

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.9.025.523:621.9.011

Комплексное использование  
минерального сырья. № 3. 2017.

Б. К. РАХАДИЛОВ<sup>1,3</sup>, О. А. СТЕПАНОВА<sup>2</sup>, Ж. Б. САГДОЛДИНА<sup>2,3</sup>, Т. Н. БАЙСЕРКЕНОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>2</sup>Государственный университет им. Шакарима, Семей, Казахстан

<sup>3</sup>Национальный ядерный центр РК МЭ РК, Курчатов, Казахстан, \*e-mail: bor1988@mail.ru

## СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

**Резюме:** В статье представлены результаты исследования поверхностной структуры быстрорежущей стали Р6М5 после электронно-лучевой обработки с использованием методов электронной микроскопии. После электронно-лучевой обработки происходит уменьшение размера карбидных частиц и на поперечном сечении образца формируется закаленный слой, представляющий собой более фрагментированный мартенсит. При этом модифицированный слой плавно переходит в основу. Толщина модифицированного слоя стали Р6М5 составляет в среднем 20 мкм. Проведением энергодисперсионного анализа поверхности стали Р6М5 до и после электронно-лучевой обработки установлено, что после электронно-лучевой обработки не наблюдаются значительные изменения элементного состава поверхности материала. Структура сталей состоит из мартенсита и карбида. При этом определено, что светлые сферические карбиды обогащены вольфрамом и молибденом, а серые - ванадием. Электронно-микроскопическим методом подтверждено, что после электронно-лучевой обработки на поверхностном слое быстрорежущей стали Р6М5 образуются мелкодисперсные частицы вторичных фаз, представляющие собой карбиды  $M_{23}C_6$ . Определено, что частицы карбида  $M_{23}C_6$  находятся внутри кристаллов  $\alpha$ -мартенсита. Охарактеризованы вторичные фазы, образовавшиеся после электронного облучения, в поверхностных слоях быстрорежущей стали Р6М5. Предположено, что образование фрагментированного мартенсита и карбидов  $M_{23}C_6$  приводит к повышению твердости и износостойкости стали Р6М5.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая обработка, быстрорежущая сталь, микроструктура, мартенсит, карбид

**Введение.** В последние годы получили развитие новые способы обработки поверхности, использующие концентрированные потоки энергии (КПЭ). Они позволяют существенно (до нескольких секунд, а при импульсных процессах - до долей секунды) сократить время обработки. Это в некоторых случаях дает возможность встраивать соответствующее оборудование в единую технологическую цепь изготовления деталей, а также позволяют снижать энергозатраты на проведение обработки за счет того, что воздействию концентрированных потоков энергии подвергаются те части поверхности, которые в наибольшей степени нуждаются в упрочнении и защите [1]. Все большее применение в промышленном производстве находят методы упрочнения металлов и сплавов с использованием концентрированных источников нагрева - электрической дуги, потоков ионов, плазмы, лазерных и электронных лучей и др. [2].

Технология вневакуумной электронно-лучевой обработки, которая реализуется с помощью промышленных ускорителей электронов, отли-

чается простотой и объемным вводом энергии непосредственно в объект облучения. Также, данная технология соответствует современным техническим, экономическим, экологическим и социальным требованиям. Вневакуумная электронно-лучевая обработка в ускорителях серии ЭЛВ обеспечивает сканирование электронным пучком в воздухе, что позволяет значительно увеличить площади обрабатываемых изделий и повысить производительность процесса. Выведенный в атмосферу сфокусированный электронный пучок позволяет производить поверхностную закалку стальных изделий. После закалки сохраняется высокое качество закаленного поверхностного слоя. В большинстве случаев класс чистоты поверхности в результате закалки не изменяется и, следовательно, данная операция может быть финишной. К преимуществам обработки (закалки) электронным пучком можно отнести отсутствие дополнительных охлаждающих жидкостей, высокую эффективность и производительность процесса (до 200 см<sup>2</sup>/с).

