

УДК 621.791.92

DOI: 10.17223/00213411/63/11/23

*Т.А. КРЫЛОВА, Ю.А. ЧУМАКОВ*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКОЙ ВНЕ ВАКУУМА \***

Изучено влияние термической обработки на структуру и свойства композиционных покрытий на основе карбида хрома с карбидом титана, полученных методом электронно-лучевой наплавки вне вакуума. Показано, что отпуск приводит к снижению микротвердости и износостойкости. Это связано с распадом аустенитной структуры с образованием мягкой феррито-карбидной структуры. Закалка отпущенных покрытий приводит к повышению значений микротвердости, сопоставимых со значениями микротвердости в исходном состоянии после электронно-лучевой наплавки, за счет образования высокопрочного мартенсита. Износостойкость композиционных покрытий после закалки ниже, чем после наплавки из-за хрупкого мартенсита, который не способен удерживать твердые частицы карбидов. Полученные композиционные покрытия при оптимальных режимах обработки обладают сочетанием повышенных свойств и не требуют дополнительной термической обработки, в результате которой происходят структурные изменения, сопровождающиеся снижением механических свойств.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая наплавка, термическая обработка, композиционные покрытия, микротвердость, износостойкость.

### **Введение**

Одним из методов упрочнения, активно развивающимся в настоящее время, является получение композиционных покрытий на рабочих поверхностях деталей и конструкций. Электронно-лучевая наплавка вне вакуума [1–3] является эффективным способом получения качественных композиционных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами. Формирование композиционного покрытия происходит через расплав, что обеспечивает хорошую адгезию покрытия с материалом упрочняемой детали или конструкции, из которого образуются новые фазы, перекристаллизация фаз, дисперсное упрочнение. Помимо быстрого нагрева поверхности материала, электронно-лучевая наплавка характеризуется высокой скоростью охлаждения с отводом тепла в глубь основного материала, что способствует его самозакалке [4]. Механическая обработка деталей с покрытием после наплавки затруднена из-за повышенной твердости в результате самозакалки. Поэтому на практике часто применяют термическую обработку. Процессы термообработки влияют на механические свойства покрытий, изменяя их микроструктуру [5]. Так, в работах [6–9] было показано влияние термической обработки на изменение стабильности микроструктуры и ослабление остаточных напряжений в композитных покрытиях в результате получения желаемых характеристик.

В настоящее время, насколько известно авторам, влияние термической обработки на микроструктуру, микротвердость и износостойкость композиционных покрытий на основе карбида хрома с карбидом титана в литературе отсутствует. В связи с этим цель работы – исследование структуры и свойств композиционных покрытий на основе карбида хрома с карбидом титана после термической обработки. В качестве термической обработки проведен отпуск с последующей закалкой отпущенных образцов.

### **Методика эксперимента**

Композиционные покрытия толщиной ( $L$ ) 2–6 мм были получены методом электронно-лучевой наплавки вне вакуума на стальной подложке (97 % Fe, 0.03 % C, 0.28 % Si, 0.50 % Mn, 0.3 % Ni, 0.3 % Cr, 0.008 % N, 0.035 % P, 0.04 % S) размером 100×50×14 мм. В качестве наплавочного материала использовали порошковую смесь карбида хрома с карбидом титана и фтористого магния в соотношении 54, 6, 40 % соответственно. Фтористый магний выступал в роли флюса.

\* Работа выполнена в рамках госзадания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.12.

При электронно-лучевой наплавке постоянными параметрами были энергия электронов 1.4 МэВ ( $U$ ), ток пучка 25 мА ( $I$ ), диаметр пучка 12 мм ( $d$ ), расстояние от выпускного отверстия до поверхности 90 мм, ширина развертки сканирования пучка 50 мм ( $l$ ). Скорость поступательного перемещения образцов под пучком ( $V$ ) менялась в интервале 0.5–0.8 см/с. При таких параметрах тепловложение  $W$  имеет значения в интервале от 5.6 до 12.73 кДж/см<sup>2</sup>.

Термическую обработку проводили в универсальной лабораторной печи СШОЛ. Были использованы следующие режимы обработки: отпуск 650 °С в течение 1 ч, закалка в воду 850 °С со временем выдержки 0.5 ч.

