

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО–ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

А.С. Чапайкин<sup>1)</sup>, В.Е. Громов<sup>1)</sup>, Т.А. Михайличенко<sup>1)</sup>, Р.В. Кузнецов<sup>2)</sup>, А.Е. Корочкин<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Сибирский государственный индустриальный университет,  
пр. Кирова 42, Новокузнецк 654007, Россия,  
tchapajkin.s@yandex.ru, vegromov47@mail.ru, archimih@mail.ru

<sup>2)</sup>Кузнецкий машиностроительный завод-Металлургия,  
ул. Куйбышева 17/4, Новокузнецк 654027, Россия, kmz@kuzmash.com

<sup>3)</sup>Кузнецкий машиностроительный завод-Горные технологии,  
ул. Куйбышева 17/6, Новокузнецк 654027, Россия, korochk@rambler.ru

На подложке из стали 30ХГСА методом плазменной наплавки порошковой проволокой ПП 18Ю в среде азота формировался наплавленный слой толщиной до 10мм. Методами современного физического материаловедения изучали структуру, дефектную субструктуру, фазовый состав, трибологические и механические свойства наплавки после высокотемпературного отпуска при 580 °С и последующей электронно-пучковой обработки. После отпуска структура наплавленного слоя состоит из зерна размером 7.0 – 22.5 мкм с прослойками карбидной фазы составов  $V_4C_3$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Fe_3C$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $WC_{1-x}$ . Электронно-пучковая обработка формирует в наплавленном слое тонкий поверхностный слой (30 – 50 мкм) с ячеистой субструктурой субмикронного (100 – 250 нм) размера, характерной для высокоскоростной кристаллизации.

**Ключевые слова:** быстрорежущая сталь; структура; фазовый состав; электронно-пучковая обработка.

## INFLUENCE OF ELECTRON BEAM PROCESSING ON THE STRUCTURE OF SURFACE LAYERS OF PLASMA SURFACED HIGH-SPEED STEEL

Alexandyr Chapajkin<sup>1)</sup>, Victor Gromov<sup>1)</sup>, Tatiana Mikhailichenko<sup>1)</sup>,  
Roman Kuznetsov<sup>2)</sup>, Alexander Korochkin<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Siberian State Industrial University,  
42 Kirova Str., 654007 Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia,  
tchapajkin.s@yandex.ru, vegromov47@mail.ru, archimih@mail.ru

<sup>2)</sup>Kuznetsk Machine-Building Plant-Metallurgy, 17/4 Kuibysheva Str., 654027 Novokuznetsk,  
Kemerovo Region – Kuzbass, Russia, kmz@kuzmash.com,

<sup>3)</sup>Kuznetsk Machine-Building Plant-Metallurgy, 17/6 Kuibysheva Str, 654027 Novokuznetsk,  
Kemerovo Region – Kuzbass, Russia, korochk@rambler.ru

In this work, the authors used the methods of modern physical materials science to investigate the structure, defective substructure, phase composition, tribological and mechanical properties of the surfacing subjected to high-temperature tempering at 580 °C and subsequent electron beam processing. The deposited layers up to 10 mm thick are formed by plasma surfacing with PP-18YU powder wire in a nitrogen medium. According to the phase composition, the deposited layers consist of  $\alpha$ -Fe and carbides of  $Me_6C$  composition. After tempering, the polycrystalline structure of the deposited layer contains grains of 7.0 – 22.5  $\mu m$  in size with layers of the second phase along the boundaries and at the joints of grains with composition  $V_4C_3$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Fe_3C$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $WC_{1-x}$ . Electron beam processing forms a thin surface layer (30 – 50  $\mu m$ ) with grains of cellular (columnar) structure of high-speed crystallization of submicron (100 – 250 nm) size. Particles of the second phase of the nanoscale range of globular and faceted shapes were detected in the volume of grains and along the boundaries.

**Keywords:** high-speed steel; structure; phase composition; electron beam processing; properties.

### Введение

Для защиты от изнашивания тяжело-

нагруженных поверхностей деталей машин, используемых в металлургической,

машиностроительной и горной промышленности, широко применяют плазменную наплавку износостойкими материалами на подложку из конструкционных сталей [1-3]. Наплавка характеризуется широкой номенклатурой наплавочных материалов, в том числе быстрорежущих сталей высокой твердости (P18, P6M5, P2M9 и др.) и позволяет легировать наплавляемый материал различными элементами в процессе наплавки, например, азотом. В настоящее время активно разрабатываются новые технологии применения азота для модификации свойств литых металлических сплавов и покрытий, в результате которых повышаются их износостойкость, ударостойкость, а также коррозионная стойкость [4]. Использование высокотемпературного отпуска значительно повышает эксплуатационные свойства наплавленных материалов.

В последние годы развиваются новые методы и технологии термической обработки металлических изделий с использованием концентрированных потоков энергии, в результате чего изменяется структурно-фазовое состояние и свойства. Большими возможностями при обработке сталей обладает импульсно-периодическая электронно-пучковая обработка, что приводит к преобразованию зеренно-субзеренной и дефектной структуры [5].

#### Методика проведения исследований

Исследовали образцы из стали 30ХГСА с наплавленным слоем сплава P18Ю. Наплавленный слой получали плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой ПП-P18Ю диаметром 3.7 мм на сталь 30ХГСА. Химический состав сплава P18Ю, % мас.: 0.87 C; 4.41 Cr; 17.00 W; 0.10 Mo; 1.50 V; 0.35 Ti; 1.15 Al; 0.06 N (остальное Fe). Исследования образцов проводили в состоянии после наплавки, четырехкратного высокотемпературного отпуска при температуре 580 °C (время выдержки 1 ч и последующего облучения импульсным электронным пучком). Облучение осуществляли при плот-

ности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup> и длительности импульса 50 мкс, число импульсов облучения 5, частота следования импульсов 0.3 с<sup>-1</sup>. Структуру исследовали с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51, а также сканирующего электронного микроскопа KYKY-EM6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом, оснащенного микрозондовой приставкой. Дефектную субструктуру и фазовый состав наплавленного слоя изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM 2100, JEOL).

