

**INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL HEREDITY ON THE PROCESS
OF ION-PLASMA NITRIDING IN THE GLOW DISCHARGE OF TOOL STEEL R6M5**

*Ruslan Karimovich Vafin*¹, *Roman Sergeevich Esipov*^{1a},
*Aleksander Vladislavovich Asylbaev*¹, *Aleksey Alexandrovich Nikolaev*¹,
*Aleksey Andreevich Maslov*¹, *Kamil Nurullaevich Ramazanov*¹,
*Alexander Moiseevich Pesin*², *Denis Olegovich Pustovoytov*²

¹ Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076, Ufa, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38 Lenin st., 455000, Magnitogorsk, Russia

^a esromles@mail.ru

ABSTRACT

This paper presents the results of determining the effect of preliminary polishing on the structure and depth of the hardened layer after ion nitriding in the glow discharge. Dry electropolishing of the surface of high-speed steel P6M5 with subsequent ion nitriding in the glow discharge contributes to the intensification of diffusion processes and, as a consequence, an increase in the thickness of the diffusion layer with a decrease in the nitride zone due to increased adsorption activity of the surface. Measurement of microhardness showed that pre-polishing allows obtaining more uniform profile of microhardness distribution along the depth of the surface layer due to increased diffusion of nitrogen into the core of the sample. The application of dry electropolishing of the surface of high-speed steel P6M5 before ion nitriding in the glow discharge has prospects for application in the tool industry as an independent method of surface hardening and as a pretreatment before deposition of wear-resistant coating because it allows obtaining on the treated surface of a hardened layer with a smoother hardness gradient.

KEYWORDS

Ion nitriding; plasma; glow discharge; dry electropolishing; surface layer; wear resistance.

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ПРОЦЕСС
ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ Р6М5**

*Руслан Каримович Вафин*¹, *Роман Сергеевич Есипов*^{1a},
*Александр Владиславович Асылбаев*¹, *Алексей Александрович Николаев*¹,
*Алексей Андреевич Маслов*¹, *Камиль Нуруллаевич Рамазанов*¹,
*Александр Моисеевич Песин*², *Денис Олегович Пустовойтов*²

¹ Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди 32, 450076, Уфа, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, пр. Ленина, 38, 455000, Магнитогорск, Россия

^a esromles@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты определения влияния предварительного полирования на структуру и глубину упрочненного слоя после ионного азотирования в тлеющем разряде. Сухое электрополирование поверхности быстрорежущей стали Р6М5 при последующем ионном азотировании в тлеющем разряде способствует интенсификации диффузионных процессов и, как следствие, увеличению толщины диффузионного слоя при уменьшении нитридной зоны за счет повышения адсорбционной активности поверхности. Измерение микротвердости показало, что предварительное полирование позволяет получить более равномерный профиль распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя за счет повышения диффузии азота в сердцевину образца. Применение сухого электрополирования поверхности быстрорежущей стали Р6М5 перед ионным азотированием в тлеющем разряде имеет перспективу для применения в инструментальной промышленности как самостоятельный метод упрочнения поверхности, так и в качестве предварительной обработки перед осаждением износостойкого покрытия, поскольку позволяет получать на обработанной поверхности упрочненный слой с более плавным градиентом твердости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Ионное азотирование; плазма; тлеющий разряд; сухое электрополирование; поверхностный слой; износостойкость.

Введение

Плазменная химико-термическая обработка включает в себя несколько основных взаимосвязанных процессов, которые можно представить в виде отдельных стадий [1, 2]:

1) получение активных частиц – диссоциация и ионизация насыщающего элемента в результате превращений в газовой фазе;

2) доставка активизированных частиц к поверхности обрабатываемого металла (внешний массоперенос);

3) скопление атомов и ионов насыщающего элемента на поверхности металла (адсорбция), электронное взаимодействие этих ионов с металлом (хемосорбция) и внедрение их в металл (абсорбция), то есть массоперенос на границе металл – газовая среда;

4) перемещение внедренных атомов и ионов от поверхности вглубь металла (диффузия) – внутренний массоперенос, который возможен только при условии растворимости диффундирующего элемента в металле.

Процессы, протекающие на перечисленных стадиях, взаимосвязаны и комплексно влияют на эффективность химико-терми-

ческой обработки. Самые сложные из них, трудно поддающиеся исследованию, протекают на поверхности металла при его взаимодействии с диссоциированной и ионизированной газовой фазой. Однако именно они определяют формирование высокого градиента концентраций насыщающего элемента, что обеспечивает высокую интенсивность обработки. Скорость и механизм адсорбции и других видов сорбции определяются свойствами газовой плазмы, в составе которой находятся рабочие частицы. Поэтому процесс диффузионного насыщения находится в зависимости от свойств газовой плазмы, ее атомного и ионного состава и массопереноса активных частиц к обрабатываемой детали [1, 2].

В процессе химико-термической обработки для управления структурой и механическими свойствами получаемого поверхностного слоя обрабатываемых деталей поддерживаются и контролируются следующие основные параметры процесса обработки:

1) состав газовой среды – концентрация в ней газов, содержащих насыщающие эле-

менты (азот, углерод и т. п.), а также водород и, возможно, другие газы;

- 2) температура обработки;
- 3) длительность процесса обработки;
- 4) рабочее давление газов в реакторе;
- 5) основные параметры разряда, для зажигания плазмы;

б) степень диссоциации и ионизации рабочих газов;

7) энергия ионов и плотность ионного тока на поверхности детали.

