

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.793

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.

## ФОРМИРОВАНИЕ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ, ОПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Высокая адгезионная прочность самофлюсующегося покрытия с основой после нанесения на подложку может быть обеспечена последующим его оплавлением объемными или локальными источниками нагрева. Причем применение лазерного излучения позволяет внести значительные изменения в технологии формирования покрытий из самофлюсующихся сплавов, обеспечить оплавление покрытия без объемного разогрева детали, что позволяет расширить номенклатуру упрочняемых изделий за счет крупногабаритных и тонкостенных деталей [1].

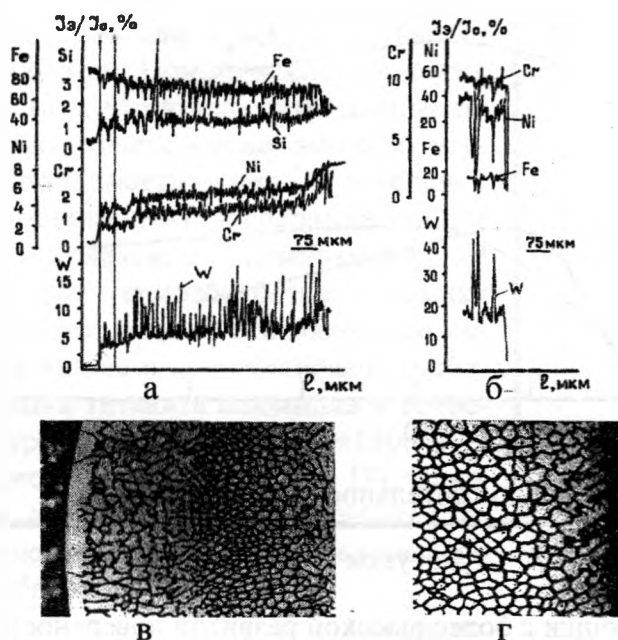


Рисунок 1 - Концентрационные кривые распределения элементов в сплаве ПГ-СРЗ + 30 об. % WC оплавленного лучом лазера с коэффициентом перемешивания  $K_p = 2$  в переходной зоне со сталью (а, в) и на поверхности (б, г)

Варьирование режимами лазерной обработки обеспечивает и управляемое изменение физико-механических свойств. Однако на фоне современных тенденций к увеличению мощности и производительности машин, приводящих к росту удельных нагрузок в узлах трения и к повышению требований к надежности и долговечности деталей машин, появляется необходимость постоянного совершенствования порошковых покрытий [2]. Дополнительное легирование самофлюсующегося сплава можно произвести напылением механических смесей с карбидными добавками бора, хрома и вольфрама.

Целью исследования является изучение процесса массопереноса по глубине слоя и на границе покрытия и основы при оплавлении лазерным излучением газотермического самофлюсующегося покрытия с тугоплавкими добавками.

Методика исследований. Для исследования процесса лазерного оплавления газотермического покрытия использовали метод электронно-зондового анализа на микроанализаторе «КАМЕКА». Учитывая, что процесс оплавления имеет общие закономерности для всех композиций и определенные трудности в записи концентрационных кривых бора, углерода (в случае добавки  $W_4C$ ) и в наложении концентраций хрома покрытия и  $Cr_3C_2$  из ме-

ханической смеси, исследованию подвергались образцы с покрытием ПГ-СРЗ + 30% об. WC.

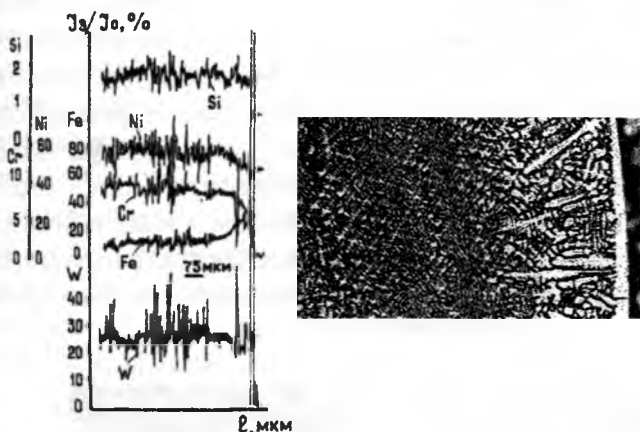


Рисунок 2- Концентрационные кривые распределения элементов в сплаве ПГ-СРЗ + 30 об. % WC оплавленно-го лучом лазера с коэффициентом перемешивания  $K_{п} = 1,1$  по глубине слоя

в зоне покрытия – около 20%. Это свидетельствует о том, что несмотря на проплавление металла основы, процесс перемешивания протекает не полностью по всей ванне расплава. Однако содержание легких элементов сохраняется практически неизменным по всей глубине проплавленной зоны.

