

УДК 669.056.9:629.118.6

ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ «X20AG20 - TiCN»

Гальченко Н.К., Дамшлов Б.В., Блюк С.И.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, 634021, Россия

Современные тенденции в материаловедении конструкционных материалов связаны с созданием упрочняющих и защитных покрытий на основе новых композиционных материалов, способных многократно повышать эксплуатационные характеристики и ресурс работы изделий и конструкций, и использованием перспективных технологий их нанесения, таких как технология электронно-лучевой наплавки в вакууме (ЭЛН).

Актуальной задачей является разработка новых композиционных покрытий с высоким уровнем механических и триботехнических свойств на деталях, эксплуатируемых в условиях интенсивного износа, к числу которых относятся рабочие части землеройной техники, прокатное оборудование в металлургии и многие другие детали.

К факторам, наиболее влияющим на качество и свойства наплавляемых электронно-лучевым методом покрытий, можно отнести химический состав материала, влияющий на температурный интервал кристаллизации и структурно-фазовые превращения при нагреве и охлаждении, а также механические свойства материала, определяющие способность выдерживать рабочие механические нагрузки.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния режимов электронно-лучевой наплавки на химический состав композиционных покрытий в системе X20AG20 - TiCN и содержания упрочняющей фазы на их механические и триботехнические свойства.

Материалы и методы исследований. В качестве наплавочного материала использовали композиционные порошки на основе металлической связки Fe-Cr-Mn-N, рассчитанной на состав X20AG20 (Cr-20%мас., Mn-20%мас., N-0.75%, Fe-ост.) с карбонитридами титана. Введение азота в шихту осуществляли присадками азотсодержащих ферросплавов (ФХ600А). Содержание азота рассчитывали с учетом предельной его растворимости (N=0,75% вес.) при содержании в шихте Mn=20%вес. и Cr=20% вес. Карбонитрид титана эквимольного состава $TiC_{0.5}N_{0.5}$ получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в открытом реакторе. Покрытия наносили методом электронно-лучевой наплавки в вакууме на стальные подложки (Ст.3) в 6 проходов. Толщина ЭЛН-покрытий составляла ~2 мм.

Испытания на одноосное растяжение проводили на машине ИМАШ-2078 с автоматической записью кривых растяжения. Размер сечения рабочей части образца - 4×2 мм, толщина покрытия - 0,5 мм. Твердость наплавленных покрытий определяли на приборе TP5006 по шкале С в соответствии с ГОСТ 20017-74 (твердость по Роквеллу). Для аттестации наплавленных покрытий была исследована абразивная износостойкость при воздействии на покрытие нежесткозакрепленными абразивными частицами (ГОСТ 23.208-79). В качестве абразивного материала использовали кварцевый песок зернистостью 160-350 мкм. Абразивную износостойкость материала определяли по соотношению потери массы эталона (сталь 45) к потере массы образца с покрытиями с учетом плотности материалов. Триботехнические свойства образцов с покрытиями исследовали в паре трения (контртело - ШХ15) в условиях граничной смазки (индустриальное масло И-72) по схеме «вал – две плоские колодки». Испытания проводили на машине трения 2070 СМТ – 1 на образцах размером 20×10×5 мм с покрытиями толщиной ~2 мм

(скорость скольжения 0,5 м/с, удельная нагрузка 588 Н). Структуру и состав покрытий исследовали методами металлографического, рентгенофазового, электронно-микроскопического анализа.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Результаты исследования показали, что в процессе ЭЛН из образующей ванны расплава, представляющей собой многокомпонентную систему, происходит избирательное испарение легирующих элементов, приводящее к изменению химического состава покрытия. Эксперимент показал, что качественные покрытия формируются при токе луча не ниже $I=15 \cdot 10^3$ Вт/см². Увеличение плотности мощности луча с $15 \cdot 10^3$ Вт/см² до $21 \cdot 10^3$ Вт/см² приводит к повышению температуры в локальной зоне взаимодействия луча с расплавом, к более интенсивному его перемешиванию с материалом подложки и к снижению концентрации хрома и марганца в покрытиях (табл. 1). Таким образом, оптимальным режимом наплавки покрытий матричного состава, при котором происходит минимальное снижение легирующих элементов в покрытии относительно исходного состава, является наплавка при $I=15 \cdot 10^3$ Вт/см².

Исследование изменения химического состава по глубине покрытий в зависимости от величины тока луча методом микрорентгеноспектрального анализа показало плавное изменение химического состава в сторону повышения содержания хрома и марганца от границы раздела с подложкой к их поверхности (рис.1). Полученные результаты МРСА хорошо согласуются с данными химического анализа стружки покрытий после наплавки.

