

УДК 538.971

## СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ Р6М5, ОБРАБОТАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

<sup>1)</sup> Скаков М.К., <sup>2)</sup> Рахадиллов Б.К., <sup>1)</sup> Зарва Д.Б., <sup>1)</sup> Гулькин А.В.

<sup>1)</sup> *Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

<sup>2)</sup> *Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан*

В статье исследовано влияние азотирования электролитно-плазменным воздействием на структуру и морфологию быстрорежущей стали Р6М5. Показано, что после азотирования электролитно-плазменным воздействием на поверхности стали Р6М5 формируются мелкие поры, микродефекты и мелкодисперсные включения. Экспериментально установлено, что в поверхности стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C формируется диффузионный упрочненный слой с монофазным нитридом Fe<sub>4</sub>N ( $\gamma'$ -фаза). Определено содержание азота на структурных составляющих после азотирования. Выявлено, что модифицированная поверхность отличается большей величиной поверхностных микронеровностей.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в настоящее время широкое распространение получили способы высокоэнергетического упрочнения поверхности металлов с использованием лазерного и плазменного воздействий [1]. Опыт показывает, что плазменные источники поверхностного нагрева можно во многих случаях применять наряду с такими источниками, как лазерный и электронно-лучевой, обеспечивая высокие технико-экономические показатели процесса. Так, поверхностная обработка режущих инструментов из быстрорежущих сталей воздействием плазмы является существенным резервом экономии материальных, трудовых и энергетических затрат [2]. Следует выделить два направления использования плазменного нагрева для поверхностного упрочнения материалов. К первому направлению можно отнести технологию ионно-плазменного и электролитно-плазменного упрочнения. Второе направление применения плазменного нагрева базируется на использовании сжатой дуги прямого или косвенного действия, генерируемой специальным плазмотроном. Особый интерес среди них представляет первое направление, а именно технология электролитно-плазменного упрочнения, благодаря которой можно достичь достаточно высоких эксплуатационных свойств при низкой трудоемкости [3]. В процессе обработки электролитно-плазменным воздействием происходят значительные изменения структурно-фазовых состояний и соответственно свойств материала в тонких поверхностных слоях вследствие физического воздействия ионов низкотемпературной плазмы и электрического разряда [4]. 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 [5]. Более того, воздействие электролитической плазмы, при котором происходит насыщение поверхности различными химическими элементами, сопровождается формированием поверхности со специфической морфологией.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является исследование влияния азотирования электролитно-плазменным воздействием на структуру и морфологию поверхности быстрорежущей стали Р6М5.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленной задачей в качестве объекта исследования была выбрана быстрорежущая вольфрамомолибденовая сталь Р6М5. Выбор материала исследования обоснован тем, что сталь Р6М5 является наиболее распространенной в металлообработке, типичной быстрорежущей сталью умеренной теплостойкости. Химический состав исследуемой стали приведен в таблице 1.

Заготовки образцов для исследований в виде параллелепипедов с размерами 10×30×30 мм<sup>3</sup> вырезали из прутков стали Р6М5 в состоянии поставки. Затем образцы подвергали стандартной для этой стали термообработке: закалке от 1230°C в масле и последующему трехкратному отпуску при 560°C (длительность каждого отпуска 1 ч, охлаждение в воздухе) [6]. После чего подвергали азотированию электролитно-плазменным воздействием.

Таблица 1. Химический состав быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Co
0.82-0.9	до 0.5	до 0.5	до 0.4	до 0.025	до 0.03	3.8-4.4	4.8-5.3	5.5-6.5	1.7-2.1	до 0.5

Электролитно-плазменное азотирование образцов осуществляли на опытно-промышленной установке, имеющей следующие основные части: электролитическая ячейка, источник питания, система автоматического управления, система охлаждения электролита, система подачи электролита [7]. Процесс азотирования проводили в электролите из водного раствора, содержащего 20% карбамида, 10% карбоната натрия в следующем режиме: температура нагрева образца – 550°C, напряжение при нагреве до температуры обработки – 320 В, плотность тока ~ 4 А/см<sup>2</sup>, напряжение при выдержке при 550°C – 200 В, плотность тока ~3 А/см<sup>2</sup>, время обработки варьировалось от 3 до 7 минут. Перед азотированием образцы стали отшлифовали и отполировали.

Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе «ALTAMI-MET-1M». Морфологию поверхности изучали на атомно-силовом микроскопе С3М Solver HV. Микроструктуру и элементный состав образцов стали исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV, который оснащен приставкой энергодисперсионного микроанализа INCAEnergy. Исследования фазового состава и кристаллической структуры образцов стали осуществляли методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре D8 ADVANCE в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении, используя шаг размером 0.02° и время шага 0,2 с. Для выявления структуры и частиц карбидных фаз было применено химическое травление шлифов в 4% спиртовом растворе азотной кислоты (время травления 5–7 с).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [8, 9], экспериментально выявлено, что микроструктура стали Р6М5 в исходном состоянии, то есть после закалки и трехкратного отпуска, состоит из пластинчатого мартенсита отпуска и специальных карбидов (рисунок 1, а). Частицы карбидов равномерно распределены и близки к правиль-

ной сферической форме диаметром менее 3 мкм. Сравнение микроструктуры стали Р6М5 до и после обработки показало, что модифицирование электролитно-плазменным воздействием способствует не только измельчению карбидов, но и изменению их морфологии. После азотирования электролитно-плазменным воздействием на поверхности стали Р6М5 формируются мелкие поры, микродефекты и мелкодисперсные включения (рисунок 1, б, стрелками показаны). Обнаруженные мелкие поры, микродефекты, по-видимому, образуются при бомбардировке заряженными частицами электролитной плазмы. Предполагается что, мелкодисперсные включения являются нитридами легирующих элементов (хром, молибден и ванадий), которые образуются при воздействии плазмы азотосодержащего электролита. Увеличение времени обработки приводит к дальнейшему повышению микродефектов [9]. Известно, что за счет возникновения избыточных вакансий и других дефектов кристаллической решетки возрастает доля стимулированной диффузии через кристаллическую решетку металла. Поэтому возникновение таких дефектов вполне закономерно при электролитно-плазменной обработке и объясняет интенсификацию процесса диффузионного насыщения азота при использовании непосредственного воздействия электролитической плазмы на насыщаемый материал [10].

Металлографическим анализом установлено, что при азотировании электролитно-плазменным воздействием при 550°C протекает процесс диффузионного насыщения стали азотом с ускоренным образованием модифицированного слоя на поверхности стали Р6М5. Микроструктура модифицированного слоя стали Р6М5 показана на рисунке 2. Видно, что после обработки на поверхности образцов стали Р6М5 формируется модифицированный слой толщиной 20–30 мкм.