При лазерной обработке покрытия с проплавлением 5-10% основы (рис. 2) содержание железа не превышает 8-10% и его распределение по покрытию равномерно, так же как и легких элементов, а, значит, и упрочняющей фазы. Показательным является тот факт, что распределение вольфрама по зоне расплава тем равномернее, чем больше степень проплава по сравнению с неоплавленным образцом (рис. 1, 3), что свидетельствует о растворении вольфрама в никелевой матрице.

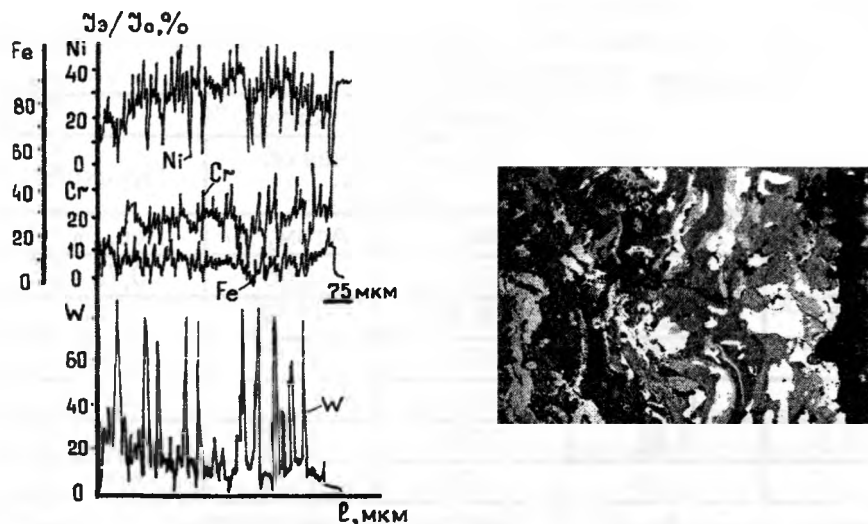


Рисунок 3- Концентрационные кривые распределения элементов в сплаве ПГ-СРЗ + 30 об. % WC после плазменного напыления

Концентрационные колебания вольфрама говорят о наличии карбидов типа  $W_x C_{x-1}$ . Распределение вольфрама наглядно видно из топографического снимка в рентгеновских лучах  $W_{K\alpha}$  (рис. 4, а). Для хрома эта неоднородность выражена менее отчетливо (рис. 4, б). При этом следует отметить более или менее однородное распределение бора (рис. 4, в) в большом масштабе. Однако в масштабе, сопоставимом с размерами фаз, имеются неоднородности,

Суммарное количество бора, углерода, кремния вычислялось как остаток от ста процентов. Исследования проводили на покрытиях, оплавленных по 2-м режимам: с глубоким проплавлением поверхности (рис. 1) и с проплавлением 5-10% основы (рис. 2) Для сравнения исследовали покрытие такого же состава без оплавления (рис.3).

Как видно из рисунка 1, при глубоком проплавлении основы имеет место ожелезнение покрытия. При этом в зоне глубокого проплава с основой содержание железа составляет ~ 80%, а

связанные с наличием боридов. Видимость однородности распределения элементов на топографических снимках связана со строением фаз, входящих в состав покрытия.

В основном, дендритные по строению, структурные составляющие как бы пронизывают друг друга. Из рис. 5, где представлены структуры в поглощенных (а) и отраженных (б) электронах, отчетливо видно, что химический состав дендритов и междендритных областей существенно отличается. В поглощенных электронах дендриты имеют светлый контраст, в отраженных – темный. Светлые ажурные окаймления на рис.5, б – это фазы с высоким содержанием легких элементов – В и С. По различной тональности видно, что эти фазы имеют неодинаковый состав и соответствуют, вероятно, карбидам хрома и вольфрама. Между снимками на рис. 5 и данными точечного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) структурных составляющих, представленных в таблице 1, имеется тесная корреляция.

