

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИНТЕРФЕЙСА СИСТЕМЫ «ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ МОЛИБДЕНОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ / ПОДЛОЖКА», ОБЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

И.В. Баклухина, Д.А. Романов, В.Е. Громов

Сибирский государственный индустриальный университет,  
ул. Кирова 42, Новокузнецк 654007, Россия, [baklushina@rambler.ru](mailto:baklushina@rambler.ru),  
[romanov\\_da@physics.sibsiu.ru](mailto:romanov_da@physics.sibsiu.ru), [gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)

Методами современного физического материаловедения проведены исследования структурно-фазового состояния, элементного состава и механических свойств переходной зоны контакта системы «плазменное покрытие (быстрорежущая молибденовая сталь) - подложка (среднеуглеродистая сталь)», подвергнутой электронно-пучковой обработке. С целью формирования покрытия использовали специализированную установку УД-417 с расширенным подающим механизмом и диаметром порошковой проволоки установки до 4.0 мм. Для электронно-пучковой обработки использовался плазменный эмиттер «СОЛО». Установлено, что формирование покрытия сопровождается созданием протяженного переходного слоя  $\approx 100$  мкм, который содержит  $\alpha$ -фазу,  $\gamma$ -фазу, карбиды сложного состава. После облучения в объеме переходного слоя выявлена пластинчатая структура, содержащая частицы цементита карбида типа  $M_6C$ . Зона контакта, непосредственно примыкающая к покрытию, содержит зерна остаточного austenита, упрочненные наноразмерными карбидами типа  $M_6C$ . Выявлено, что электронно-пучковая обработка системы «покрытие – подложка» приводит к снижению твердости и модуля Юнга переходного слоя. Эти параметры монотонно снижаются при удалении от наплавленного слоя, формируя демпфирующий слой вдоль поверхности контакта «покрытие-подложка». Высказаны физически обоснованные представления о причинах снижения твердости и модуля Юнга переходного слоя.

**Ключевые слова:** быстрорез; молибденовая сталь; плазменный метод; импульсный электронный пучок; облучение; система «покрытие / подложка»; интерфейс.

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE INTERFACE OF THE SYSTEM «PLASMA COATING OF MOLYBDENUM HIGH-SPEED STEEL / SUBSTRATE» IRRADIATED WITH A PULSED ELECTRON BEAM

I.V. Baklughina, D.A. Romanov, V.E. Gromov

Siberian State Industrial University, 42 Kirov Str., 654007 Novokuznetsk, Russia,  
[v.pochetuh@yandex.ru](mailto:v.pochetuh@yandex.ru), [romanov\\_da@physics.sibsiu.ru](mailto:romanov_da@physics.sibsiu.ru),  
[vaschuk@bk.ru](mailto:vaschuk@bk.ru), [filyakov.1999@mail.ru](mailto:filyakov.1999@mail.ru)

The methods of modern physical materials science were used to study the structural-phase state, elemental composition and mechanical properties of the transition zone of the contact of the "plasma coating (high-speed molybdenum steel) - substrate (medium-carbon steel)" system subjected to electron-beam processing. In order to form the coating, a specialized UD-417 unit with an extended feed mechanism and a powder wire diameter of up to 4.0 mm was used". In plasma surfacing, the source of low-temperature plasma is an electric discharge in a gas. Plasma, i.e. a substance in an ionized state, is formed in almost any arc discharge. The plasma formation process can be intensified by blowing a coaxial gas flow around the arc. A «SOLO» plasma emitter was used for electron beam processing. It was found that the coating formation is accompanied by the creation of an extended transition layer of  $\approx 100$   $\mu\text{m}$ , which contains the  $\alpha$ -phase,  $\gamma$ -phase, and carbides of complex composition. After irradiation, a lamellar structure containing particles of cementite carbide of the  $M_6C$  type was revealed in the volume of the transition layer. The contact zone immediately adjacent to the coating contains grains of residual austenite strengthened by nanosized carbides of the  $M_6C$  type. It was revealed that electron-beam processing of the "coating - substrate" system leads to a decrease in the hardness and Young's modulus of the transition layer. These parameters decrease monotonically with distance from the deposited layer, forming a damping layer along the contact surface "coating-substrate". Physically substantiated ideas about the reasons for the decrease in hardness and Young's modulus of the transition layer are expressed.

**Keywords:** high-speed cutting; molybdenum steel; plasma method; pulsed electron beam; irradiation; «coating/substrate» system, interface.

## Введение

Принципиально важной особенностью модификации поверхностного слоя низкоэнергетическими высокоинтенсивными электронными пучками является отсутствие выраженной поверхности раздела между модифицированным слоем и объемом материала, что определяет хорошие демпфирующие свойства материала при механических и температурных внешних воздействиях, предотвращая преждевременное зарождение и распространение с поверхности в основной объем материала хрупких микротрещин, приводящих к разрушению [1, 2]. Целью настоящей работы являлось исследование структуры и свойств интерфейса системы «покрытие (быстрорежущая молибденовая сталь) / (среднеуглеродистая сталь) подложка», облученного низкоэнергетическим импульсным электронным пучком.