Влияние перечисленных параметров на свойства упрочняющих слоев довольно ожидаемо. Состав упрочняющих слоев определяется составом материала исходной детали и составом газовой смеси. Температура обработки влияет на глубину и скорость диффузии атомов реактивного газа в деталь и на толщины слоя химического соединения с реактивным газом и диффузионной зоны при заданной длительности обработки и этим определяет производительность процесса [2, 3].

Большинство из перечисленных выше факторов взаимосвязаны. Так, состав газовой смеси влияет на напряжение зажигания разряда и, соответственно, энергию ионов, а изменение напряжения и плотности тока ограничивается допустимой температурой процесса обработки и давлением газовой среды. Технологические факторы находятся между собой в сложной и не всегда достаточно изученной зависимости. Поэтому применяемые в настоящее время технологические процессы химико-термической обработки основаны на эмпирических данных и экспериментальном подборе оптимальных режимов диффузионного насыщения [4]. Однако широко известно, что, помимо основных перечисленных факторов, на механические свойства и структуру материала после ионного азотирования оказывает влияние и качество поверхности металла. В ряде случаев из-за значительной шероховатости поверхности, наличия на ней загрязнений

и посторонних примесей, различной интенсивности диффузии в зернах и по их границам и других причин происходит образование азотированного слоя, неоднородного по физико-механическим характеристикам и не обладающего необходимыми свойствами [5, 6].

В работе [7] авторы провели исследование влияния шероховатости поверхности образцов из нержавеющей стали AISI-304, полученных различными методами механической обработки, на свойства формируемых слоев после плазменного азотирования (рис. 1).

В результате исследования авторы заключили, что шероховатость поверхности образцов до плазменного азотирования значительно влияет на свойства азотированного слоя. Зеркально полированные образцы показали самое большое увеличение твердости и глубины азотированного слоя (рис. 1) в результате плазменного азотирования по сравнению с более грубо подготовленными образцами. Они же показали наибольшее увеличение шероховатости, но, тем не менее, ее конечная величина меньше, чем у грубо подготовленных образцов [4, 7].

Поэтому, в современной промышленности используются традиционные методы полировки, такие как химическая, механохимическая и электрохимическая полировка и др., для достижения желаемых требований с точки зрения поверхностной шероховатости для повышения механических и эксплуатационных свойств деталей после ионного азотирования. Однако в зависимости от применяемых сред возможна коррозия и охрупчивание [8–12]. Чтобы избежать коррозии, возникающей из-за различных сред, используемых во время традиционных методов полировки, в этом исследовании использовался метод сухого электрополирования (СЭП), который заключается в переносе ионов металла посредством свободных твердых тел (рис. 2).