В процессе обработки электронным пучком происходят значительные изменения структурно-фазовых состояний и свойств материала в тонких поверхностных слоях вследствие физического воздействия заряженных частиц. Развивающиеся при этом процессы перестройки структуры, структурно-фазовые превращения происходят в условиях, далеких от термодинамически равновесных состояний, и они позволяют получать модифицированные поверхностные слои с уникальным комплексом физико-механических свойств [3]. В связи с этим в данной работе была исследована структура модифицированных поверхностных слоев быстрорежущей стали Р6М5 при вневакуумной электронно-лучевой обработке. Применение быстрорежущих сталей для режущего инструмента позволяет повысить скорость резания в несколько раз, а стойкость инструмента – в десятки раз [4]. Главной отличительной особенностью быстрорежущих сталей является их высокая теплостойкость или красностойкость (600-700 °С) при наличии высокой твердости (63-70 HRC) и износостойкости инструмента. Уникальные свойства быстрорежущих сталей достигаются посредством специального легирования и сложной термической обработки, обеспечивающих определенный фазовый состав [2].

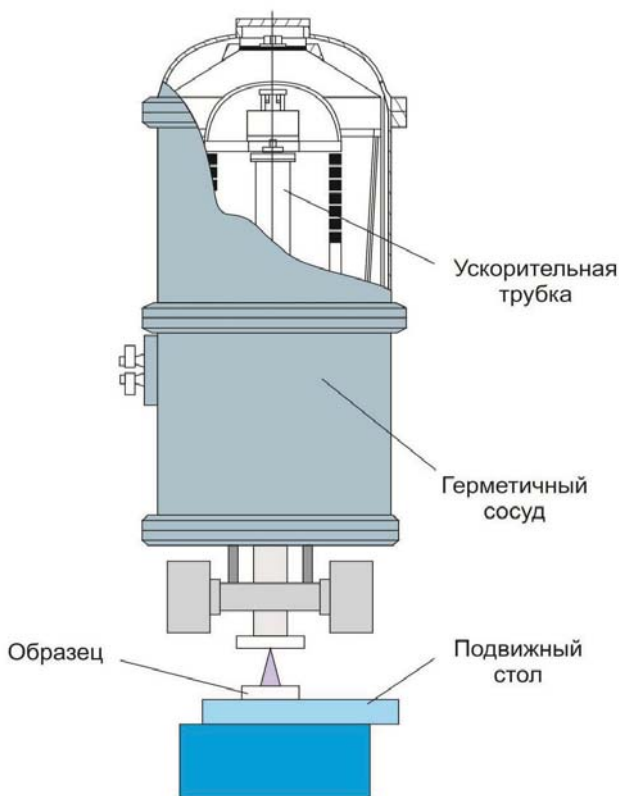


Рисунок 1 – Схема ускорителя электронов ЭЛВ-4

**Экспериментальная часть.** Заготовки образцов для исследований в виде параллелепипедов с размерами 8x20x20 мм<sup>3</sup> вырезали из режущего инструмента (дисковых фрез) стали Р6М5 алмазным диском, толщиной в 1 мм, который погружен в охлаждающую жидкость. При малых оборотах резания  $n = 350$  об/мин и низкой нагрузке  $m=250$  г, образец не испытывает деформации и термического воздействия.

Вневакуумная электронно-лучевая обработка (ЭЛО) образцов из быстрорежущих сталей осуществлялась на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-4 в АО «Парк ядерных технологий». На рисунке 1 представлено схематическое изображение используемого оборудования, которое включает ускоритель, систему выпуска электронов в атмосферу, вакуумную систему, систему управления, систему силового питания и газовую систему.

Внутри сосуда располагаются первичная обмотка, высоковольтный выпрямитель со встроенной ускорительной трубкой, высоковольтный электрод и блок управления инжектором. К нижней части установки прикреплены элементы вакуумной системы с выпускным устройством. Устройство выпуска электронов в воздушную атмосферу состоит из трех камер [5]. Камеры последовательно соединены между собой диафрагмами с отверстиями. В каждой из камер поддерживается вакуум и по мере приближения к ускорительной трубке он улучшается до величины  $10^{-4}$  Па. Проходящий пучок электронов фокусируется вблизи отверстий в диафрагме магнитными линзами. На выходе из ускорительной трубки электроны имеют энергию –  $eU_0$  (где  $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона, а  $U_0$  – ускоряющее напряжение). Для защиты вакуумной системы от попадания загрязняющих частиц и обеспечения дополнительного охлаждения в процессе наплавки осуществляется обдув плоскости выпускного отверстия струей воздуха. Обрабатываемая деталь располагается на движущемся столике под выпускным отверстием. Ускоритель электронов ЭЛВ-4 обладает следующими характеристиками: энергия электронов – 0,8...1,4 МэВ; максимальный ток пучка электронов – 50 мА при мощности пучка в 50 кВт.