Структура композиционных покрытий до и после термической обработки исследовалась методами оптической микроскопии (Neophot-32). Образцы для структурных исследований готовились по стандартной методике приготовления шлифов, используя ряд абразивных бумаг. Отполированные образцы на бархатной ткани были протравлены в 4 %-м спиртовом растворе HNO<sub>3</sub>. Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре типа ДРОН-7 («Буревестник», Россия). Микротвердость композиционных покрытий измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0.98 Н и времени выдержки 15 с. Среднее значение микротвердости принимали как среднее арифметическое из 10 измерений на каждой глубине. Испытания на абразивную износостойкость до и после термической обработки композиционных покрытий проводили согласно ГОСТ 23.208-79. В качестве абразивных частиц использовали кварцевый песок.

### Результаты и их обсуждение

Результаты измерения микротвердости композиционных покрытий в исходном состоянии после электронно-лучевой наплавки и термической обработки приведены на рис. 1. Анализ полученных результатов показывает, что отпуск при 650 °С и времени выдержки 1 ч приводит к снижению микротвердости (рис. 1, б) композиционных покрытий по сравнению со значениями в исходном состоянии после электронно-лучевой наплавки (рис. 1, а). Отпуск длительностью не менее 1 ч при 560–650 °С применяется для обеспечения среднего уровня механических свойств.

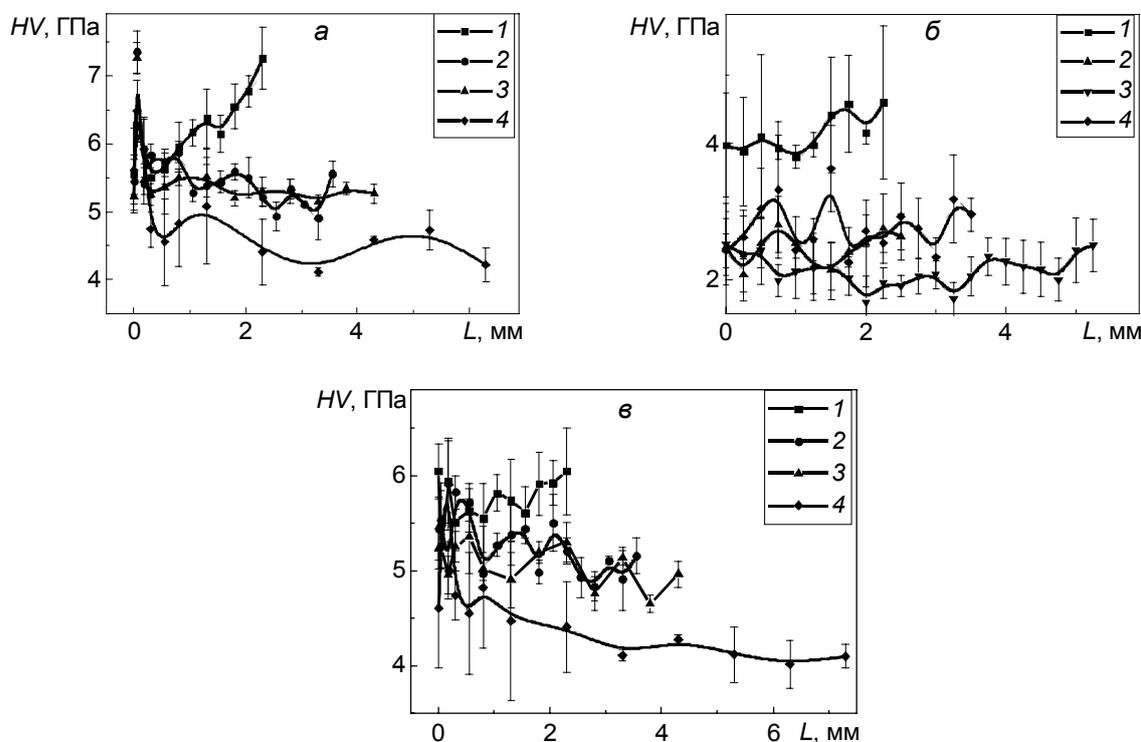


Рис. 1. Распределение микротвердости по поперечному сечению композиционных покрытий 1, 2, 3, 4 (таблица): а – электронно-лучевой наплавки; б – отпуска, в – заковки

Понижение значений микротвердости связано со структурно-фазовыми изменениями при отпуске. Все композиционные покрытия, полученные при разных режимах электронно-лучевой об-

