, приводит к необходимости ограничения температуры его разогрева. Кислородно-ацетиленовое газовое пламя характеризуется относительно невысокой температурой нагрева (3000 – 3500

<sup>0</sup>С). Поэтому подготовку исследованных образцов проводили с использованием метода порошкового газопламенного напыления на торцевую поверхность цилиндрических образцов диаметром 20 мм и высотой 10 мм.

Отслаивание покрытия как непосредственно после напыления, так и в процессе эксплуатации является наиболее распространенным дефектом напыленных изделий. Для повышения прочности сцепления часто используют композиционные порошки, содержащие в своем составе, помимо оксида, частицы более пластичного и легкоплавкого металла, например меди. Однако, использование композитных порошков в виде разнородных смесей имеет существенный недостаток, связанный с их сегрегацией по фракциям при напылении, вследствие разницы плотностей разнородных материалов. Порошки, подвергнутые плакированию слоем металла, такого недостатка лишены и являются более перспективными для использования.

Для исследования использовались порошки дисперсностью 40 - 50 мкм на основе  $Al_2O_3$ , плакированные слоем меди разной толщины. Медь, обладая высокой теплопроводностью, обеспечивает хорошую передачу теплоты к частице оксида вместе с тем, уменьшая степень его диссоциации [1].

Важным вопросом, определяющим эксплуатационные характеристики и прочность сцепления композиционного напыленного слоя с основой, является весовое соотношение оксидной и медной составляющих в составе порошка. В работе были исследован ряд порошков с разным весовым соотношением медной и оксидной составляющих и определена прочность сцепления методом отрыва основы от покрытия по стандартной методике [2] (таблица 1).

