

Верхорубов В. С., Невежин С. В., Коробов Ю. С., Филиппов М. А.  
*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*

Макаров А. В.  
*ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург*

## **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ И НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ СО СТРУКТУРОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОГО АУСТЕНИТА**

*Выполнен сравнительный анализ структуры и трибологических свойств защитных слоёв, полученных методами активированной дуговой металлизации и наплавки. В качестве наносимых материалов была использована порошковая проволока на основе железа, позволяющая в наплавленном и напылённом состояниях получать покрытия со структурой метастабильного аустенита. Приложенная к ним нагрузка расходуется на превращение аустенита в мартенсит. Для изучения свойств полученных покрытий использовались методы структурного и фазового анализа, а также испытания на абразивный и адгезионный износ. Объяснены различия в свойствах между напылёнными и наплавленными слоями, основанные на анализе входящих энергетических параметров дугового напыления и наплавки.*

**Ключевые слова:** *дуговая металлизация, наплавка, порошковая проволока, электроды, износостойкость, метастабильный аустенит, структура.*

Сплавы со структурой метастабильного аустенита применяют для защиты деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания и многократного контактно-ударного нагружения [1]. К таким сплавам относятся сплавы системы Fe-Cr-C-Ti, например, сплав типа 150X8T2. Его используют для поверхностного упрочнения дуговой наплавкой [2] или металлизацией [3].

Ранее не проводилась оценка стойкости покрытий со структурой метастабильного аустенита различными методами применительно к разным условиям изнашивания. Отсутствие таких исследований не позволяет определить рациональные области применения наплавленных слоёв

и напылённых покрытий применительно к условиям их эксплуатации.

Цель данной работы заключалась в определении области применения наплавленных и напылённых покрытий со структурой метастабильного аустенита, в зависимости от условий изнашивания детали, на основе исследования их структурных и трибологических характеристик.

Для нанесения покрытий толщиной 1,0–1,3 мм использовали аппарат активированной дуговой металлизации АДМ-10 [4]. В качестве напыляемого материала использовали порошковую проволоку ППМ-6 диаметром 1,6 мм, системы легирования 150X8T2Ю.

Наплавку слоя толщиной 4 мм выполняли штучными электродами диаметром 3 мм за 4 прохода. Система легирования наплавленного электродами металла – 150X8T2 [2].

Трибологические испытания покрытий и слоев были выполнены по схеме «палец–пластина» (табл. 1).

*Таблица 1*

Режимы трибологических испытаний покрытий и слоев

№	Условия трения	Контртело	Путь трения, м	Скорость, м/с	Удельная нагрузка, МПа	Рабочая поверхность образца, мм
1	сухое	абразив	60	0,16	1	10×10
2	сухое	X12M (63 HRC)	160	0,07	6	7×7
3	со смазкой	X12M (63 HRC)	320	0,07	16 и 30	7×7

Рентгеновский анализ и замеры микротвёрдости покрытий производились в состоянии после напыления и после дополнительной обкатки металлическим шариком, его возвратно-поступательном перемещении по рабочей поверхности образца при нормальной нагрузке 100 Н [5].

Металлографический анализ показывает различия в структуре покрытия и слоя (рис. 1, а). На поперечном сечении видно, что покрытие имеет типичное слоистое строение. Толщина слоёв в нем составляет преимущественно 5–10 мкм.

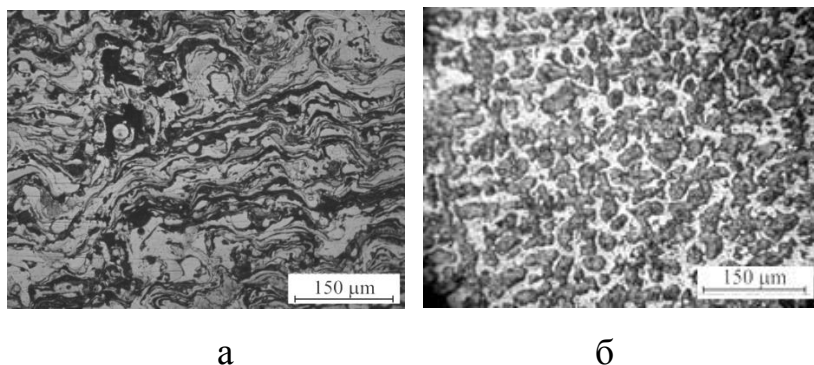


Рис. 1. Структура образцов: а – поперечное сечение напыленного покрытия; б – поперечное сечение наплавленного слоя

Сканирующая электронная микроскопия поверхности покрытия показала, что светлые поля – это металл, основу которого составляет железо, 6–10 мас. % Cr и незначительное количество титана. Эти металлические фрагменты представляют собой твёрдый раствор хрома в аустените и мартенсите. Фрагменты серого цвета обладают максимальным содержанием легирующих элементов 10–12 мас. % Cr, 2–3 мас. % Ti, основа – Fe. Эти серые участки, вероятно, являются комплексами карбидов и оксидов, образовавшихся в процессе напыления.