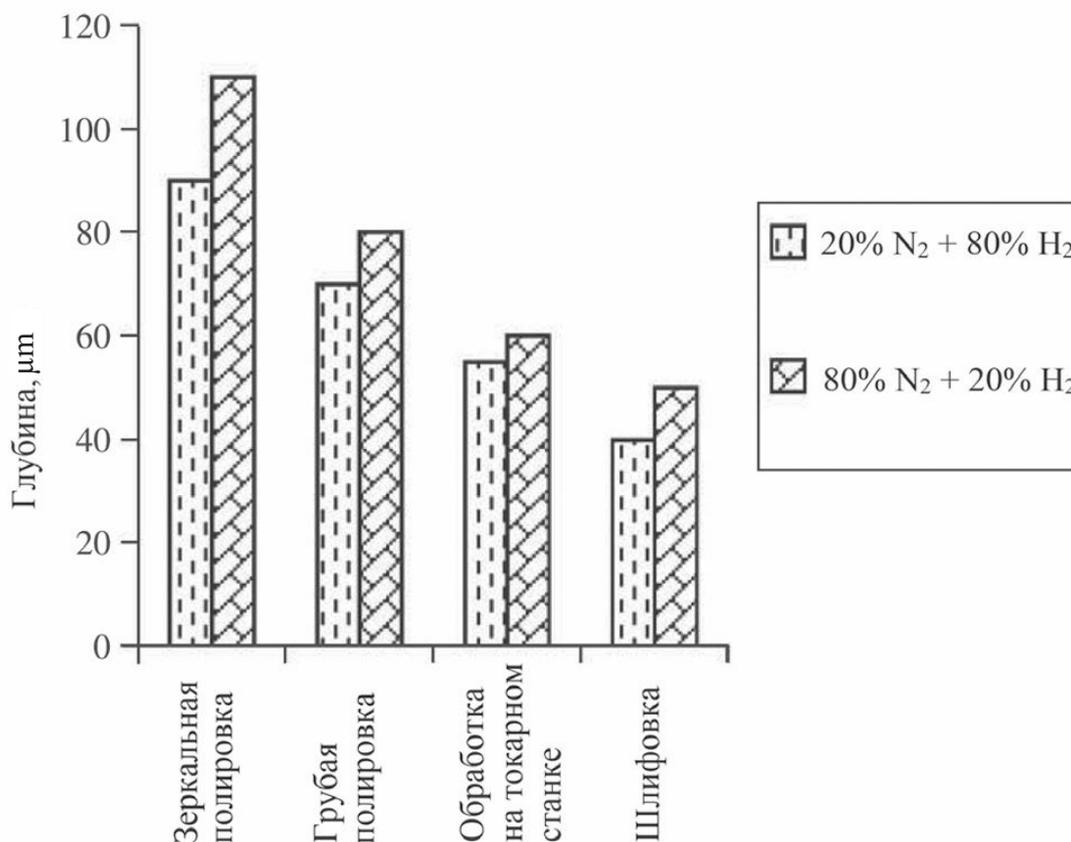


Рис. 1. Глубина плазменного азотирования образцов после различных методов механической обработки и в различных газовых смесях [7]

Fig. 1. Depth of plasma nitriding of samples after various methods of mechanical treatment and in various gas mixtures [7]

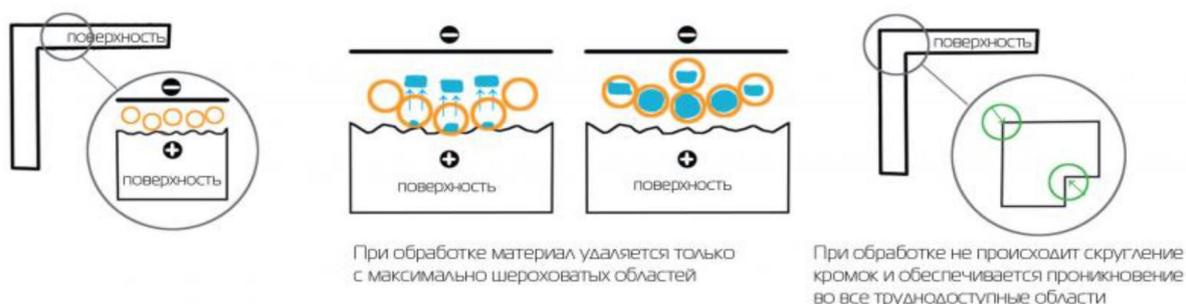


Рис. 2. Схема сухого электрополирования

Fig. 2. Dry electropolishing scheme

При СЭП электролитом служит не жидкость, а сухая смесь из сополимеров с макропористой структурой, которая позволяет удерживать их внутри нужных сред, улучшая электропроводность между ними. Обработка СЭП обеспечивает послойное удаление материала благодаря тому, что сферические

частицы электролита взаимодействуют только с пиками шероховатости, достигая выборочного сглаживания поверхности. В этом смысле данная технология позволяет достичь желаемой шероховатости за счет удаления минимального количества материала [8, 13, 14].

1. Методика исследований

Было проведено исследование влияния различных финишных обработок поверхности материалов перед проведением ионного азотирования на свойства получаемых слоев. Исследование проводилось на образцах из инструментальной стали Р6М5 в виде полу-

круга диаметром 30 мм и толщиной 3 мм. Поверхности образцов были обработаны двумя способами: шлифовка ($R_a = 0,091 \mu\text{m}$) и зеркальная полировка методом СЭП – сухое электрополирование ($R_a = 0,041 \mu\text{m}$) на установке DLyte100i. Профилограммы образцов представлены на рис. 3 и 4.