работки имеют аустенитную структуру (рис. 2, *а*). Аустенитные дендриты окружены эвтектикой, состоящей из аустенита и карбидов хрома. В результате быстрого отвода тепла в глубь подложки при охлаждении расплава образуется область мартенсита исключительно вдоль границы покрытие – подложка шириной 100–150 мкм (рис. 2, *б*). На рис. 1, *а* образование мартенсита соответствует повышению микротвердости композиционных покрытий при всех режимах электронно-

#### Режимы обработки и характеристики композиционных покрытий

№ покрытия	Параметры обработки		$L$ , мм	$V_{эв}$ , %	Среднее значение микротвёрдости $H_c$ , ГПа		
	$v$ , см/с	$W$ , кДж/см <sup>2</sup>			Наплавка	Отпуск	Закалка
1	0.8	8.8	2	48	6.23	4.14	5.74
2	0.7	10	1.5	17	5.52	2.46	5.05
3	0.6	11.7	3.7	3.7	5.49	2.34	4.97
4	0.55	12.7	6	9	4.80	2.28	4.26

лучевой обработки. По всей толщине композиционного покрытия встречаются частички карбида титана (черные включения), что также влияет на повышение микротвердости. Здесь же наблюдается снижение микротвердости в композиционных покрытиях при переходе режимов обработки от 1 до 4, что связано с повышением величины  $W$ , приводящей к увеличению толщины  $L$  композиционного покрытия, а следовательно, к уменьшению концентрации легирующих элементов на единицу объема слоя покрытия. С ростом  $W$  уменьшается и объемная доля эвтектики в композиционных покрытиях (таблица). Рентгеноструктурный анализ идентифицирует наличие только одной фазы  $\gamma$ -Fe. Метод EBSD-анализа обнаруживает  $\gamma$ -Fe и в малых количествах  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$  и  $(Cr, Fe)C$ . Карбид титана располагается в виде обособленных частиц, поэтому рентгеноструктурный анализ их не обнаруживает. В работе [10] приведено подробное описание структуры.