Наплавка композиционных покрытий, содержащих карбонитриды титана, требует более высоких значений плотности мощности электронного луча. Данное обстоятельство обусловлено тем, что частицы карбонитридов титана, являясь тугоплавкими соединениями ($T_{пл} \sim 3100^\circ\text{C}$), попадая в жидкую ванну расплава, повышают его вязкость, ускоряют процесс кристаллизации и повышают в целом теплоемкость всей системы, что требует дополнительного увеличения мощности луча. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что в процессе наплавки в составе связи покрытия X20Ag20-TiCN происходит некоторое уменьшение содержания хрома и марганца относительно расчетного (табл.2). Изменение матричного состава композиционного покрытия может быть связано с разбавлением наплавочного материала материалом подложки (железом), с избирательным испарением в процессе наплавки легирующих элементов связи, а также с их частичным взаимодействием с первичными карбонитридами титана.

Наличие карбонитридов титана $TiC_{0,5}N_{0,5}$ в азотсодержащей хромомарганцевой матрице X20Ag20 определяет механические и триботехнические свойства композиционных покрытий. Металлографический анализ наплавленных покрытий показывает, что при введении карбонитридов титана в связку X20Ag20 формируются неоднородные структуры фрагменты которых состоят из множества частиц (темные участки) твердой фазы различной формы (рис.2б, в). Согласно МРСА и РФА, после наплавки в структуре покрытий кроме исходных карбонитридов титана $TiC_{0,5}N_{0,5}$, присутствует незначительное количество частиц твердой фазы, представляющих собой соединения $TiC_{0,35}N_{0,55}$ и сложные фазы $(Fe-Ti-Cr-Mn)C_xN_y$ (табл.3), образовавшиеся в результате частичного распада нестехиометрических карбонитридов и взаимодействия их с компонентами наплавочного материала.

Измерение твердости поверхности покрытий после электронно-лучевой наплавки показало, что с ростом содержания упрочняющей фазы в композите X20Ag20 увеличивается их твердость (рис.3). Следует отметить, что при наплавке композиционных порошков, содержащих свыше 40% $TiC_{0,5}N_{0,5}$, формируются некачественные покрытия (раковины, поры, непроплавленные участки) с пониженными механическими характеристиками.

Таблица 1. Влияние плотности мощности луча на химический состав покрытий матричного состава Х20АГ20.

Плотность мощности луча, Вт/см ²	Cr, % вес.	Mn, % вес.	N, % вес.	Fe, % вес.
15×10^3	$12.15 \pm 0,1$	$10.26 \pm 0,1$	$0.23 \pm 0,01$	Fe _{ост}
18×10^3	$8.50 \pm 0,1$	$4,20 \pm 0,1$	$0,11 \pm 0,01$	Fe _{ост}
21×10^3	$6,20 \pm 0,1$	$3.50 \pm 0,1$	$0,07 \pm 0,01$	Fe _{ост}
Исходный состав порошка	20,00	20,00	$0,50 \pm 0,01$	Fe _{ост}

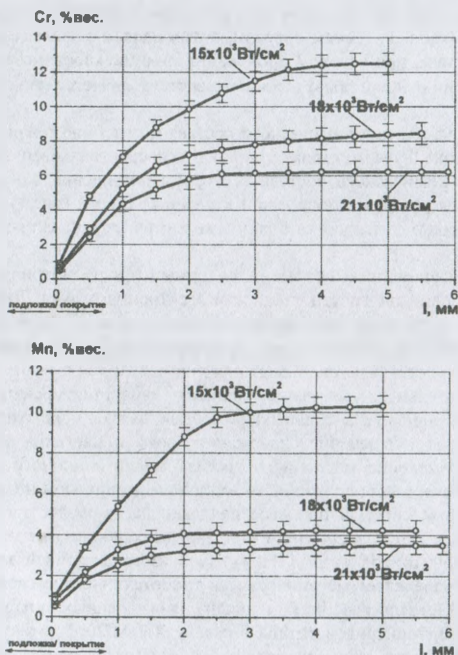


Рис. 1. Распределение хрома и марганца от границы раздела с подложкой к поверхности покрытий Х20АГ20, наплавленных при разных значениях плотности мощности луча.

Таблица 2. Химический состав материала связки в покрытиях.

Расчетный состав покрытия	Содержание элементов в покрытии, % вес.		
	Cr	Mn	Fe
Х20АГ20+20%вес. TiCN	7.65 ± 9.48	2.76 ± 3.41	ост.
Х20АГ20+40%вес. TiCN	7.88 ± 8.03	1.77 ± 2.44	ост.

Таблица 3. Содержание металлов в сложных соединениях $(\text{Fe-Ti-Cr-Mn})\text{C}_x\text{N}_y$, присутствующих в покрытиях.

соединение	Ti, % вес.	Fe, % вес.	Cr, % вес.	Mn, % вес.
1	97,44	0,856	0,142	0,02
2	94,867	2,213	1,013	0,03
3	94,032	2,510	2,071	0,09
4	88,397	7,478	2,888	0,201
5	87,882	9,193	1,195	0,305
6	79,362	17,634	1,810	0,476
7	60,321	34,537	3,268	0,957
8	59,695	32,095	4,648	2,960

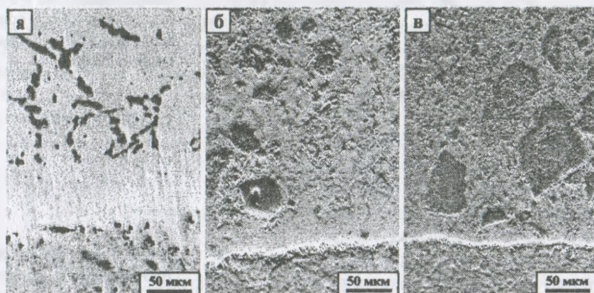


Рис.2. Микроструктура покрытий вблизи границы раздела с подложкой: а – X20Al20, б – X20Al20+ 20%TiC_{0,5}N_{0,5}, в – X20Al20+ 40%TiC_{0,5}N_{0,5}.