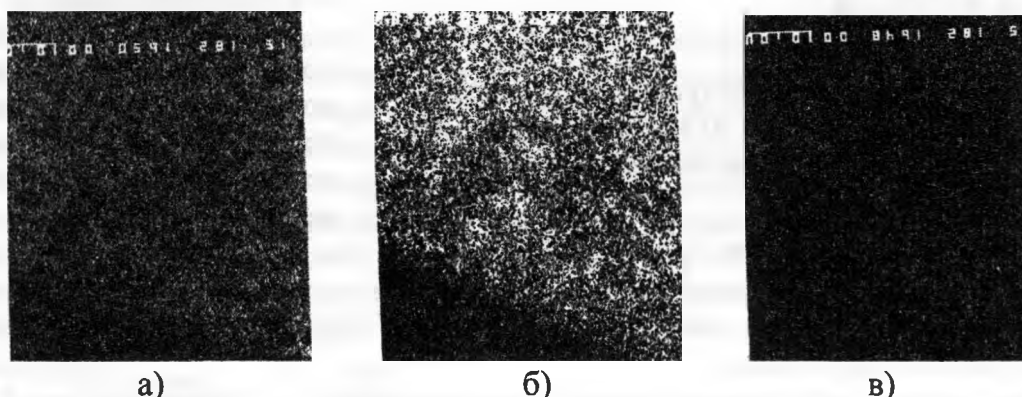


Рисунок 4- Топографическое распределение вольфрама, хрома, бора в рентгеновских лучах W, Cr, В: а – X-Ray-W; б – X-Ray-Cr, в – X-Ray-B

Из данных таблицы 1 следует, что сами дендриты обогащены железом и никелем, а междендритные области – вольфрамом и хромом – последние как раз соответствуют смеси фаз, в том числе карбидов вольфрама и хрома.

Таблица 1. Результаты точечного МРСА зоны глубокого проплава о основной покрытия ПР-СРЗ +30% WC

№ пп	Элемент	Содержание элементов, %					
		Дендрит $\gamma$ раствора (1)		Междендритная область (2)		Переходная зона (3)	
		Вес, %	Атом, %	Вес, %	Атом, %	Вес, %	Атом, %
1	Si	1,04	2,02	0,74	1,66	0,76	1,33
2	Cr	7,89	8,27	10,71	12,98	6,64	6,32
3	Fe	60,27	58,83	49,19	55,51	60,62	53,73
4	Ni	16,46	15,29	10,57	11,34	16,20	13,66
5	W	11,67	3,46	27,03	9,27	10,41	2,80
6	B,C	2,67	12,13	1,76	9,24	5,37	22,16

Состав дендритов (по Fe, Ni, W, Cr) близок к составу переходной зоны. Об этом свидетельствует их одинаковый контраст на снимках структуры в поглощенных (отраженных) электронах (рис. 5).

При этом, как уже указывалось, вследствие высокой плотности подводимой мощности, высокой скорости нагрева, частично вследствие гауссова распределения энергии по лучу, а также относительно низкой теплопроводности напыленного покрытия, имеет место значительный градиент температур, как по площади, так и по глубине ванны расплава. Это, в свою очередь, обеспечивает наличие градиента сил поверхностного натяжения, который заставляет двигаться поверхностные слои от центра к краям зоны. За счет сил

вязкого трения в это движение ются и внутренние слои расплава, собствуя его перемешиванию, равномерному распределению легирующих элементов, выравниванию температуры по объему ванны расплава и снижению температурного градиента по глубине. При достижении зоной расплава границы покрытие-основа некоторое время происходит омывание ее расплавом покрытия. При этом происходит разогрев материала основы за счет теплопроводности; раскисление окисных пленок. За счет теплопроводности также происходит увеличение зоны проплава и по ширине (шире, чем лазерный луч). В этой части теплоотвод лучше (охлаждение идет в более холодные слои основы), поэтому перегревы здесь меньше, расплав в этих зонах более вязкий и процессы перемешивания протекают менее интенсивно, чем в центре зоны. Развитость процессов перемешивания в центре зоны проплава обуславливает более высокую интенсивность омывания центральной части (находящейся под лучом) подложки перегретым сплавом и поэтому более высокую скорость ее нагрева, (теплопроводность, конвекция). При достижении в этой зоне температуры плавления стали начинается плавление основы и перемешивание ее материала с покрытием. Однако расплав покрытия является сам по себе в этот момент сильно перегретым.

Степень перегрева определяется как:

$$K = \frac{T_{\text{факт.}}}{T_{\text{плавл.}}} = \frac{T_{\text{плавл.}} + \Delta T}{T_{\text{плавл.}}},$$

где:  $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2$  ( $\Delta T_1 = T_{\text{плавл.осн.}} - T_{\text{пл.по кр.}} \approx 300\text{K}$ );  $T_2$  - соответствует градиенту температур по глубине слоя и составляет не менее 200 - 300 К. Степень перегрева для покрытия примерно составит:

$$K_{\text{п.покр.}} \approx 1 + \frac{(500 \dots 600)}{1273} \approx 1,5 \dots 1,6.$$

Для основы с учетом того, что температура ее плавления составляет 1670 К, а теплопроводность выше, чем покрытия, степень перегрева будет значительно ниже и  $K_{\text{п.осн.}}$  не будет превышать 1,1.