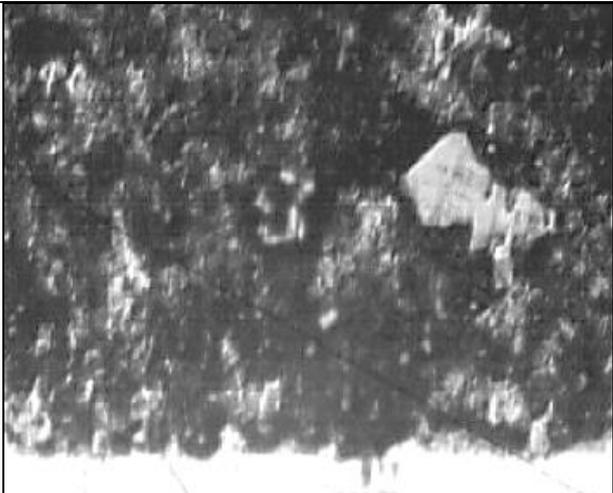
Таблица 1

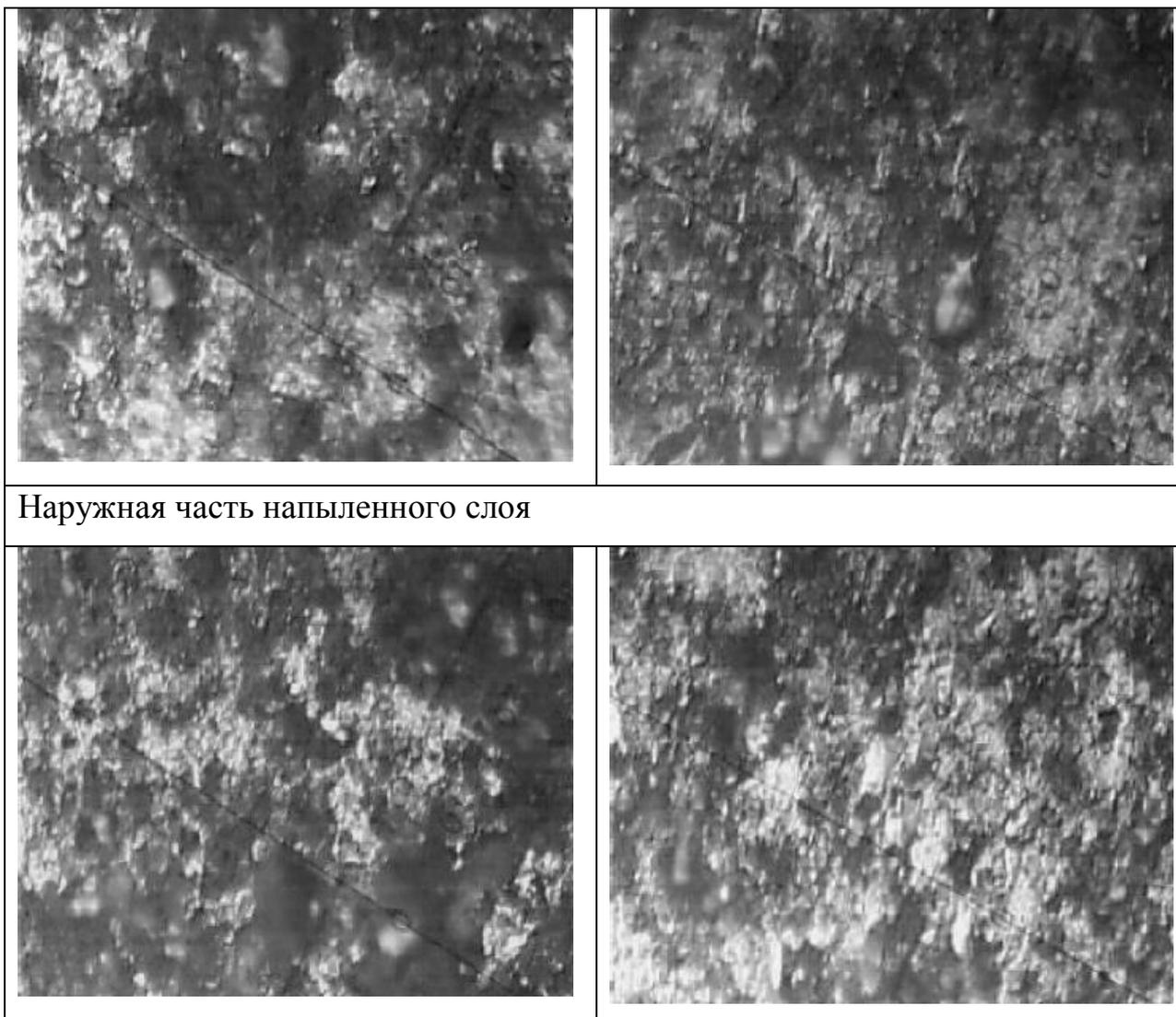
№	Состав порошков		Толщина плакированного слоя, мкм	Прочность сцепления с медной
	Cu, вес.% (объем.%)	$Al_2O_3$ , вес.% (объем%)		

				основой, МПа
1	20 (10)	80 (90)	1,6 – 1,8	27,0
2	35 (20)	65 (80)	4,0 – 4,2	24,0
3	50 (30)	50 (70)	7,0-7,2	25,0

Как видно из полученных данных с ростом толщины медного слоя на оксидной частице не происходит существенного изменения прочности сцепления напыленного слоя с основой. Высокая теплопроводность меди, обеспечивая передачу теплоты через плакированный слой к оксидной сердцевине, вместе с тем препятствует увеличению температуры самого слоя меди, что и сказывается на уровне прочности сцепления с основой. Таким образом, для дальнейшего исследования были использованы порошки с ультратонкой толщиной плакированного слоя 1,0 – 2,0 мкм.

С целью изучения влияния химического состава основы на строение и свойства напыленных покрытий из  $Al_2O_3 + Cu$  на образцы, изготовленные из меди и стали 20, проводилось напыление слоя порошка толщиной 1,0 мм. На рисунке 1 представлены фотографии строения напыленного слоя.

$Al_2O_3 + Cu$ на медь	$Al_2O_3 + Cu$ на сталь 20
Зона сцепления	
	
Центральная часть напыленного слоя	



Наружная часть напыленного слоя

Рисунок 1 – Фотографии различных участков напыленных слоев  
плакированным оксидом алюминия (x400)

Слои, полученные при напылении композиционного материала, характеризуются незначительным количеством пор (в пределах 5 - 8%) и выраженным кристаллическим строением. Зона сцепления при напылении на сталь имеет более сглаженное строение по сравнению с аналогичным участком на медной основе. Границы исходных частиц порошка менее ярко выражены, что говорит о большем разогреве этого участка поверхностного слоя при напылении по сравнению с тем же участком слоя на медной основе из-за интенсивного отвода теплоты подложку. Такие же особенности характерны и для центральной части напыленного слоя. Поверхностный участок существенных отличий при напылении на разные основы не имеет.