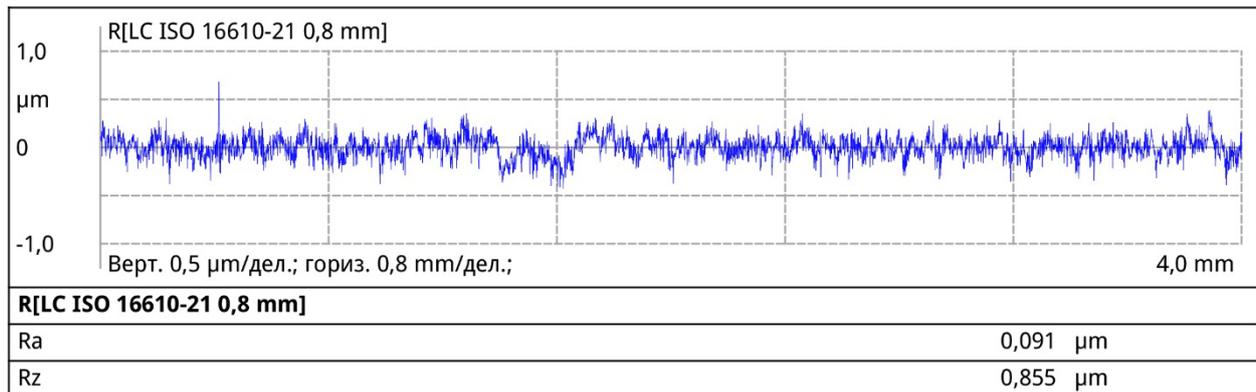


Рис. 3. Профиль сечения поверхности образца Р6М5 после шлифовки

Fig. 3. Surface cross-section profile of the R6M5 sample after grinding

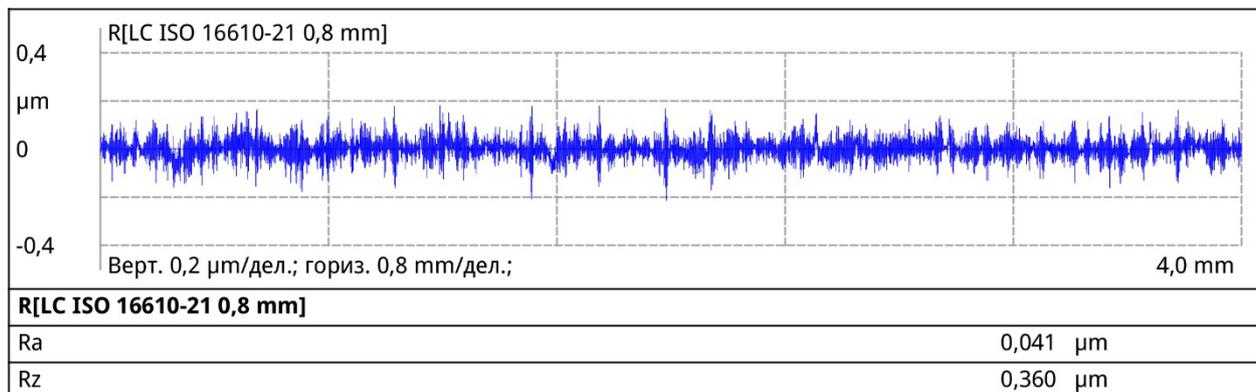


Рис. 4. Профиль сечения поверхности образца стали Р6М5 после сухого электрополирования

Fig. 4. Surface cross-section profile of R6M5 steel sample after dry electropolishing

Для процесса ионного азотирования использовалась модернизированная установка ЭЛУ-5М, переоборудованная для проведения плазменных процессов в тлеющем разряде. Рабочую область вакуумной камеры установки и образцы перед началом проведения ионного азотирования подвергали очистке ионным распылением в среде инертного газа аргона при давлении $p = 10 \dots 40 \text{ Па}$ в течение 15 минут для удаления поверхностных за-

грязней, таких как адсорбированные пары воды, растворителей и т.п.

После завершения ионной очистки в камеру подавалась смесь газов $\text{Ar}:\text{N}_2:\text{H}_2 = 50:35:15$. Ионное азотирование проводили при рабочем давлении смеси 300 Па и температуре 500 °С в течение 6 ч. По окончании процесса обработки образцы охлаждались в камере установки в рабочей смеси газов в течение 2 часов для избегания

формирования окислов на поверхности образцов.

При проведении исследований свойств полученных слоев образцов до и после экспериментов использовались стандартные методики исследований: метод Виккерса – для определения микротвердости поверхности образцов и их слоев; оптическая металлография – для анализа структуры полученных слоев на образцах; растровая электронная микроскопия – для анализа распределения элементного состава по глубине слоев образцов; профилометрия – для измерения профиля сечения поверхности и оценки ее шероховатости.

Точность распределения микротвердости до 1...5 мкм достигалась измерением микротвердости на косых шлифах образцов с углом наклона $\sim 6^\circ$. Достоверность результатов достигалась измерением микротвердости по трем областям каждого образца до значений основы. Глубина упрочненного слоя определялась по кривым распределения микротвердости до значений основы. Анализ структуры образцов осуществлялся на косых

шлифах, которые были отшлифованы абразивными кругами с постепенным снижением зернистости в плоскости перпендикулярной оси круглых форм и отполированы алмазной суспензией. Для детального анализа структуры на полученных шлифах образцов создавался оптический контраст химическим травлением в 4%-ном растворе азотной кислоты в этаноле в течение 10 мин. Для анализа элементного состава слоев применялся рентгеноспектральный микроанализ, по которому детектировалось характеристическое рентгеновское излучение вещества, возникающее при облучении поверхности образцов электронами.

2. Результаты и их обсуждение

Результаты измерения микротвердости были сведены в графическом представлении (рис. 5) по средним арифметическим значениям с трех областей. Результаты оптической металлографии и растровой электронной микроскопии представлены в виде снимков и сопутствующих графиков (рис. 6–8).