Рентгеноструктурный анализ поверхности покрытия показал, что оно имеет металлическую основу 70 %. Оставшаяся доля включает карбиды хрома, карбиды титана и оксиды. В свою очередь металлическая основа состоит из мартенсита и остаточного аустенита в соотношении 50/50 %. Средняя микротвёрдость покрытия составляет 580–600 кг/мм<sup>2</sup>.

Металлографический анализ слоя показал, что его микроструктура имеет дендритно-ячеистую морфологию (рис. 1, б). Тёмные участки представляют собой металлическую матрицу в форме слегка вытянутых эллипсов, средний размер которых составляет 15 × 10 мкм.

Рентгеноструктурный анализ слоя показывает присутствие тугоплавких карбидов титана типа  $TiC$ , выделяющиеся первыми во время охлаждения. Карбиды с меньшей температурой плавления, типа цементита  $(Cr, Fe)_3C$  и  $(Cr, Fe)_7C_3$ , присутствуют в эвтектике. Количество металлической основы в наплавленном металле вместе с выделившимися вторичными карбидами, составляет около 75 %. Соотношение остаточного аустенита и мартенсита в матрице составило 70/30 %. Микротвёрдость наплавленного слоя составляет 630–640 кг/мм<sup>2</sup>.

Проведенный анализ показал, что наплавленный металл содержит основные карбиды и карбидную эвтектику, которые не наблюдаются в микроструктуре покрытия. Такие отличия в структуре слоя и покрытия обусловлены особенностями их формирования [6–8] при наплавке и напылении.

Измерения микротвердости поверхности покрытия после нагружения (рис. 2) свидетельствуют об изменениях в структуре покрытия и слоя. Снижение количества аустенита в металлической матрице после нагрузки в 2–3 раза подтверждено данными рентгеноструктурного анализа (табл. 2).

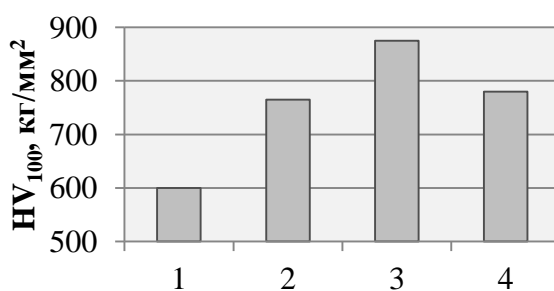


Рис. 2. Микротвёрдость поверхности напылённого покрытия: 1 – до нагружения, 2 – после первой обкатки, 3 – после второй обкатки, 4 – после испытания на абразивный износ

## Фазовый состав покрытия и слоя до и после поверхностного нагружения

Вид теста		Соотношение аустенит / мартенсит, %	
		Слой	Покрытие
До нагружения		70/30	50/50
Обкатка шариком	первая	–	40/60
	вторая	–	30/70
Абразивный износ		20/80	20/80

После изнашивания по закреплённому абразиву (табл. 1, режим 1) потери массы в случае слоя в 7 раз меньше чем у низкоуглеродистой стали Ст. 20, взятой в качестве подложки для нанесения покрытий, а в случае покрытия меньше всего в 3 раза (рис. 3). Вероятно, абразивные частицы, внедряющиеся в межслойные границы и поры поверхностного слоя покрытия, приводят к его ускоренному износу в сравнении с наплавленным металлом.

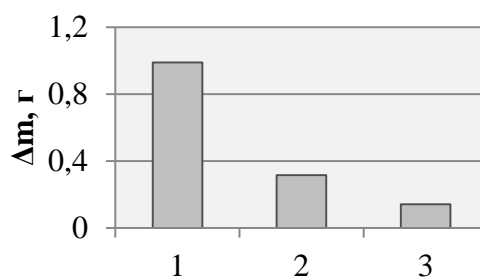


Рис. 3. Потери массы образцов при износе по закреплённому абразиву:  
1 – Ст. 20 без покрытия; 2 – покрытие; 3 – слой

В условиях сухого трения (табл. 2, режим 2), величина износа покрытия существенно выше по сравнению с наплавленным слоем (рис. 4). Для наплавленного металла величина износа на всём пути трения от 8 до 160 м (рис. 4, кривая 2) примерно постоянная. Величина износа покрытия напротив изменяется на всём пути трения (рис. 4, кривая 1). В процессе испытаний коэффициенты трения ( $f$ ) у образцов с покрытием находились в пределах

0,45–0,61, а у наплавленного металла в пределах 0,53–0,61, что характерно для обоих случаев адгезионного изнашивания стальных поверхностей [9].