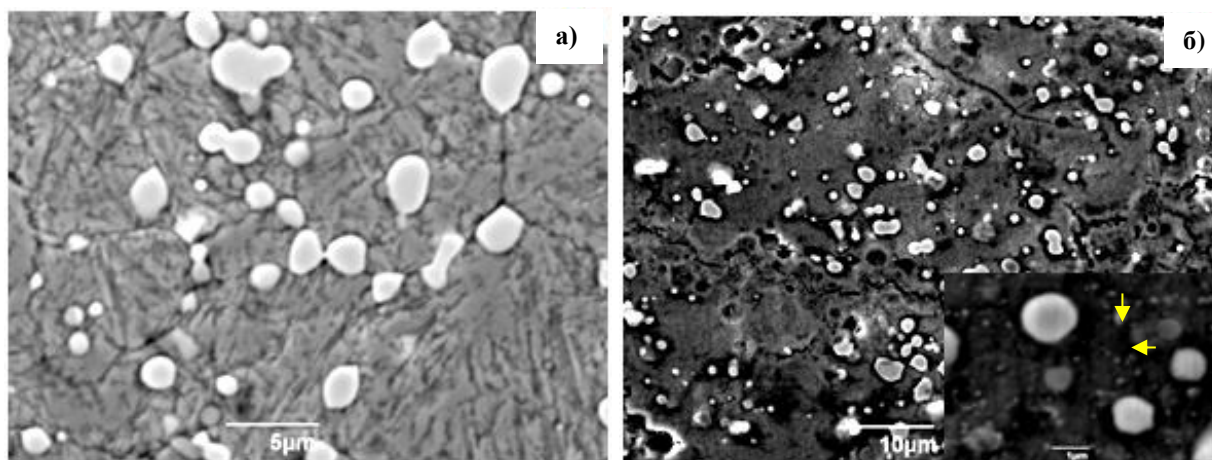
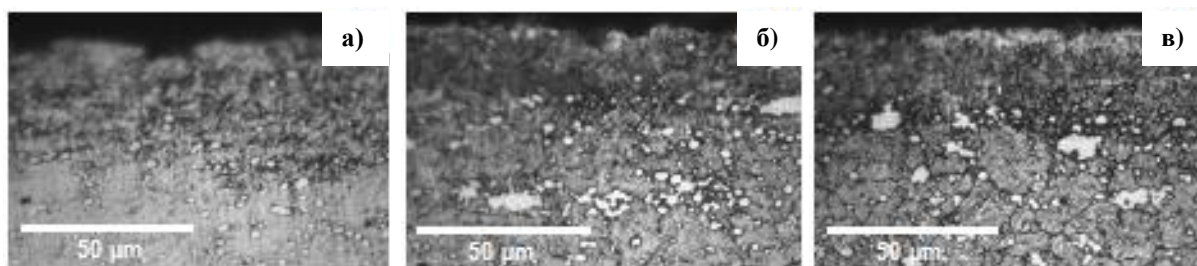


Рисунок 1. Микроструктура поверхности образцов стали Р6М5: а) до, б) после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C в течении 7 мин

**СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ Р6М5,  
ОБРАБОТАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**



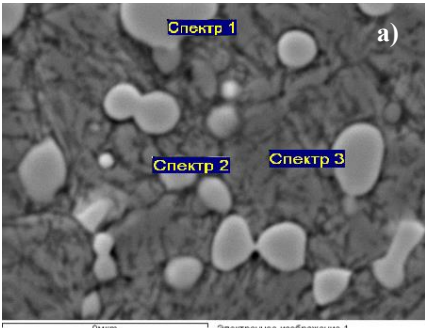
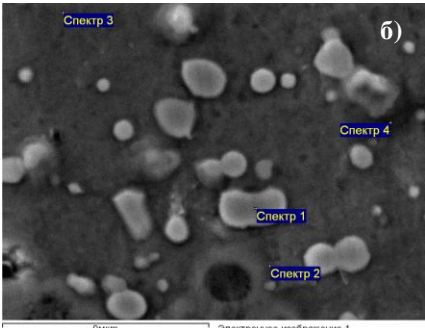
*Рисунок 2. Микроструктура диффузионного слоя стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°С: а) 3 мин, б) 5 мин, в) 7 мин*