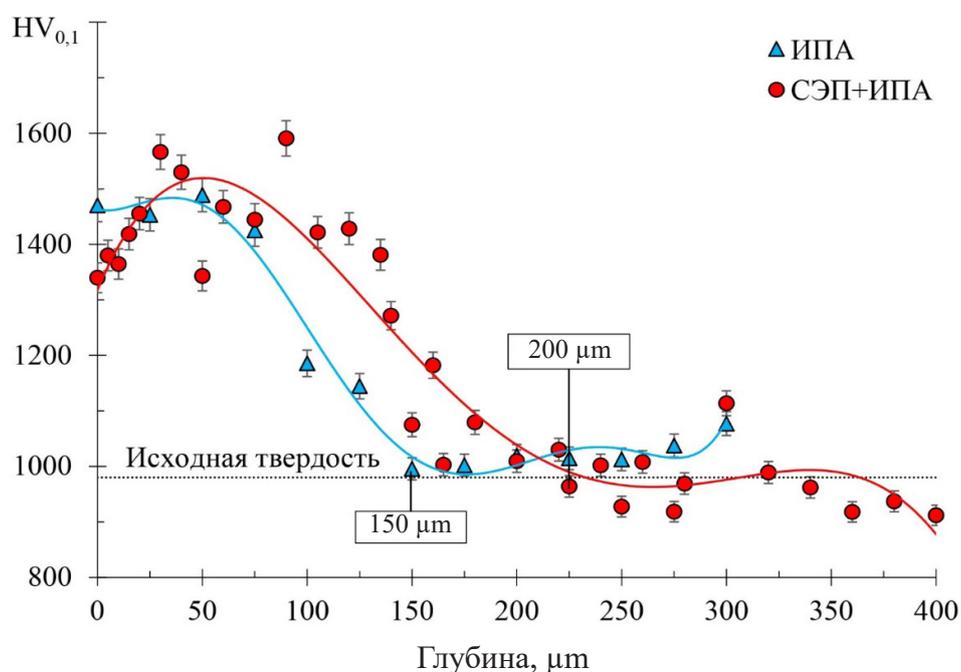


Рис. 5. График распределения микротвердости по глубине от поверхности образцов из стали Р6М5, после ИПА в течение 6 ч при 450 °С

Fig. 5. Graph of microhardness distribution by depth from the surface of R6M5 steel samples after IPN for 6 hours at 450 °C

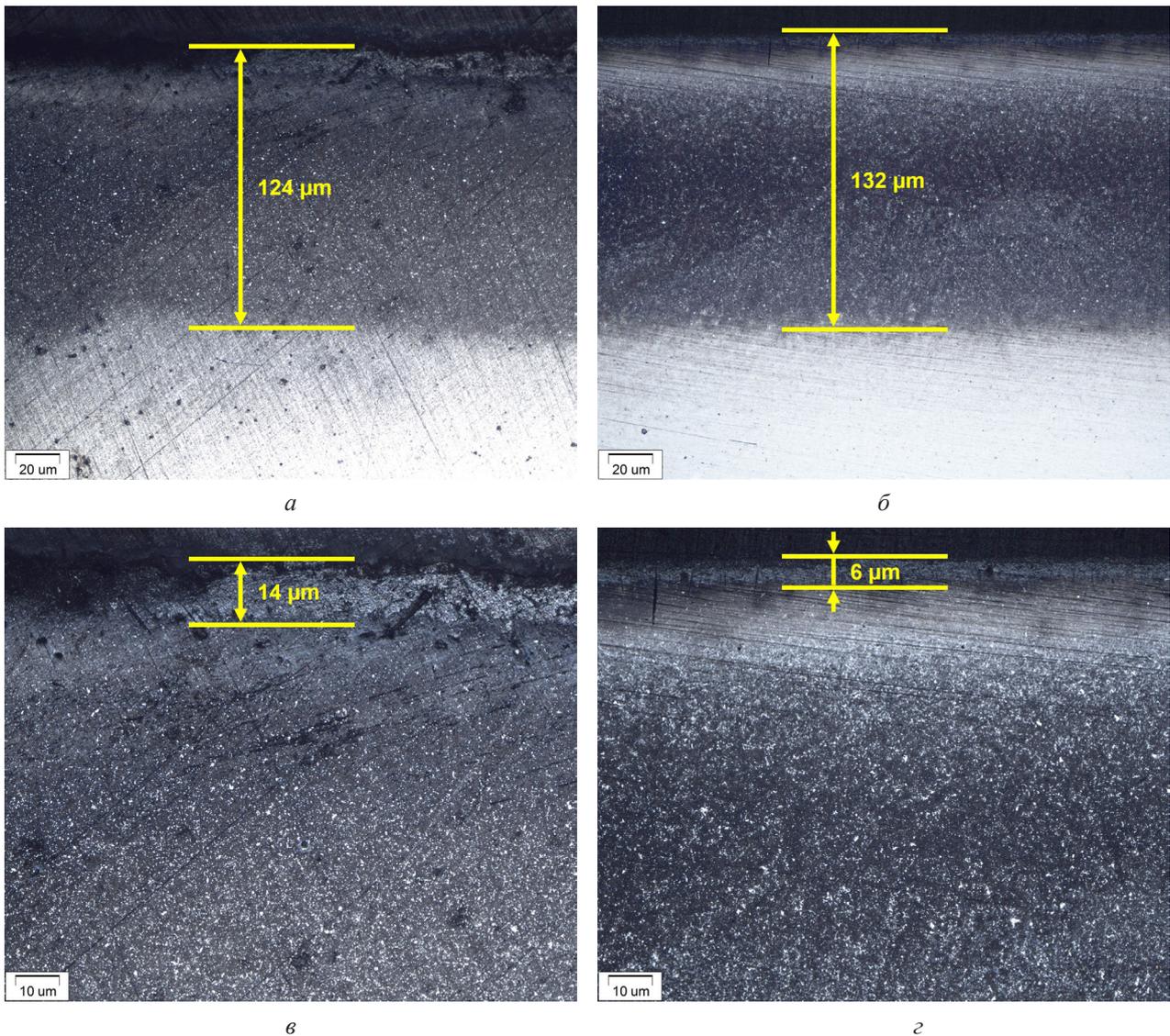


Рис. 6. Снимки микроструктуры образцов после ИПА (а, в) и после ИПА с предварительным СЭП (б, г)

Fig. 6. Microstructure images of samples after IPN (а, в) and after IPN with preliminary DEP (б, г)

Из полученных данных измерения микротвердости видно, что использование сухого электрополирования перед ионным азотированием позволяет повысить толщину упрочненного слоя на 30%. Помимо этого, СЭП способствует увеличению приповерхностной зоны с высоким значением микротвердости (выше $1300 \text{ HV}_{0,1}$) в 2 раза. Полученный результат свидетельствует о том, что качество обрабатываемой поверхности играет немалую роль в диффузионных процессах при плазменных процессах обработки.

