

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАПЛАВКИ МОЛИБДЕНОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ОТПУСКУ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Ю.Ф. Иванов<sup>1)</sup>, В.Е. Громов<sup>2)</sup>, С.С. Миненко<sup>2)</sup>,  
А.С. Чапайкин<sup>2)</sup>, С.В. Райков<sup>2)</sup>, Г.И. Черепанова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия, yufi55@mail.ru

<sup>2)</sup>Сибирский государственный индустриальный университет,  
ул. Кирова 42, Новокузнецк 654007, Россия,  
gromov@physics.sibsiu.ru, ss121278@mail.ru, thapajkin.as@yandex.ru,  
raykov\_s\_v@mail.ru, cherepanova25@mail.ru

В данной работе представлены результаты исследования образцов, полученных методом плазменной наплавки в среде азота на сталь 30ХГСА. Химический состав наплавленного материала (М9) включает ключевые элементы, такие как молибден, хром и кобальт, в специфических процентных соотношениях. Опыт проводился с использованием режимов наплавки, аналогичных тем, которые были описаны в предыдущих исследованиях. Важным этапом обработки стал двукратный отпуск стали с наплавленным слоем, осуществляемый при температуре 560–580 °С. Дополнительная модификация наплавленного слоя проводилась с использованием импульсного электронного пучка, что существенно влияло на структуру материала. Результаты экспериментов показали, что кристаллизация, вызванная плазменной наплавкой, приводит к образованию поликристаллической дендритной структуры с характерными карбидными сетками, которые сохраняются после высокотемпературного отпуска. Однако после обработки электронным пучком структура поверхностного слоя претерпевает значительные изменения, что подтверждается анализом элементного состава, проведенном методами микрорентгеноспектрального анализа. Выявленные неоднородности в распределении химических элементов в наплавленном слое открывают новые перспективы для применения плазменной наплавки и импульсной обработки в металлургической промышленности, что может способствовать улучшению свойств материалов.

**Ключевые слова:** плазменная наплавка; электронный пучок; структура; отпуск.

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF MOLYBDENUM HIGH-SPEED STEEL SURFACE TEMPERED AND ELECTRON-BEAM PROCESSED

Yuri Ivanov<sup>1)</sup>, Victor Gromov<sup>2)</sup>, Sergey Minenko<sup>2)</sup>,  
Alexander Chapaikin<sup>2)</sup>, Sergey Raikov<sup>2)</sup>, Galina Cherepanova<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

<sup>2)</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia,  
gromov@physics.sibsiu.ru, ss121278@mail.ru, thapajkin.as@yandex.ru, raykov\_s\_v@mail.ru,  
cherepanova25@mail.ru

This paper presents the results of studying samples obtained by plasma surfacing in a nitrogen environment on 30KhGSA steel. The chemical composition of the deposited material (M9) includes key elements such as molybdenum, chromium and cobalt in specific percentage ratios. The experiment was carried out using surfacing modes similar to those described in previous studies. An important stage of processing was double tempering of steel with a deposited layer, carried out at a temperature of 560–580 °C. Additional modification of the deposited layer was carried out using a pulsed electron beam, which significantly affected the structure of the material. The experimental results showed that crystallization caused by plasma surfacing leads to the formation of a polycrystalline dendritic structure with characteristic carbide networks that are preserved after high-temperature tempering. However, after electron beam processing, the structure of the surface layer undergoes significant changes, which is confirmed by the analysis of the elemental composition, carried out by the methods of micro-X-ray spectral analysis. The revealed heterogeneities in the distribution of chemical elements in the deposited layer open up new prospects for the use of plasma surfacing and pulsed processing in the metallurgical industry, which can contribute to improving the properties of materials.

**Keywords:** plasma surfacing; electron beam; structure; tempering.

## Введение

Плазменная наплавка быстрорежущими сталями, имея преимущество перед другими способами наплавки, широко используется для ремонта и восстановления изношенного оборудования, придавая в ряде случаев особые поверхностные свойства новым изделиям. Целью настоящей работы является анализ результатов и выявление закономерностей формирования структурных и механических свойств плазменной наплавки из быстрорежущей стали на базе М9 на сталь 30ХГСА, подвергнутой высокотемпературному отпуску и последующей обработке интенсивным импульсным электронным пучком.

## Материалы и методы исследования

Образцы для исследований получали плазменной наплавкой в среде азота на сталь 30ХГСА (вес. %: С – 0.3; Cr – 0.9; Mn – 0.8; Si – 0.9, остальное – Fe). Химический состав наплавки М9 (вес. %): Мо-8.85; Cr-3.57; Co-2.12; V-0.05; Si-1.12; Mn-0.56, Al-1.05, остальное – Fe. Режимы плазменной наплавки не отличались от описанных в работе [1]. Двукратный отпуск стали с наплавленным слоем осуществляли при температуре 560-580 °С в течение 1 часа. Дополнительную обработку наплавленного слоя импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» (ИСЭ СО РАН). Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульсов воздействия 50 мкс, количество импульсов 10, частота следования импульсов 0.3 с<sup>-1</sup>, облучение проводили в среде аргона при остаточном давлении 0.02 Па.