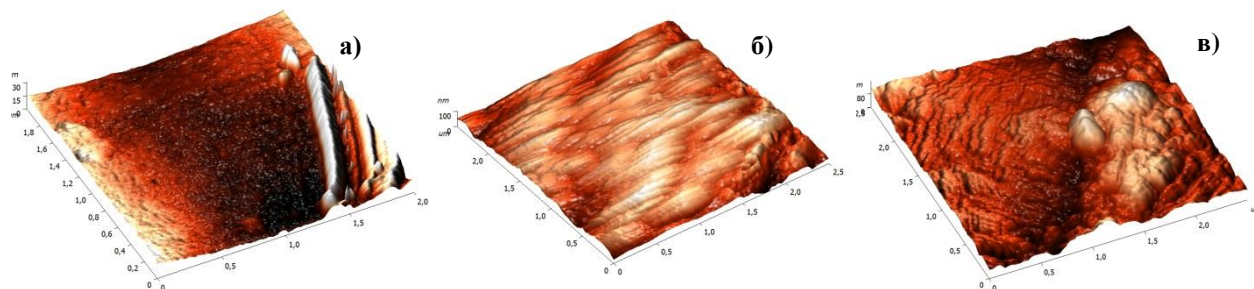
В таблице 2 приведены результаты микрозондового анализа. Приведено содержание легирующих элементов в карбидных частицах и матрице стали Р6М5 до и после азотирования электролитно-плазменным воздействием. Видно, что светлые карбиды обогащены вольфрамом и молибденом, а темные карбиды ванадием. После электролитно-плазменного воздействия содержание азота в матрице составляло около 6-ти процентов, а на темной карбидной частице около 1,5 процентов. На светлых карбидных частицах азот не обнаружен.

Исследования морфологии поверхности, проведенные методом атомно-силовой микроскопии, по-

казали, что поверхность в исходном состоянии обладает менее выраженной топографией, чем поверхность, подвергнутая азотированию электролитно-плазменным воздействием (рисунок 3). Помимо этого модифицированная поверхность отличается большей величиной поверхностных микронеровностей, что объясняется распылением поверхностного слоя в процессе модифицирования налетающими заряженными частицами электролитной плазмы и электрическими разрядами. При этом микронеровность модифицированных поверхностных слоев увеличивается в зависимости от времени выдержки, что вполне закономерно.

*Таблица 2. Содержание легирующих элементов в структурных составляющих стали Р6М5*

Спектр	Структурные составляющие	Исходный					После обработки					
												
		Содержание элементов, % (масс.)					Содержание элементов, % (масс.)					
		V	Cr	Fe	Mo	W	N	V	Cr	Fe	Mo	W
1	Светлые карбиды	3.42	3.31	30.86	26.05	36.37	0.00	3.25	3.51	32.04	25.91	35.29
2	Темные карбиды	26.47	4.45	30.82	16.62	21.64	1.37	19.86	6.14	57.59	7.12	7.93
3	Мартенсит	1.33	4.62	84.51	4.25	5.30	5.87	1.45	4.70	80.41	3.60	3.97



*Рисунок 3. Изображения рельефа поверхности образцов стали Р6М5, азотированных электролитно-плазменным воздействием продолжительностью 3 мин (а), 5 мин (б) и 7 мин (в)*

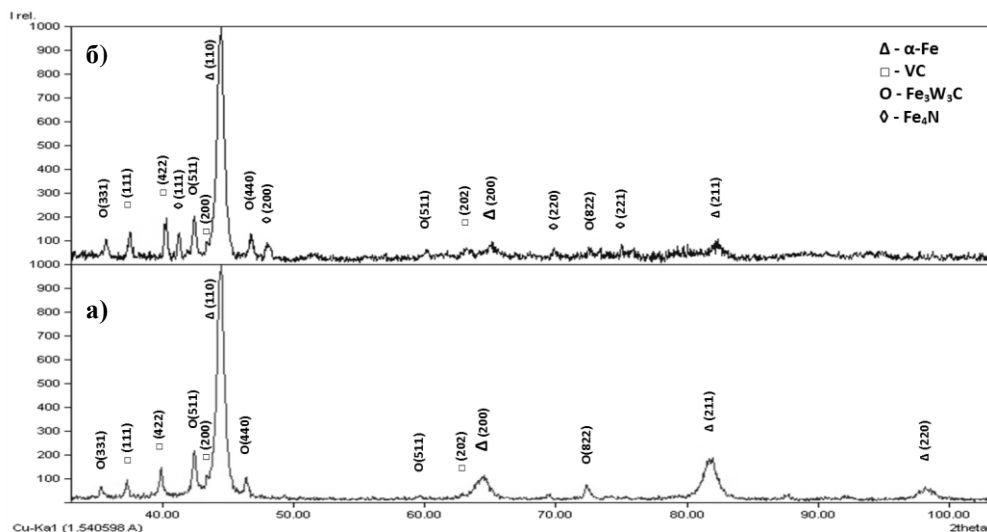


Рисунок 4. Дифрактограммы стали Р6М5 до (а) и после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C в течение 7 мин (б)