На рис. 6 представлены оптические снимки микроструктуры образцов в исходном состоянии и после СЭП с последующим ионным азотированием.

Из анализа микроструктуры видно, что финишная обработка, проводимая перед ионным азотированием, практически не оказала влияние на азотированный слой – значения толщин азотированного слоя на обоих образцах идентичны. Однако на образце, прошедшем предварительную обработку СЭП, толщина нитридного слоя составляет около

6 мкм, а на образце, прошедшем механическую шлифовку, толщина составляет около 14 мкм (рис. 6, в, з). При этом, на образце, прошедшем СЭП, наблюдается более сплошной нитридный слой и равномерная диффузионная зона.

Интерпретация полученных данных дает основания для вывода, что в результате уменьшения шероховатости увеличивается поверхностная энергия стали Р6М5. Данный вывод согласуется с результатами исследования изменения поверхностной энергии для стали и меди [15]. В приведенной работе авторы установили, что с ростом шероховатости дисперсная составляющая поверхностной энергии меди и стали практически не изменяется, а изменяется только полярная составляющая. В свою очередь, увеличение поверхностной энергии способствует повышению адсорбции и градиента концентрации азота от приповерхностной зоны вглубь материала, что приводит к образованию равномерной диффузионной зоны толщиной около 132 мкм на образце, прошедшем СЭП. Также анализ результатов показал, что, кроме

поверхностной энергии, на концентрацию азота в приповерхностной зоне значительное влияние оказывает микрорельеф поверхности. Таким образом, образование нитридной зоны большей толщины на образце, прошедшем предварительную механическую шлифовку, объясняется более высокой концентрацией азота в приповерхностном слое, поскольку имеющаяся грубая конфигурация микрорельефа в виде выступов и впадин увеличивает общую площадь поверхности адсорбции.

На рис. 7 представлены растровые изображения поверхностного слоя образцов в исходном состоянии и после СЭП с последующим ионным азотированием. На рис. 8 приведены результаты химического элементного анализа слоя.

Из полученных данных растровой электронной микроскопии видно, что толщины темных областей на РЭМ-снимках обоих образцов коррелируют со значениями толщин азотированного слоя, полученных после оптической металлографии и с результатами измерения микротвердости по глубине.

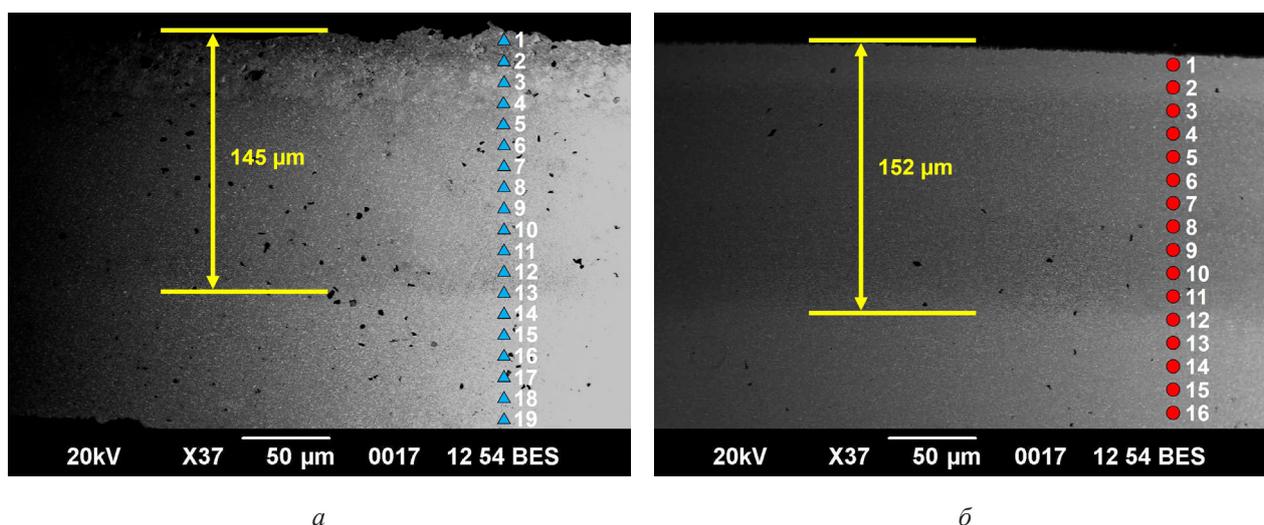


Рис. 7. РЭМ изображения образцов после ИПА (а) и после ИПА с предварительным СЭП (б)