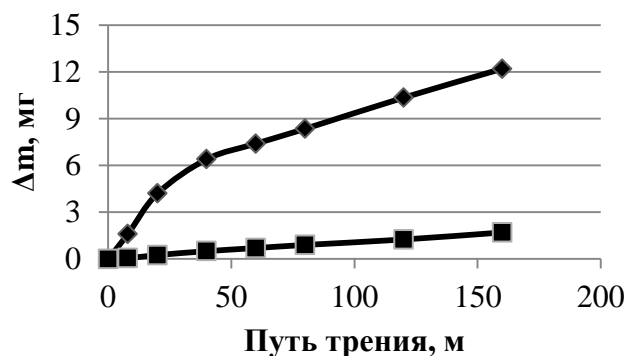


Рис. 4. Потери массы образцов в условиях сухого трения: 1 – покрытие; 2 – слой

В условиях трения скольжения со смазкой (табл. 1, режим 3) соотношение трибологических характеристик покрытия и слоя обратное (табл. 3). Во всех режимах нагружения потери массы наплавленного слоя незначительны, тогда как у покрытия наблюдается повышение массы вследствие заполнения пор смазкой. Коэффициенты трения (f) у покрытия и слоя находились в диапазоне 0,11–0,13, соответствующем режиму граничного трения [9].

Таблица 3

Износ покрытия и слоя в условиях трения скольжения со смазкой

Параметры испытания		Δm, мг	f
Удельная нагрузка 16 МПа	покрытие	–1,2	0,13
	наплавленный металл	0	0,13
Удельная нагрузка 30 МПа	покрытие	–0,5	0,12
	наплавленный металл	0,4	0,11

Таким образом, основываясь на проведённом анализе, в зависимости от условий эксплуатации детали, может быть выбран рациональный метод упрочнения или восстановления поверхности с использованием сварочных

материалов, обеспечивающих получение износостойких покрытий на основе метастабильного аустенита.

### **Выводы**

1. Выявлено, что основное влияние на трибологические характеристики покрытий и слоёв типа 150X8T2 с метастабильным аустенитом, полученных методами напыления и наплавки, оказывают особенности их структуры, связанные с условиями формирования.

2. В условиях износа по абразиву стойкость у наплавленного слоя в 2 раза выше, чем у напылённого покрытия.

3. Наплавка сплавов со структурой метастабильного аустенита предпочтительна для деталей, работающих в условиях абразивного износа и сухого трения, а дуговая металлизация – для узлов, работающих при трении со смазкой.

### **Литература**

1. Schastlivtsev V. M.; Filippov, M. A. Role of the Bogachev – Mints Concept of Metastability of Austenite in Choosing Wear-Resistant Materials // *Metal Science & Heat Treatment*. 2005. Vol. 47 Issue 1/2. P. 3–5.

2. Кулишенко Б. А., Балин А. Н., Филиппов М. А. Электроды для износостойкой наплавки деталей, подвергаемых абразивному и ударно-абразивному воздействию // *Сварочное производство*. 2004. № 11. С. 28–32.

3. Metastable austenite type Core Wire for Arc Spraying - modeling of heat transfer in end face and coating structure analysis / Korobov Yu., Filippov M., Belozertsev A., Neveszin S., Shymiakov V. Proc. of ITSC 2010, ASM International: Singapore, 2010.

4. Korobov Yu. S. Efficiency of using activated arc metallization for the deposition of protective coatings // *Welding international*. 2005. 19 (7). P. 580–582.

5. Елагина О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин: учебное пособие. М.: Логос, 2009. 488 с.

6. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. К.: Вища школа, 1976. 424 с.

7. Бороненков В. Н., Коробов Ю. С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности: монография. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. 268 с.

8. Korobov Yu., Boronenkov V., Modeling of oxygen intake by particles at Arc Spraying. Proc. of ITSC 2008, ASM International: Maastrich, Netherlands. 2008. P. 317–322.

9. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968. 543 с.