На рисунке 4 приведены рентгеновские дифрактограммы образцов стали Р6М5 до и после азотирования электролитно-плазменным воздействием. В исходном состоянии основной фазой матрицы стали является  $\alpha$ -фаза (мартенсит). А также в фазовом составе стали Р6М5 имеются частицы карбида ванадия VC и карбида вольфрама  $Fe_3W_3C$ , которые имеют сложную ГЦК-кристаллическую решетку и пространственную группу Fd3m [11]. После азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C, на дифрактограммах обнаружены интерференционные линии фазы  $Fe_4N$  (рисунок 4). Наблюдается уширение, спад интенсивности и сдвиг в сторону меньших брегговских углов интерференционных линий (110) и (211)  $\alpha$ -фазы, что свидетельствует об образовании твердого раствора азота в железе, т.е. зона внутреннего азотирования. Рентгеноструктурные исследования не выявили нитридных фаз легирующих элементов, возможно, ввиду их низкой концентрации и малого размера. Это также связано с образованием мелкодисперсных нитридов, распределение которых по слою не обеспечивает их выявление при имеющейся чувствительности фазового рентгеноструктурного анализа. Тем не менее, на основе данного микроструктурного и микрозондового анализов и литературных данных по формированию азотированного слоя легированных сталей можно предположить, что сформированные в поверхности стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием мелкодисперсные включения являются мелкодисперсными нитридами легирующих элементов.

Таким образом, главным достоинством азотирования электролитно-плазменным воздействием является возможность получения диффузионного упрочненного слоя с монофазным нитридом  $Fe_4N$  ( $\gamma'$ -фаза), в отличие от газового азотирования в аммиаке, где нитридный слой состоит из двух  $\gamma'$ - и

$\epsilon$ -фаз, что является источником внутренних напряжений на границе раздела фаз и вызывает хрупкость и отслаивание упрочненного слоя режущих инструментов при эксплуатации [12]. Образование диффузионного слоя из азотистого мартенсита в поверхностных слоях будет положительно влиять на эксплуатационные свойства режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, т.к. нитриды железа обладают большей теплоемкостью по сравнению с железом [13]. При этом создаются благоприятные условия для предотвращения температурных вспышек на поверхности режущего инструмента.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Определено, что после азотирования электролитно-плазменным воздействием на поверхности стали Р6М5 формируются мелкие поры, микродефекты и мелкодисперсные включения. Предполагается, что мелкодисперсные включения являются нитридами легирующих элементов.

2. Экспериментально установлено, что на поверхности стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C формируется диффузионный упрочненный слой с монофазным нитридом  $Fe_4N$  ( $\gamma'$ -фаза).

3. Выявлено, что модифицированная поверхность отличается большей величиной поверхностных микронеровностей, что объясняется распылением поверхностного слоя в процессе бомбардировки налетающими заряженными частицами электролитной плазмы и электрическими разрядами. Микронеровности модифицированных поверхностных слоев увеличиваются в зависимости от времени выдержки.

*Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК на 2013-2015 гг. по программе «Грантовое финансирование научных исследований».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С.Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента [Текст] : Монография / С. Н. Григорьев; В.П. Табаков, М.А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 379 с.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. М.: Машиностроение, 2008, – 406 с.
3. Суминов И.В., Белкин П.Н. и др. Мир материалов и технологий. В 2-х томах, Том 1, М. изд. Техносфера, 2011, – 464 с.
4. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E.O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – an overview // Surf. & Coat. Technol. 2007. V. 25. P. 87–96.
5. Plasma electrolysis for surface engineering, Yerokhin A.I., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S.J., // Surf. and Coat. Tech. 1999. V. 122. P. 73–93.
6. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408с.
7. Установка электролитно-плазменной обработки: Патент на полезную модель Республики Казахстан: МПК8 C25F 7/00 / Скаков М.К., Веригин А.А., Фурсов А.В., Парунин С.В., Сапатаев Е.Е., Курбанбеков Ш.П. // – № 878 / Заявл. 31.01.2012; Оpubл. 15.11.12, Бюл. № 11.
8. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Scheffler M., Karipbayeva G.S., Rakhadilov M.K. Electrolyte-plasma nitriding of high-speed steel // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 161-166 www.scientific.net.
9. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Karipbayeva G.S. Specifics of microstructure and phase composition of high-speed steel R6M5 // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 404. – P.20-24 www.scientific.net.
10. Дураджи В.Н., Химико-термическая обработка металлов с нагревом в электролитной плазме // Actual Conference. Технологии обработки поверхности, 6 (69), 2010 г – с. 45–50.
11. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Scheffler M. Influence of electrolyte plasma treatment on structure, phase composition and microhardness of steel R6M5 // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 531–532. P. 627–631. <http://www.scientific.net/KEM.531-532.627>.
12. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М., изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, 400 с.
13. Усманов К.Б., Якунин Г.И. Влияние внешних сред на износ и стойкость режущих инструментов. – Ташкент: изд-во «Фан» УзССР, 1984. 160 с.

## ЭЛЕКТРОЛИТТИ ПЛАЗМА ӘСЕРІМЕН ӨНДЕЛГЕН Р6М5 БОЛАТЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН БЕТТІК МОРФОЛОГИЯСЫ

<sup>1)</sup> Скаков М.К., <sup>2)</sup> Рахадиллов Б.К., <sup>1)</sup> Зарва Д.Б., <sup>1)</sup> Гулькин А.В.

<sup>1)</sup> Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Мақалада электролитті плазмалық әсермен азоттаудың Р6М5 жылдам кескіш болатының құрылымы мен морфологиясына әсері зерттелген. Электролиттік плазмалық әсермен азоттаудан кейін Р6М5 болатының бетінде ұсақ тесіктер, микроақаулар және ұсақ дисперсті қосылыстар түзілетіндігі корсетілген. 550°C температурада электролиттік плазмалық әсермен азоттаудан кейін Р6М5 болатының бетінде Fe<sub>4</sub>N ( $\gamma'$ -фаза) монофазалық нитридi бар берiктендiрiлген диффузиялық қабат түзілетіндігі экспериментті түрде анықталды. Азоттаудан кейін құрылымдардағы азоттың үлесі анықталған. Турлендірілген бет беттік микротегісеместікпен ерекшеленетіні анықталған.

## STRUCTURE AND SURFACE MORPHOLOGY OF R6M5 STEEL AFTER ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT

<sup>1)</sup> Skakov M.K., <sup>2)</sup> Rakhadilov B.K., <sup>1)</sup> Zarva D.B., <sup>1)</sup> Gulkin A.V.

<sup>1)</sup> National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>2)</sup> D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

In article influence of nitriding on the structure and morphology of R6M5 high-speed steel by electrolytic-plasma treatment was study. It is shown that after nitriding by electrolytic-plasma treatment on the R6M5 steel surface formation of small pores, microdefects and fine inclusion. It is found experimentally that R6M5 steel surface after electrolytic-plasma nitriding at 550°C temperature formed diffusion strengthened layer with Fe<sub>4</sub>N-monophasic nitride ( $\gamma'$ -phase). The content of nitrogen on structural components after nitriding was determined. It is revealed that modified surface differs by having greater magnitude of the surface imperfection.