Режимы электронно-лучевой обработки образцов стали Р6М5: энергия пучка 1,2 МэВ, тока пучка 40 мА, время облучения 1,6 с. Заготовки находились на расстоянии 130 мм от выпускного отверстия. При этом обрабатываемая площадь составляла 1000x80 мм<sup>2</sup>. Перед облучением образцы стали были отшлифованы и отполированы.

Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе «ALTA-MET-1M». Морфологию структуры поверхности изучали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-6390LV, оснащённом приставкой энергодисперсионного анализа, на просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-125. Исследования проводились методом дифракционной электронной микроскопии тонких фольг при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа выбиралось от 10000 до 80000 крат.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Микроструктура поверхностного слоя быстрорежущих сталей до и после электронно-лучевой обработки приведена на рисунке 2. Из рисунка видно, что в исходном состоянии микроструктура стали Р6М5 состоит из мартенсита отпуска и специальных карбидов.

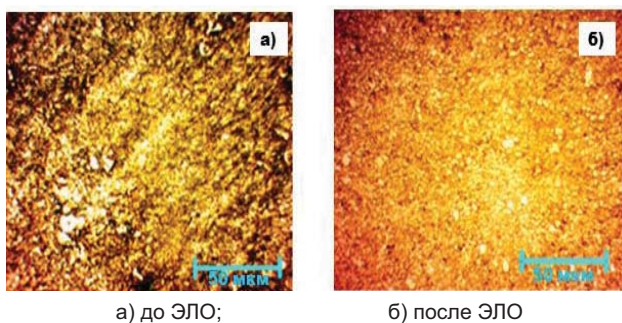


Рисунок 2 – Микроструктура поверхностного слоя стали Р6М5

Ранее в работе [6] на основе рентгеноструктурного и электронно-микроскопического анализов нами установлено, что после стандартной термической обработки (закалка при 1230 °С в масле и трехкратный отпуск при 560 °С длительностью 1 ч с последующим охлаждением в воздухе) в структуре стали присутствуют мартенсит и специальные карбиды. Металлографический анализ показал, что после ЭЛО в микроструктуре не наблюдаются

значительные изменения. Предполагается, что изменения происходят в тонкой структуре за счет образования более фрагментированного мартенсита.

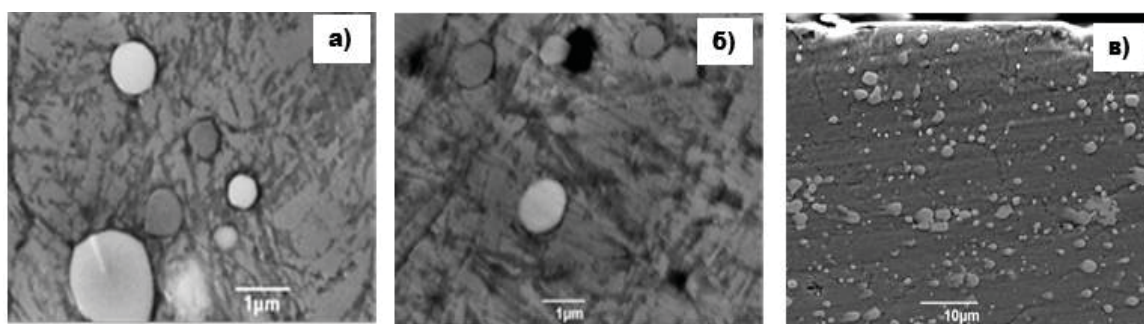
На рисунке 3 показаны РЭМ-изображения поверхности сталей Р6М5 до и после ЭЛО, а также изображение поперечного сечения образца после ЭЛО.