Fig. 7. SEM images of samples after IPN (a) and after IPN with preliminary DEP (b)

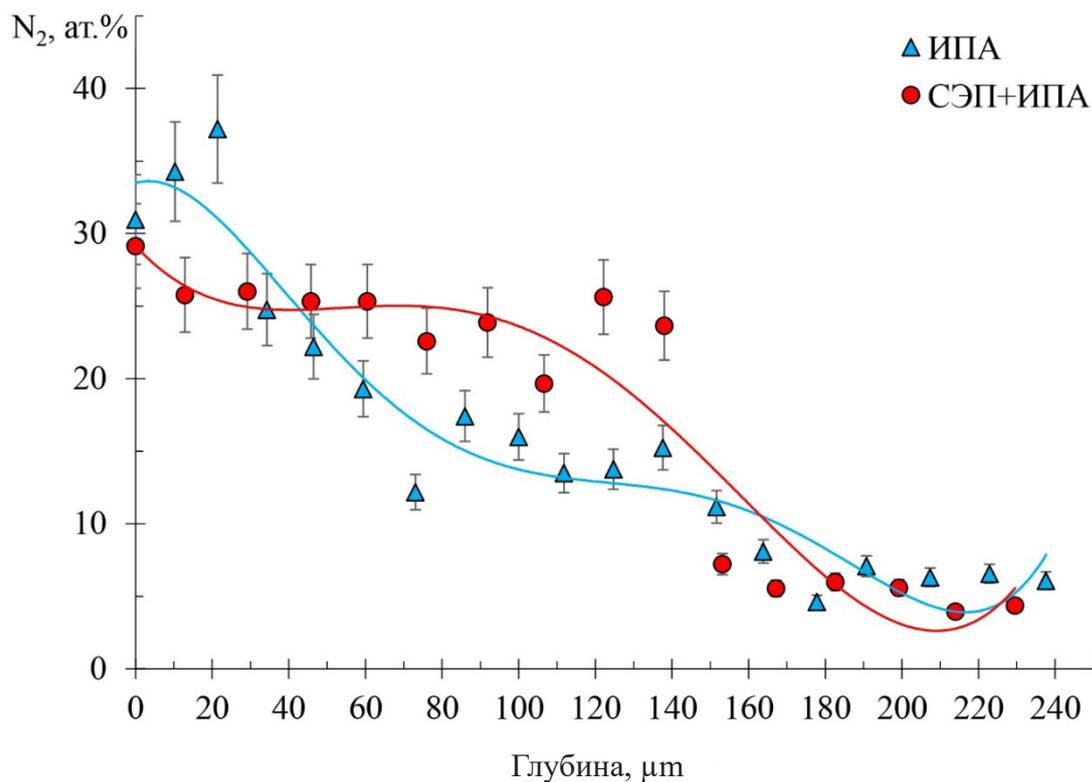


Рис. 8. Профиль распределения азота по глубине для образцов после ИПА и после ИПА с предварительным СЭП

Fig. 8. Nitrogen distribution profile by depth for samples after IPN and after IPN with preliminary DEP

Комплексный анализ всех полученных результатов исследований показал, что азотированный слой на обоих образцах состоит из двух зон: I – слой нитридов, II – диффузионный слой. В исходном состоянии более высокая твердость приповерхностной зоны толщиной около 15–18 мкм обусловлена образованием нитридов, о чем свидетельствует наличие в данной зоне достаточной для этого концентрации азота 32–34 ат.% N_2 . Высокая концентрация азота объясняется наличием грубого микрорельефа в виде выступов и впадин, которые способствуют образованию центров кристаллизации нитридных соединений в виде сплошного слоя. При этом скорость образования нитридов больше, чем диффузия азота вглубь материала. Таким образом, на образце, прошедшем предварительное механическое шлифование, форми-

руется нитридный слой, предположительно состоящий из смеси нитридов Fe_4N и азотистого твердого раствора $\alpha\text{-Fe}[\text{N}]$. Объемное содержание нитридов является преобладающим, что обуславливает более высокую твердость поверхности около 1400 HV [16].

На образце, прошедшем СЭП, также наблюдается образование двух зон: I – слой нитридов, II – диффузионный слой. Однако меньшая толщина нитридной зоны обусловлена меньшей концентрацией азота 28–29 ат.% N_2 , которая объясняется отсутствием грубого микрорельефа. В этом случае образование нитридов происходит в меньшей степени, что приводит к формированию более тонкого пластичного нитридного слоя толщиной около 5–6 мкм с твердостью около 1300 HV. При этом происходит эффективная диффузия вглубь материала, что приводит

к образованию более протяженной диффузионной зоны с относительно равномерной концентрацией азота.

Полученные данные позволяют спрогнозировать некоторые механические свойства азотированного слоя образцов. Упрочненный слой на образце, прошедшем механическое шлифование, имеет более низкую пластичность, поскольку профиль распределения твердости имеет характер крутой нисходящей кривой. Однако у упрочненного слоя на образце, прошедшем СЭП, пластичность относительно высокая, поскольку профиль распределения твердости имеет характер плавной нисходящей кривой.