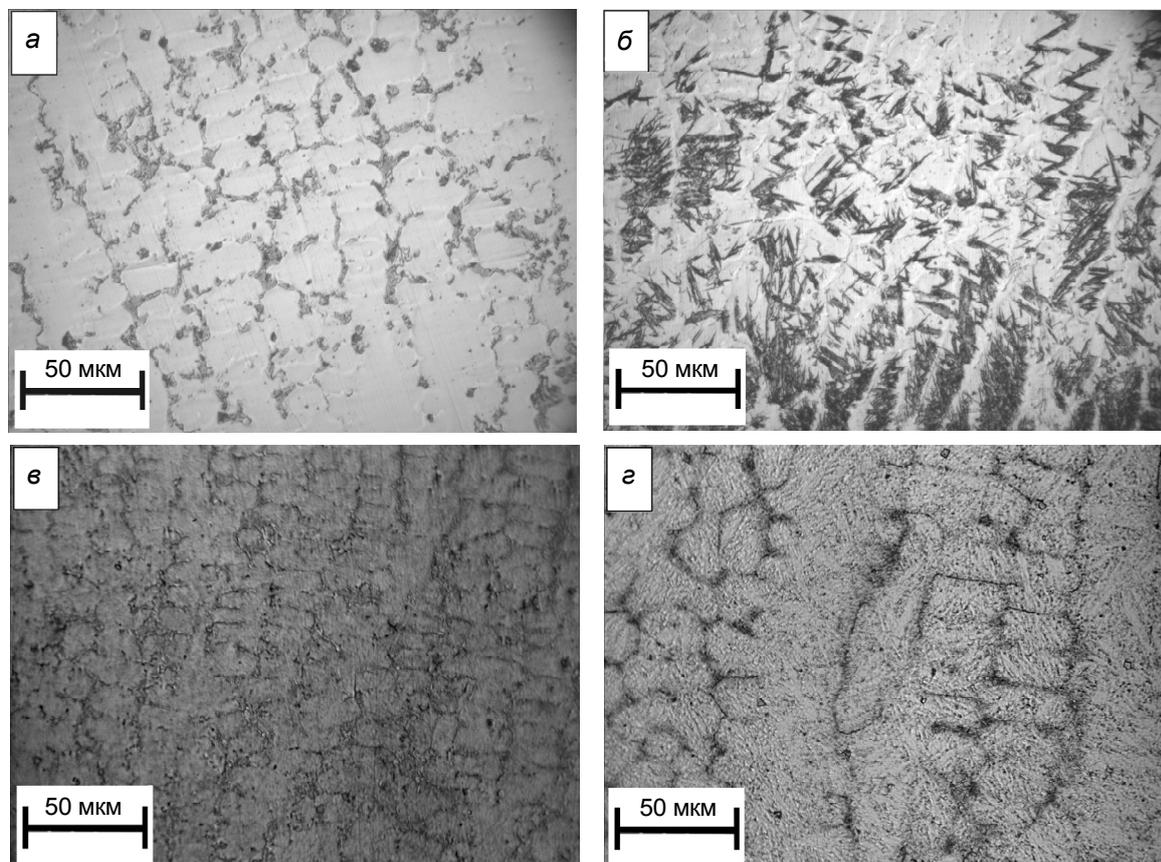


Рис. 2. Микроструктура композиционного покрытия после: *а*, *б* – электронно-лучевой наплавки, *в* – отпуска, *г* – закалки (увеличение  $\times 500$ )

Металлографические исследования структуры после отпуска показали, что в композиционных покрытиях наследуется морфология исходной структуры после наплавки независимо от режима электронно-лучевой обработки (рис. 2, в). Отпуск при 650 °С исследуемых композиционных покрытий приводит к изменению структуры наплавленных покрытий. В структуре происходит распад аустенита на феррито-карбидную смесь. Дендриты представляют собой однородную мелкозернистую структуру перлита. Рентгеноструктурный анализ показал, что после отпуска в структуре фиксируются линии  $\alpha$ -Fe и небольшие пики  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ . По-видимому, находящийся в зернах твердого раствора и в основе эвтектики углерод выделяется в виде различных карбидов.

Образовавшаяся после отпуска в композиционных покрытиях ферритная структура приводит к снижению микротвердости. При таких значениях твердости детали с композиционными покрытиями будут легко подвергаться механической обработке. Однако, такие низкие значения микротвердости отрицательно сказываются на износостойкости композиционных покрытий. Поэтому образцы с композиционными покрытиями после отпуска были подвергнуты закалке для повышения твердости с целью улучшения их износостойкости.

Анализ микроструктуры композиционных покрытий показывает, что после быстрой закалки в воду отпущенных образцов сохраняется морфология исходной структуры наплавленных покрытий. В теле дендритов образуются иглы мартенсита (рис. 2, з). По границам дендритов наблюдаются скопления упрочняющих фаз. По всей толщине композиционных покрытий также наблюдаются частички карбида титана. Мартенсит после закалки в воду (рис. 2, з) отличается от мартенсита после электронно-лучевой наплавки при самозакалке (рис. 2, в). После наплавки при медленном остывании расплава в мартенситных иглах выделяются зерна карбидов, поэтому они имеют черный цвет. Рентгеноструктурный анализ обнаруживает после закалки  $\alpha$ -Fe, небольшие пики  $\gamma$ -Fe, карбиды  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

На рис. 1, в приведены результаты измерений микротвердости по поперечному сечению композиционных покрытий после закалки. Из рисунка видно, что закалка приводит к равномерному распределению микротвердости в композиционных покрытиях до значений, сопоставимых со значениями микротвердости в исходном наплавленном состоянии. Повышение микротвердости композиционных покрытий после закалки также связано со структурными изменениями. Образующийся после закалки мартенсит в структуре и карбиды приводят к повышению микротвердости.

Изменения структуры и микротвердости после отпуска и закалки отпущенных образцов в композиционных покрытиях существенно влияют на значения износостойкости и механизм износа. На рис. 3 приведены результаты измерений износостойкости композиционных покрытий до и после термической обработки, из которых следует, что отпуск приводит к снижению износостойкости композиционных покрытий по сравнению с исходной наплавкой в результате образования мягкой ферритной структуры. В процессе износа идет как истирание основной структурной составляющей – феррита, так и выкрашивание твердых частиц карбидов из мягкой матрицы.

Значения износостойкости отпущенных композиционных покрытий после закалки выше, чем после отпуска, но ниже, чем после электронно-лучевой наплавки (рис. 3). Образование высокопрочного мартенсита повышает микротвердость покрытий. Высокая твердость мартенсита приводит к его повышенной хрупкости, что отрицательно сказывается на износостойкости. Частицы карбидов легко выкрашиваются из хрупкой матрицы при износе.