Результаты подтверждают уменьшение размера карбидных частиц после ЭЛО. На поперечном сечении образца видно формирование закаленного слоя, представляющего собой более фрагментированный мартенсит. При этом темнотравящаяся зона плавно переходит в основу. Толщина модифицированного слоя стали Р6М5 составляет в среднем 20 мкм, рисунок 3в.

С целью выявления изменения элементного состава поверхности был проведен энергодисперсионный анализ поверхности стали Р6М5 до и после ЭЛО, рисунок 4. Анализ показал, что после ЭЛО не наблюдаются значительные изменения элементного состава поверхности материала. Структура сталей состоит из мартенсита и карбида. При этом определено, что светлые сферические карбиды обогащены вольфрамом и молибденом, а серые – ванадием.

Как уже отмечалось методом РЭМ определено образование фрагментированного мартенсита с мелкодисперсными частицами вторых фаз после ЭЛО. С целью выявления кристаллических структур вторых фаз, образующихся при облучении, была исследована тонкая структура образцов стали Р6М5 после ЭЛО, с помощью просвечивающей электронной микроскопии, рисунок 5.

Электронно-микроскопическим методом подтверждено образование мелкодисперсных выделений частиц вторых фаз, представляющих собой карбид  $M_{23}C_6$ , в поверхностном слое стали Р6М5 после ЭЛО. Известно, что карбид  $M_{23}C_6$  содержит в себе железо и хром. Поэтому



а) поверхность исходного образца; б) поверхность после ЭЛО; в) поперечное сечение образца после ЭЛО

Рисунок 3 – РЭМ изображения стали Р6М5



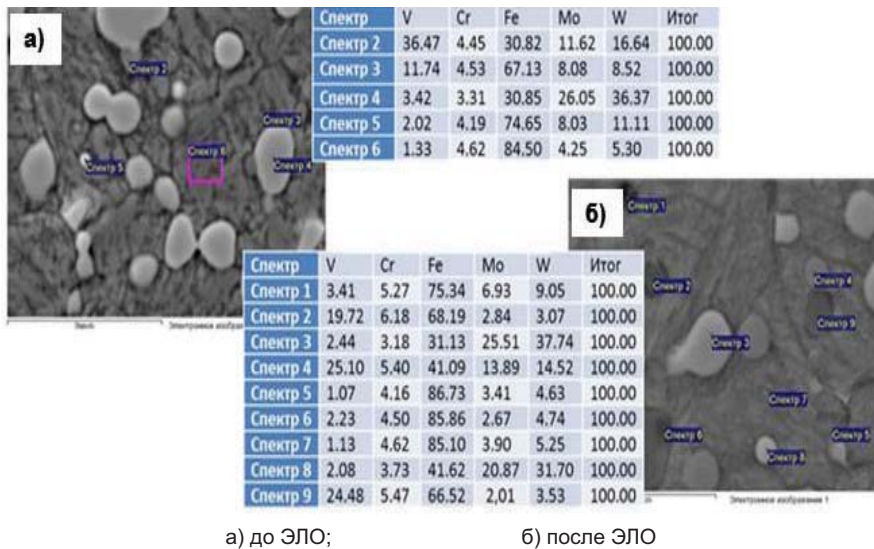
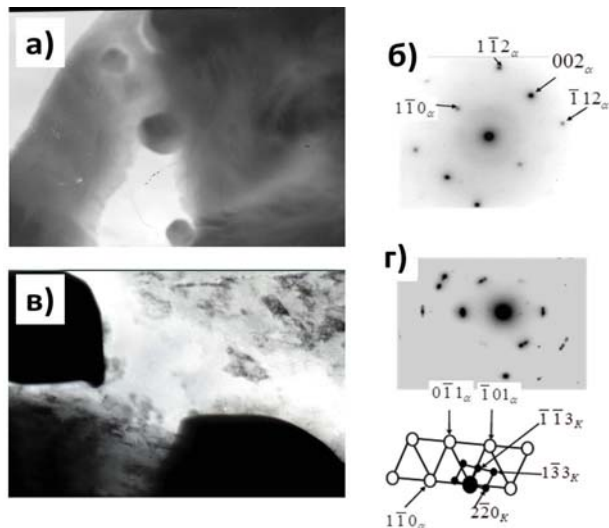


Рисунок 4 - Результаты рентгеноспектрального микроанализа стали Р6М5

его химическая формула должна быть записана как  $(Fe, Cr)_{23}C_6$ . Таким образом, хром ярко проявляет себя как карбидообразующий элемент, как и в случае облучения электронами. Частицы карбида  $M_{23}C_6$  находятся внутри кристаллов  $\alpha$ -мартенсита. Это мелкие ( $d < 10$  нм) частицы, расположенные в узлах дислокационных сеток. С уменьшением размеров карбидов, износостойкость и твердость быстрорежущих сталей увеличивается [7].