## Результаты и их обсуждение

Облучение интерфейса системы «покрытие/подложка» импульсным электронным пучком существенным образом изменяет структуру металла. Во-первых, переходный слой содержит большое количество микрократеров. Это может свидетельствовать о наличии в данном слое легкоплавких включений, к примеру, сульфидов железа или марганца, температура плавления которых существенно ниже температуры плавления железа (основной фазы переходного слоя). Во-вторых, переходный слой содержит большое количество микротрещин. Это свидетельствуют о том, что высокоскоростная кристаллизация металла переходного слоя, инициированная облучением импульсным электронным пучком, сопровождается формированием упругих растягивающих напряжений, релаксация которых и сопровождается трещинообразованием. По мере удаления от зоны контакта наплавки и подложки количество микротрещин и микрократеров снижается.

Фазовый состав и состояние кристаллической решетки материала переходной зоны изучали методами рентгенофазового анализа. Установлено формирование в переходном слое покрытия перед облучением многофазной структуры, основной фазой которой является, как и ожидалось,  $\alpha$ -фаза (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа), в небольшом количестве присутствует  $\gamma$ -фаза (твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки железа) и карбид сложного состава  $\text{Me}_6\text{C}$ .

Фазовый состав интерфейса системы «покрытие/подложка» после отпуска и дополнительного облучения импульсным электронным пучком представлен двумя фазами:  $\alpha$ -фазой и  $\gamma$ -фазой. Высокое относительное содержание в поверхностном слое интерфейса остаточного аустенита свидетельствует, во-первых, о высокой скорости охлаждения материала после облучения импульсным электронным пучком, во-вторых, о формировании стабилизирующего  $\gamma$ -фазу твердого раствора на основе ГЦК кристаллической решетки железа и, в-третьих, о стабилизации кристаллической решетки  $\gamma$ -фазы упругими остаточными напряжениями.

Результаты электронно-микроскопического исследования структуры поверхностного слоя интерфейса системы «покрытие / подложка», облученной импульсным электронным пучком, свидетельствуют о том, что высокоскоростная кристаллизация наплавленного слоя приводит к формированию сетки микротрещин, разделяющей поверхностный слой материала на фрагменты различного размера. Это, как указывалось выше, является механизмом релаксации упругих напряжений, формирующихся в материале в результате высокоскоростной термической обработки, инициированной облучением импульсным электронным пучком.

При анализе фазового состава и дефектной субструктуре фаз интерфейса

системы «покрытие / подложка» методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии было установлено, что переходный слой, примыкающий к наплавленному слою, представлен зернами остаточного аустенита субмикронных размеров. По границам и в объеме зерен остаточного аустенита располагаются частицы карбida типа М<sub>6</sub>С.

При большем удалении от границы контакта переходного слоя с наплавленным слоем выявляется структура поликристаллического типа, представленная зернами  $\alpha$ -фазы, в объеме и по границам которых присутствуют наноразмерные частицы карбida типа М<sub>6</sub>С, имеющие округлую форму.

### Заключение

Технологией плазменной наплавки в среде азота на стали 30ХГСА порошковой проволокой системы MoCrCoC диаметром 4 мм сформирован наплавленный слой толщиной ~ 9-10 мм. В качестве плазмообразующего газа использован аргон высшего сорта. Установлено, что формирование покрытия сопровождается созданием протяженного переходного слоя. Осуществлено облучение переходного слоя системы «покрытие/подложка» импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Методами рентгеноструктурного анализа установлено, что основными фазами переходного слоя после облучения являются  $\alpha$ -фаза и  $\gamma$ -фаза, частицы карбидной фазы

не обнаружены, что может указывать на их малое количество. Установлено, что переходный слой после облучения содержит микрократеры и микротрещины, фрагментирующие его на области различных размеров.

Показано, что в зоне контакта структура подложки сформирована зернами со структурой бейнита верхнего. В объеме переходного слоя наблюдается пластинчатая структура, содержащая частицы цементита и частицы карбida типа М<sub>6</sub>С. Переходный слой, непосредственно примыкающий к наплавке, содержит зерна остаточного аустенита, упрочненные включениями карбидов типа М<sub>6</sub>С наносубмикронных размеров. Установлено, что облучение импульсным электронным пучком системы «покрытие/подложка» приводит к снижению твердости и модуля Юнга переходного слоя. Это обусловлено растягивающими напряжениями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186/>.

### Библиографические ссылки

1. Поут Дж., Фоти Г., Джекобсон Д. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками: Москва: Машиностроение; 1987. 424 с.
2. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Белов А.Б. Effects of Модификация поверхности деталей из жаропрочных сталей сильноточными импульсными электронными пучками. Физика и химия обработки материалов 2005; (2): 61-70.