Для сравнения также проводилось напыление порошка из чистого оксида алюминия на стальной образец. Фотографии микроструктуры напыленного слоя представлены на рисунке 2.

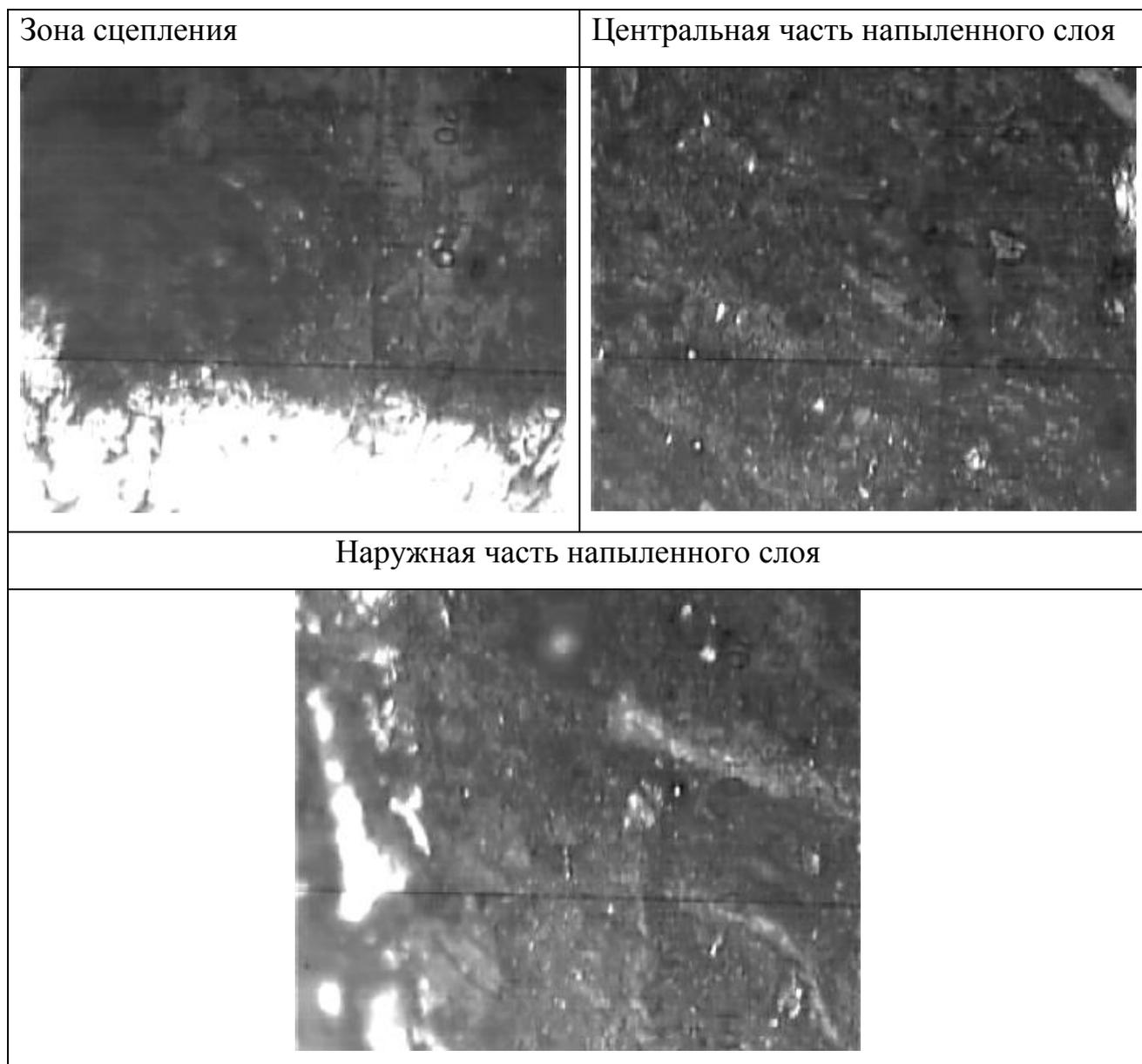


Рисунок 2 – Фотографии различных участков напыленных слоев чистым оксидом алюминия (x400)