Выводы

1. Сухое электрополирование поверхности стали Р6М5 при последующем ионном азотировании в тлеющем разряде способствует интенсификации диффузионных процессов с последующим увеличением толщины диффузионного слоя при уменьшении нитридной зоны за счет повышения адсорбционной активности поверхности.

2. Сухое электрополирование поверхности стали Р6М5 позволяет получить более равномерный профиль распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя за счет повышения диффузии азота в сердцевину образца.

3. Применение сухого электрополирования поверхности стали Р6М5 перед ионным азотированием в тлеющем разряде имеет перспективу для применения в инструментальной промышленности, поскольку позволяет получать на обработанной поверхности упрочненный слой с более плавным градиентом твердости.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания № FEUE-2023-0006 «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении дета-

лей для авиакосмической и транспортной техники». Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра коллективного пользования научным оборудованием «Нанотех» Уфимского государственного университета науки и технологий за помощь в проведении инструментального анализа.

The research was carried out under the financial support of the state assignment No. FEUE-2023-0006 “Research of physicochemical and mechanical processes in shaping and hardening of parts for aerospace and transport equipment”. Authors are grateful to the personnel of the Research Equipment Sharing Center “Nanotech” of Ufa University of Science and Technology for their assistance with instrumental analysis.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arzamasov B.N., Bratukhin A.G., Eliseev Yu.S., Panayoti T.A. Ionic chemical and thermal treatment of alloys: Monograph. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 1999. 400 p. (In Russian) [Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов: Монография. М.: Изд. МГТУ им Баумана, 1999. 400 с.].
2. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G., Bemer Z. Theory and technology of nitriding: Monograph. Moscow: Metallurgy, 1991. 320 p. (In Russian) [Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г., Бемер З. Теория и технология азотирования: Монография. М.: Металлургия, 1991. 320 с.].
3. Hosseini S. R., Ashrafzadeh F. Accurate measurement and evaluation of the nitrogen depth profile in plasma nitrided iron // Vacuum. 83(9), 1174–1178 (2009). DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.03.006
4. Berlin E.V., Koval N.N., Seidman L.A. Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel parts. Moscow: Tekhnosfera, 2012. 464 p. (In Russian) [Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М.: Техносфера, 2012. 464с.].
5. Krioni N.K., Mingazheva A.A., Mingazhev A.D. Increasing the Wear Resistance of Structural Steel Parts by Ion Nitriding during Complex Surface Preparation Using the Dry Electropolishing Method // Journal of Friction and Wear. 45(4), 217–222 (2024). DOI: 10.3103/S1068366624700326

6. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Fundamentals of friction and wear calculations: Monograph. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 526 p. (In Russian) [Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ: монография. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.].
7. Singh G.P., Alphonsa J., Barhai P.K., Rayjada P.A., Raole P.M., Mukherjee S. Effect of surface roughness on the properties of the layer formed on AISI 304 stainless steel after plasma nitriding // *Surface and Coatings Technology*. 200(20–21), 5807–5811 (2006). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.149
8. Riu G., Weil D., Llanes L., Johanns K.E., Oliver W.C., Roa J.J. Surface integrity of new dry-electropolishing technology on WC-Co cemented carbides // *Procedia CIRP*. 108, 543–548 (2022). DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.085
9. Engqvist H., Beste U., Axén N. The influence of pH on sliding wear of WC-based materials // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 18(2–3), 103–109 (2000). DOI: 10.1016/S0263-4368(00)00007-X
10. Pugsley V.A., Sockel H.G. Corrosion fatigue of cemented carbide cutting tool materials // *Materials Science and Engineering: A*. 366(1), 87–95 (2004). DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.057
11. Human A.M., Exner H.E. The relationship between electrochemical behaviour and in-service corrosion of WC based cemented carbides // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 15(1–3), 65–71 (1997). DOI: 10.1016/S0263-4368(96)00014-5
12. Zhang L., Chen Yi, Wan Q., Liu T., Zhu J., Tian W. Electrochemical corrosion behaviors of straight WC-Co alloys: Exclusive variation in grain sizes and aggressive media // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 57, 70–77 (2016). DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.02.009
13. Riu G., Roa J. J. Small-scale mechanical response at intermediate/high temperature of 3D printed WC-Co // *Procedia CIRP*. 108, 507–512 (2022). DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.079
14. García J., Cipres V.C., Blomqvist A., Kaplan B. Cemented carbide microstructures: a review // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 80, 40–68 (2019). DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004
15. Islamova A.G., Feoktistov D.V., Orlova E.G. Effect of roughness on surface energy and wettability of copper and steel surfaces // *Bulletin of Tyumen State University. Series: Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*. 7(1, 25), 60–78 (2021). (In Russian) [Исламова А.Г., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Влияние шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость поверхностей меди и стали // *Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 7(1, 25), 60–78 (2021)]. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78.
16. Rakhadilov B.K., Skakov M.K., Batyrbekov E.G., Scheffler M., Manapbaeva A.B. Evolution of the surface layer in R6M5 high speed steel after electrolytic-plasma nitriding // *The Journal of the Open Systems Evolution Problems*. 16(1), 20–28 (2014). (In Russian) [Эволюция структуры поверхностного слоя быстрорежущей стали Р6М5 при электролитно-плазменном азотировании // *Журнал проблем эволюции открытых систем*. 16(1), 20–28 (2014)].