## Результаты и их обсуждение

После комплексной обработки среднее значение микротвердости, измеренной на поверхности облучения (8.7 ГПа) превышает микротвердость приповерхностного слоя толщиной 20 мкм (8.26 ГПа), что может указывать на формирование в поверхностном слое после облучения материала

импульсным электронным пучком сжимающих остаточных напряжений.

Кристаллизация слоя, полученного плазменной наплавкой, приводит к формированию поликристаллической структуры дендритного типа (рис. 1, а). Характерным элементом такой структуры являются протяженные прослойки второй фазы, располагающиеся вдоль границ зерен (так называемая карбидная сетка).

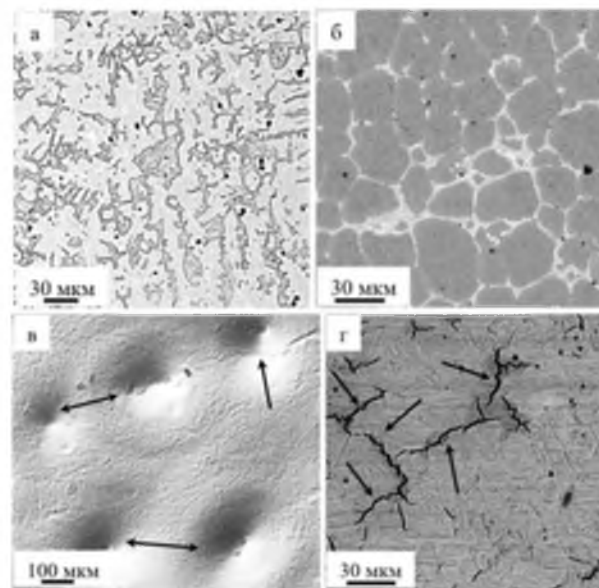


Рис. 1. Изображения структуры поверхности наплавленного слоя в исходном состоянии (а); после двукратного высокотемпературного отпуска (б) и после дополнительного облучения импульсным электронным пучком (в, г). Стрелками указаны: на (в) микрократеры, на (г) – микротрещины

Последующий двукратный высокотемпературный отпуск не приводит к разрушению зернограницных прослоек второй фазы (рис. 1, б). Структура поверхностного слоя наплавки кардинально изменяется после воздействия импульсного электронного пучка (рис. 1, в, г). Во-первых, не обнаруживается карбидная сетка, во-вторых, поверхность наплавленного материала, облученного импульсным электронным пучком, характеризуется наличием микрократеров (рис. 1, в, кратеры указаны стрелками), в-третьих, на поверхности облучения формируется пластинчатый рельеф, свидетельствующих о сдвиговом характере превращения, и в-четвертых, поверхностный слой фрагментируется сет-

кой микротрещин (рис. 1, г, микротрещины указаны стрелками).

Протяженные прослойки второй фазы, присутствующие в исходной наплавке и в наплавке после отпуска, обогащены преимущественно атомами молибдена. Включения округлой формы, наблюдающиеся в структуре наплавленного слоя, обогащены атомами кремния, алюминия и кислорода. Последнее позволяет предполагать присутствие в наплавленном слое оксидов алюминия и оксидов кремния.

Облучение наплавленного слоя импульсным электронным пучком приводит к существенному изменению распределения легирующих элементов в поверхностном слое наплавки. Методами картирования было установлено, что основные химические элементы, формирующие наплавленный материал, распределены в поверхностном слое наплавки однородно. Неоднородность в распределении атомов алюминия и кислорода имеет обратную тенденцию, т.е. усиливается. Включения округлой формы, тяготеющие к областям наплавленного металла с кратерами, обогащены атомами алюминия и кислорода.

Исследования элементного состава методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» подтверждают неоднородное распределение химических элемен-

тов в наплавленном слое, выявленное методами картирования. Область в объеме зерна обогащена преимущественно атомами железа, что может указывать на формирование твердого раствора практически всех легирующих элементов в кристаллической решетке на основе железа. Область кратера, сформировавшего при облучении наплавки импульсным электронным пучком, обогащена (помимо атомов железа) преимущественно атомами молибдена, хрома, кремния и магния, что может указывать на причину кратерообразования в наплавленном слое.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>.

### Заключение

Результаты исследования подтверждают, что данные методы могут существенно улучшить эксплуатационные характеристики материалов, что делает их перспективными для дальнейших исследований и применения в различных отраслях.

### Библиографические ссылки

1. Иванов Ю.Ф., Чапайкин А.С., Гусева Т.П., Романов Д.А. Преобразование структуры и свойств наплавки Р18Ю после высокотемпературного отпуска и электронно-пучковой обработки. *Проблемы черной металлургии и материаловедения* 2023; (3): 62-79.