а - светлопольное изображение; б - его индцированная микродифракционная картина: присутствуют рефлексы, относящиеся к плоскости  $\{111\}$   $\alpha$ - фазы, в - светлопольное изображение (мелкие фрагменты); г - его микродифракционная картина: присутствуют рефлексы, относящиеся к плоскостям  $\{111\}$   $\alpha$ - фазы и  $\{114\}$  карбида  $M_{23}C_6$

Рисунок 5 – Электронно-микроскопические изображения тонкой структуры стали Р6М5 после ЭЛО

Таким образом, мы охарактеризовали вторичные фазы, образовавшиеся после электронного облучения в поверхностных слоях быстрорежущей стали Р6М5. Предполагается, что образование фрагментированного мартенсита и карбидов  $M_{23}C_6$  приводит к повышению твердости и износостойкости стали Р6М5. Эти исследования являются практически значимыми, потому что механические свойства быстрорежущей стали в значительной степени определяются структурой и составом вторичных фаз.

**Выводы.** Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

- после ЭЛО на поверхности формируется закаленный слой, представляющий собой более фрагментированный мартенсит. Толщина модифицированного слоя стали Р6М5 составляет в среднем 20 мкм;
- электронно-микроскопическим методом установлено, что после ЭЛО на поверхностном слое быстрорежущей стали Р6М5 образуются мелкодисперсные частицы вторичных фаз, представляющие собой карбиды  $M_{23}C_6$ . Определено, что частицы карбида  $M_{23}C_6$  находятся внутри кристаллов  $\alpha$ -мартенсита.

*Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК по программе «Грантовое финансирование научных исследований» на 2015-2017 гг.*

**ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Кадыржанов К.К., Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Русаков В.С., Туркебаев Т.Э. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. – М.: МГУ, 2005. – С. 640.
- 2 Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В., Оришч А.М., Рахмиянов Х.М., Салимов Р.А., Шукин В.Г., Косарев В.Ф. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. – Новосибирск: Наука, 2000. – С. 425.
- 3 Лещинский И.К., Самотугин С.С., Пирч И.И., Комар В.И. Плазменное поверхностное упрочнение. – Киев: Техника, 1990. – С. 109.
- 4 Аршингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка. Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – С. 313.
- 5 Салтыков С.А. Стереометрическая металлография – М.: Металлургия, 1976. – С. 190.

6 Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Карипбаева Г.С., Манапбаева А.Б. Структурно-фазовое состояние быстрорежущей стали Р6М5 после термической обработки // Вестник КазНУ. – 2014. – № 1 (48). – С. 53-59.

7 Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М. Инструментальные стали. Справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – С. 272.

#### REFERENCES

1 Kadyrzhanov K.K., Komarov F.F., Pogrebnyak A.D., Rusakov V.S., Turkebaev T.E. *Ionno-luchevaya i ionno-plazmennaya modifikatsiya materialov* (Ion-beam and ion-plasma modification of materials). Moscow: MGU. **2005**. 640 (in Russ.).

2 Solonenko O.P., Alhimov A.P., Marusin V.V., Orishich A.M., Rahimyanov H.M., Salimov P.A., Shhukin V.G., Kosarev V.F. *Vysokoenenergeticheskie protsessy obrabotki materialov* (High-energy processes of material processing). Novosibirsk: Nauka. **2000**. 425 (in Russ.).

3 Leshchinskij I.K., Samotugin S.S., Pirch I.I., Komar V.I. *Plazmennoe poverkhnostnoe uprochnenie* (Plasma surface hardening) Kiev: Technic. **1990**. 109 (in Russ.).

4 Arshinger I. *Instrumental'nye stali i ikh termicheskaya obrabotka. Spravochnik*. (Tool steels and their heat treatment. Handbook). Moscow: Metallurgy, **1982**. 313 (in Russ.).