#### Результаты и их обсуждение

Сканирующее электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного слоя показало ярко выраженную карбидную неоднородность. Первичные карбиды типа Me<sub>6</sub>C скелетообразной формы образуют сетку, с аустенитной оболочкой по внешним границам (рис. 1). Мелкие ячейки с характерными размерами 5-10 мкм имеют однородную аустенитную структуру, а в более крупных формируется внутренняя темная область с аустенитно-мартенситной структурой (рис. 1). Структура темных участков внутри аустенитной оболочки состоит из изолированных вторичных карбидов и мартенсита.

Исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали, что наплавленный слой состоит из мартенсита, аустенита и карбидов (карбонитридов) M<sub>6</sub>C (Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C -Fe<sub>4</sub>W<sub>2</sub>C). Карбид формирует каркасную сетку и является основной упрочняющей фазой наплавленного слоя. Методами светлопольного и темнопольного анализа в объеме зерна выявлены частицы второй фазы игольчатой морфологии. Анализ микрорентгенограмм показывает, что это сложные карбиды ванадия состава (Cr,V)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Микротвердость поверхностного слоя составляет 4.7 ГПа.

После отпуска (рис. 2) видны структурные изменения в наплавленном слое. Во внутренних областях с аустенитно-мартенситной структурой наблюдается образова-

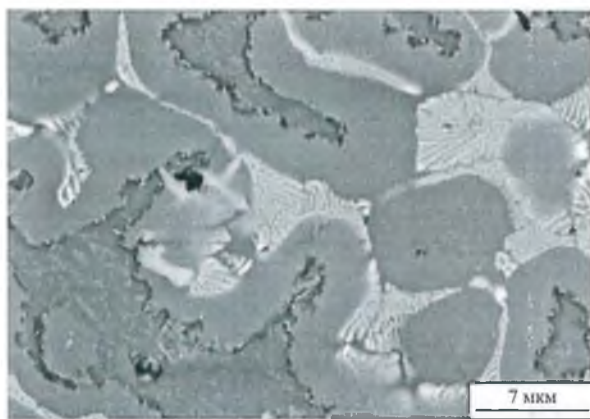


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения наплавленного слоя на глубине 2 мм

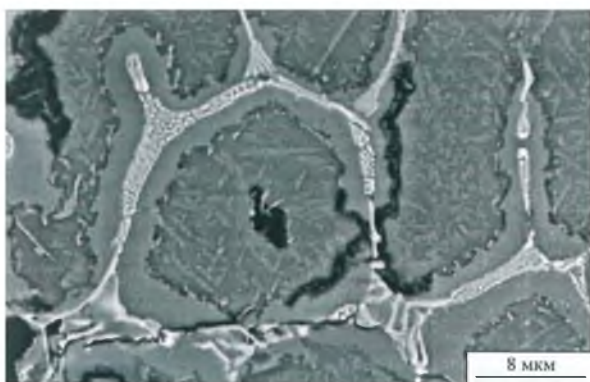


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения наплавленного слоя на глубине 2 мм после отпуска

ние мартенсита, отпущенного с повышенной травимостью и выделения дисперсных карбидов типа  $\text{MeC}$ ,  $\text{Me}_6\text{C}$ .

После дополнительной электронно-пучковой обработки карбидная сетка сохраняется. В маленьких ячейках в областях с аустенитной структурой происходит заживление трещин. В больших ячейках с аустенитно-мартенситной структурой мартенситные иглы исчезают, изолированные карбиды увеличиваются в размерах. Карбидная сетка становится размытой. Установлено, что структура модифицированного слоя имеет столбчатое (ячеистое) строение. Поперечные размеры столбиков

изменяются от 100 до 250 нм. По границам столбиков располагаются частицы второй фазы с поперечными размерами от 10 до 15 нм.

### Заключение

Проведены исследования эволюции структуры, элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств слоя, наплавленного сплавом P18Ю в защитно-легирующей среде азота, подвергнутого высокотемпературному отпуску и дополнительному облучению импульсным электронным пучком в режиме высокоскоростного плавления тонкого поверхностного слоя. Показано, что отпуск приводит к росту микротвердости наплавленного слоя до 5.3 ГПа, а электронно-пучковая обработка обеспечивает повышение износостойкости материала в 3 и более раз, микротвердость при этом не изменяется.

### Библиографические ссылки

1. Ryabtsev I., Fomichov S., Kuznetsov V., Chvertko Y., Banin A. Plasma Surfacing. Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication. Springer, Cham, 2023. URL: (дата обращения: 28.06.2023).
2. Ramkumar P., Karthikeyan M.K., Gupta R.K., et al. Plasma Arc Welding of High Strength 0.3 % C-CrMoV (ESR). Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals* 2017; 70(5): 1317-1322.
3. Fatima S., Khan M., Jaffery S.H.I., et al. Optimization of process parameters for plasma arc welding of austenitic stainless steel (304 L) with low carbon steel (A-36). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L. Journal of Materials: Design and Applications*. 2016; 230(2): 640-653.
4. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe-C-Cr-Mn-Si, дополнительно легированных азотом. *Сварочное производство* 2011; (10): 18-22.
5. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Электронно-пучковая модификация поверхности покрытий. *Известия вузов. Физика* 2011; 11(3): 103-111.