Как видно на фотографиях, представленных на рисунке 2, напыленный слой характеризуется сохранением кристаллического строения и пористостью на уровне 12-15%. Участок сцепления с основой имеет ярко выраженный рельеф. Поверхностный слой неравномерный со следами кристаллических сколов. Сравнительный анализ напыленных покрытий из

оксида алюминия с плакированием и без него показывает существенное снижение пористости и большую степень контакта частиц присадочного материала при наличии на них слоя меди.

Наряду со снижением пористости напыленного слоя одним из наиболее значимых эффектов плакирования керамических частиц слоем металла является повышение прочности сцепления таких слоев с основой, особенно под действием изгибающих нагрузок. Для сравнительной оценки увеличения прочности сцепления напыленных слоев из оксида алюминия с плакировкой слоем меди и без нее были проведены испытания пластин на загиб. Пластины из стали 20 толщиной 3,0 мм покрывались и подвергались напылению с двух сторон слоем толщиной 300 – 400 мкм. Далее пластины подвергались последовательному загибу на углы от 0 до 90° на оправке диаметром 12 мм (рисунок 4).

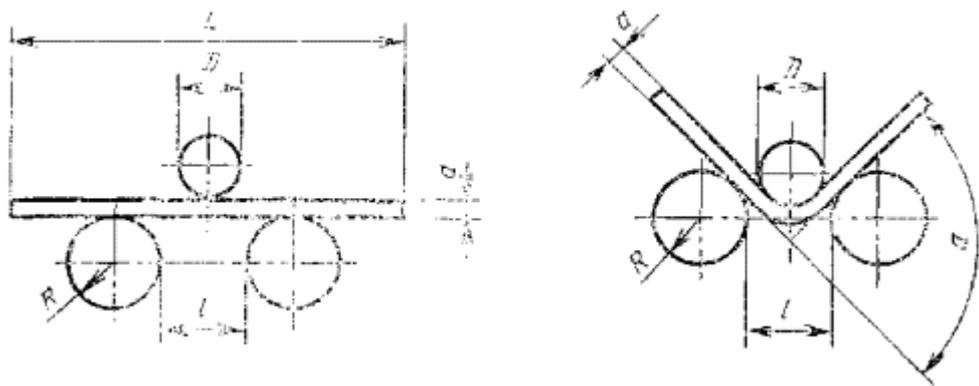


Рисунок 4 Схема испытаний на загиб

В процессе загиба внутренний напыленный слой, подвергался действию сжимающих нагрузок, а наружный – растягивающих.

Результаты визуального осмотра в процессе загиба состояния напыленных слоев, находящихся на наружной стороне пластин, показали, что без нарушений сплошности напыленный слой с плакировкой выдерживает угол загиба в пределах 18-20°. При отсутствии плакировки частиц появление микротрещин фиксировалось на углах загиба свыше 10°. Дальнейшее увеличение угла загиба для слоя с чистым оксидом алюминия до 25° вызвало интенсивный рост трещин и появление сколов, особенно по

краям пластин. Плакированные слои выдерживали загиб без сколов вплоть до углов загиба близких к  $90^{\circ}$ .

Внутренние напыленные слои, работающие на сжатие, как в случае с плакировкой, так и без нее показали значительно меньшую стойкость к отслаиванию. При этом полное отслаивание слоя, напыленного плакированным оксидом алюминия наблюдалось при углах загиба  $75-80^{\circ}$ , а для слоя из чистого оксида алюминия – при  $25^{\circ}$ .

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение порошков на основе оксида алюминия, плакированных ультратонким слоем меди позволяет существенно повысить эксплуатационные свойства напыленных слоев за счет снижения до 1,5 раза пористости полученного слоя и повышения стойкости к отслаиванию при растяжении и сжатии в 2,5 – 3,0 раза.

1. Порошковая металлургия
2. Кречман Э Напыление металлов, керамики и пластмасс. М.: Машиностроение, 1966 г.