Учитывая то, что вязкость расплава пропорциональна степени перегрева, следует ожидать, что интенсивного стопроцентного перемешивания материала проплавленной основы с покрытием не произойдет в относительно ограниченные промежутки времени, что подтверждается данными вышеприведенных МРСА. Такой процесс начинает протекать интенсивно при продолжении воздействия лазерного луча.

После прекращения воздействия лазерного излучения начинается остывание и кристаллизация ванны расплава. Наиболее интенсивное охлаждение и кристаллизация в первую очередь, происходит в зонах, примыкающих к основе и в зонах ее проплава за счет теплопроводности в массу детали. Также интенсивно охлаждение происходит и за счет теплоотдачи в окружающую среду с поверхности ванны расплава. В таких условиях может иметь место случай, что в последнюю очередь кристаллизуется зона или слой, занимающий промежуточное положение между приповерхностными слоями и слоями, прилегающими к подложке.

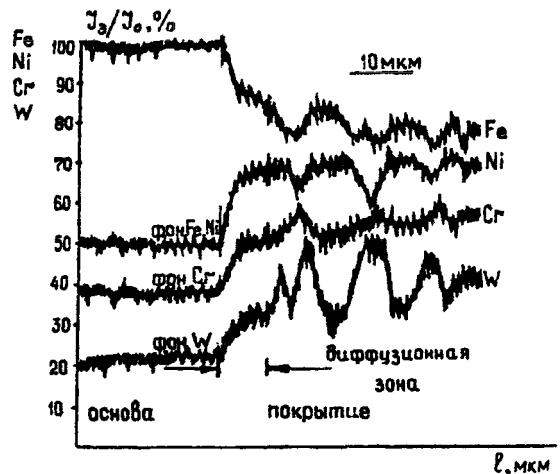


Рисунок 5- Концентрационные кривые распределения Fe, Ni, Cr, W по зоне оплавления покрытия из ПГ-СРЗ+30 об. % WC с основой (сталь 20) Лазерное оплавление

Этот слой имеет более равновесную по сравнению с ними структуру и содержит более крупные структурные составляющие (например, размер карбидо-боридной фазы).

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Повышение адгезионной связи оплавленных лазерным излучением газотермических покрытий / Л. И. Гречихин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1990. – №3. – С. 76–82. 2. Отрадинский, Ю.А. Исследование микроструктуры самофлюсующихся твердых сплавов системы Ni-Cr-B-Si / Ю. А. Отрадинский, В. С. Матвеева, Г. В. Козлова // Ремонт деталей износостойкой наплавкой и сваркой: тез. докл. междунар. научно-техн. конф., Москва, 13—17 апр. 1987 г.— М., 1987.— С. 22—27. 3. Рыкалин, Н.Н. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. - М.: Машиностроение. – 1975. – 296 с.

УДК 621.793

*Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.*

## РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ, ОПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Самофлюсующийся сплав на основе никеля представляет собой многокомпонентную систему Ni-Cr-B-Si-C со сложной структурой, чувствительной к условиям нагрева [1]. Значительное влияние на конечную структуру покрытия из самофлюсующегося сплава оказывает способ оплавления (объемный или локальный). Различие в характере структуры покрытий оплавленных газовой горелкой и излучением лазера объясняется различными температурно-временными параметрами процессов.

Основными факторами, влияющими на формирование структуры обработанного лазерным излучением слоя, являются высокая скорость нагрева поверхностного слоя (порядка  $10^4 - 10^6$  К/сек), обусловленная большой плотностью энергии и охлаждения, достигаемого за счет теплоотвода в массу металла. Высокие скорости нагрева приводят к сдвигу точек фазовых превращений, имеющих диффузионную природу. Большая скорость охлаждения расплавленной зоны приводит к неполному протеканию диффузионных процессов, образованию большого числа зародышей и формированию мелкодисперсной и неравновесной структуры. В процессе лазерной обработки с проплавлением материала основы картина осложняется за счет интенсивного перемешивания ванны расплава [2].

Легирование сплава может осуществляться как на стадии напыления покрытия в виде механических смесей, так и на стадии оплавления в виде предварительного нанесения на напыленное покрытие обмазок на основе аморфного бора и окиси хрома. Введение легирующих добавок (карбидов хрома, бора и вольфрама) в состав самофлюсующихся покрытий еще более затрудняет проведение структурных исследований.

В данной статье представлены результаты рентгеноструктурного анализа покрытий, оплавленных лазерным излучением, в зависимости от вида легирующих добавок.

**Методика исследования.** Изготовлены образцы с покрытием из самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ с различными композиционными добавками, введенными на стадии плазменного напыления в виде механических смесей (таблица 2).

Количественные оценки изменения структуры проводились с помощью рентгеноструктурного анализа. Рентгеноструктурные исследования осуществлялись с использованием