Испытания на абразивную износостойкость показали, что введение упрочняющей фазы значительно влияет на механизм изнашивания покрытий, существенно повышая их твердость и абразивную износостойкость (рис.3). Исследования изношенных поверхностей методом РЭМ показали, что абразивные частицы воздействуют, в основном, на матрицу, и в процессе износа доля поверхности, занятой твердой фазой, увеличивается, и формируется стационарный рельеф из выступающих карбонитридных частиц, затрудняющих контакт абразивных частиц с матричным материалом, повышая износостойкость покрытия в целом. Максимальную износостойкость имеют покрытия, содержащие 40%вес. TiC_{0,5}N_{0,5}.

Улучшение триботехнических характеристик также связано с повышением содержания карбонитридной фазы в связке X20Al20. Так, повышение доли TiC_{0,5}N_{0,5} до 40%вес. приводит к существенному снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытий (рис.3). Видимо, присутствие частиц карбонитрида титана в покрытиях снижает адгезионное и деформационное взаимодействия на пятнах фактического контакта.

Испытания на растяжение показали, что с увеличением объемной доли упрочняющей фазы материал покрытия эффективнее сопротивляется пластической деформации, о чем свидетельствует рост $\sigma_{0,2}$ и θ , определяемого по tg угла наклона кривой растяжения к оси деформации на участке, соответствующем 0,2 – 0,5 % остаточной деформации. Вместе с тем, увеличение содержания карбонитридной фазы от 20 до

40%вес. несколько снижает σ_B от 190 до 183 МПа (вследствие снижения пластичности композита при увеличении в нем концентрации карбонитридной фазы) (рис.4).

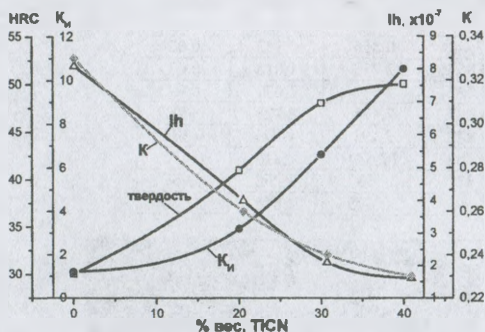


Рис.3. Зависимость твердости (HRC), коэффициента относительной абразивной износостойкости ($K_{и}$), интенсивности изнашивания (I_h) и коэффициента трения (K) от содержания карбонитридов титана в покрытии X20AG20.

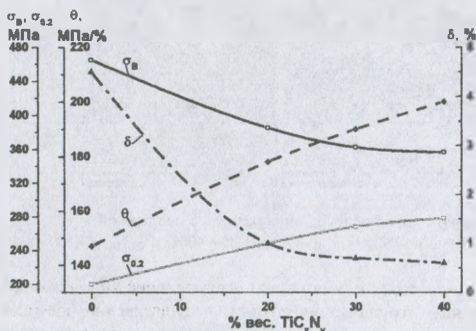


Рис.4. Зависимость предела прочности (σ_B), предела текучести ($\sigma_{0,2}$), пластичности (δ) и коэффициента деформационного упрочнения (θ) от содержания карбонитридов титана в покрытии X20AG20.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Плотность мощности электронного луча в процессе электронно-лучевой наплавки в вакууме оказывает значительное влияние на химический состав материала матрицы X20AG20. С увеличением плотности мощности луча возрастают потери компонентов смеси относительно исходного содержания в связи с испарением из ванны расплава легирующих элементов с высокой упругостью пара.
2. С ростом содержания карбонитридов титана от 0 до 40%вес. в композиционных покрытиях повышается их твердость (от 30 до 50 HRC) и абразивная износостойкость, $K_{и}$ (от 1,2 до 10,5).
3. При растяжении образцов с покрытиями с увеличением содержания карбонитридов титана (от 0 до 40% вес.) происходит увеличение предела текучести, $\sigma_{0,2}$ (с 210 до 280 МПа) и коэффициента деформационного упрочнения, θ (с 145 до 200 МПа/%). Предел прочности (σ_B) снижается с 470 до 370 МПа, пластичность (δ) - с 4,5 до 0,5 %.
4. По результатам триботехнических испытаний покрытий по схеме «вал - две плоские колодки» в условиях граничной смазки установлено, что с увеличением содержания карбонитридов титана (до 40% вес.) снижаются коэффициенты трения и интенсивности изнашивания покрытий.