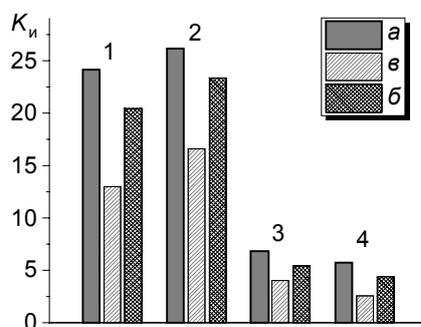


Рис. 3. Средние значения износостойкости ( $K_n$ ) композиционных покрытий после: а – наплавки, б – отпуска, в – закалки, в зависимости от режима электронно-лучевой обработки 1–4

В данной работе термическая обработка не повлияла на состояние частиц карбида титана. На рис. 2 частицы карбида титана наблюдаются в виде черных включений, расположенных в теле дендритов и эвтектике. Это связано с высокой температурой плавления TiC ( $t_{пл} = (3147 \pm 50)^\circ\text{C}$ ) [11].

### Заключение

1. Отпуск композиционных покрытий при температуре  $650^\circ\text{C}$  и времени выдержки 1 ч приводит к снижению микротвердости. Это объясняется распадом аустенита на феррито-карбидную смесь, что способствует увеличению пластичности, но уменьшает твердость и износостойкость.

2. Для повышения микротвердости отпущенных композиционных покрытий после механической обработки целесообразно проведение закалки в воду при температуре  $850^\circ\text{C}$ , времени выдержки 0.5 ч. Микротвердость таких покрытий повышается вследствие образования высокотвердого мартенсита до значений, сопоставимых со значениями после электронно-лучевой наплавки. Однако износостойкость отпущенных композиционных покрытий после закалки уступает износостойкости покрытий в исходном состоянии после наплавки.

3. Предложенные режимы термической обработки могут быть использованы в технологии производства деталей, где необходимо проведение механической обработки.

4. Таким образом, показано, что метод электронно-лучевой наплавки вне вакуума высокотехнологичен. Полученные композиционные покрытия 1 и 2 при режимах такой обработки обладают оптимальным сочетанием свойств и не требуют дополнительной термической обработки, в результате которой происходят структурные изменения, сопровождающиеся снижением механических свойств.

Авторы выражают благодарность М.Г. Голковскому (ИЯФ СО РАН) за помощь в проведении электронно-лучевой наплавки. Структурные исследования методом растровой электронной микроскопии проведены в Центре коллективного пользования «Нанотех» в ИФПМ СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fadeev S.N., Golkovski M.G., Korchagin A.I., et al. // Radiat. Phys. Chem. – 2000. – V. 57. P. 653–655.
2. Голковский М. Г. Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. Технологические возможности метода. – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. – 317 с.
3. Bataev I.A., Mul D.O., Bataev A.A., et al. // Mater. Characterization. – 2016 – V. 112. – P. 60–67.
4. Нарва В.К., Маранц А.В., Сентюрина Ж.А. // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. – № 4. – С. 25–31.
5. Detor A.J. and Schuh C.A. // J. Mater. Res. – 2007. – V. 22. – No. 11. – P. 3233–3248.
6. Chen J.Y., Conlon K., Xue L., et al. // Mater. Sci. Eng. A. – 2010. – V. 527. – P. 7265–7273.
7. Liu H., Wang K., Zhang X., et al. // Surf. Coat. Technol. – 2013. – V. 228. – P. S296–S300.
8. Chen J.Y., Wang S.H., and Xue L.J. // J. Mater. Sci. – 2012. – V. 47. – P. 779–792.
9. Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Оленин М.И. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 10. – С. 22–29.
10. Krylova T.A., Ivanov K.V., and Ovcharenko V.E. // Inorgan. Mater.: Appl. Res. – 2019. – V. 10. – P. 595–599.
11. Косолапова Т. Я. Карбиды. – М.: Металлургия, 1968.

Поступила в редакцию 12.02.2020.

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

**Крылова** Татьяна Александровна, к.т.н., науч. сотр. ИФПМ СО РАН, e-mail: kta@ispms.tsc.ru;

**Чумаков** Юрий Александрович, к.ф.-м.н., науч. сотр. ИФПМ СО РАН, e-mail: chya@ispms.tsc.ru.