5 Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* (Stereometric metallography). Moscow: Metallurgy, **1976**. 190 (in Russ.).

6 Skakov M.K., Rahadilov B.K., Karipbaeva G.S., Manapbaeva A.B., *Strukturno-fazovoe sostoyanie bystrorezhushchej stali P6M5 posle termicheskoy obrabotki* (Structural-phase state of fast-cutting steel P6M5 after heat treatment). *Vestnik KazNU = Bulletin of KazNU*. **2014**. 1 (48). 53-59 (in Russ.).

7 Gulyaev A.P., Malinina K.A., Saverina S.M. *Instrumental'nyye stali. Spravochnik*. (Instrumental steels. Handbook). – Moscow: Mashinostroyeniye, **1975**. 272 (in Russ.).

#### ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада электрондық микроскопия әдістерін пайдалана отырып, электронды-сәулелі өңдеуден кейін жылдам кескіш Р6М5 болаттың беттік құрылымын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Электронды-сәулелі өңдеуден кейін карбид бөлшектерінің мөлшері азаяды және үлгінің көлденең қимасында толымсыз мартенсит болып табылатын шыңдалған қабат қалыптасады. Сонымен қатар өзгертілген қабаты баяу негізге ауысады. Р6М5 болаттың өзгертілген қабатының қалыңдығы орташа 20 мкм. Электронды-сәулелі өңдеуге дейін және өңдеуден кейін Р6М5 болаттың бетінде энергодисперсиялық талдау жүргізу барысында электронды-сәулелі өңдеуден кейін материал бетінің элементтік құрамында елеулі өзгерістер байқалмайтындығы анықталды. Болаттың құрылымы мартенсит пен карбидтен құрылады. Сонымен қатар жарық сфералық карбидтер вольфрам мен молибденмен байытылғаны, ал сұрлары ванадиймен байытылғаны анықталды. Электронды-сәулелі өңдеуден кейін жылдам кескіш Р6М5 болаттың беттік қабатында  $M_{23}C_6$  карбидтер болып табылатын екінші фазалы ұсақ бөлшектер құрылатыны табылды.  $M_{23}C_6$  карбидінің бөлшектері  $\alpha$ -мартенсит кристаллдары ішінде орналасқаны анықталды. Жылдам кескіш Р6М5 болаттың беттік қабаттарында электронды сәулеленуден кейін пайда болған екінші фазалар сипатталған. Бөлшектенген мартенсит пен  $M_{23}C_6$  карбидтерінің пайда болуы Р6М5 болаттың қаттылығын және тозуға төзімділігін арттыруға әкелетіні болжамдалған.

**Түйін сөздер:** электронды-сәулелі өңдеу, жылдам кескіш болат, мартенсит микроқұрылым, карбид

#### ABSTRACT

The article presents results of investigation P6M5 fast-cutting steel surface structure after electron-beam processing using electron microscopy methods. After electron beam treatment, the size of carbide particles decreases and on the cross section of the sample is formed a hardened layer representing as a more fragmented martensite. In this case, the modified layer smoothly passes into the base. The thickness of the P6M5 modified layer of steel is average 20  $\mu\text{m}$ . Using an energy dispersive surface analysis of P6M5 steel before and after electron-beam processing it was determined, that there is no significant change in the elemental composition of the materials surface after electron-beam processing. The structure of steels consists of martensite and carbide. It is determined, that light spherical carbides are enriched by tungsten and molybdenum, and gray – by vanadium. Electron microscopic method confirmed that after electron-beam processing the fine-dispersed particles of secondary phases which are  $M_{23}C_6$  carbides are formed on the P6M5 fast-cutting steel surface layer. It is determined, that the particles of  $M_{23}C_6$  carbide are inside of the  $\alpha$ -martensite crystals. Secondary phases which formed on the P6M5 fast-cutting steel surface after electron irradiation are characterized. It is assumed, that the formation of fragmented martensite and  $M_{23}C_6$  carbides leads to the increasing of hardness and wear resistance of P6M5 steel.

**Key words:** electron-beam processing, fast-cutting steel, microstructure, martensite, carbide

Поступила 11.08.2017.