

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ НА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАХ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Исаев Дониёр Тошботирович

Навоийский государственный горно-технологический университет, PhD, доцент, doniyor_isayev@mail.ru

Жураев Нодирбек Нормуродович

Навоийский государственный горно-технологический университет, PhD, доцент, Nodirjura@mail.ru

Эрмаматова Рухшона Эркин қизи

Навоийский государственный горно-технологический университет, студент, doniyor_isayev@mail.ru

Очилов Зойирдон Туйназар уғли

Навоийский государственный горно-технологический университет, студент, zoyirochelov@gmail.com

Аннотация. Исследуется влияние азотирования и электронно-лучевого легирования на быстрорежущие стали, включая вакуумно-дуговой разряд и нанесение износостойких покрытий. Анализируются изменения в микроструктуре стали, а также улучшение её механических свойств, таких как твердость, износостойкость и коррозионная стойкость, после применения этих технологий. Результаты показывают значительное улучшение структуры приповерхностного слоя, что способствует увеличению твердости и повышению износостойкости инструмента. В частности, азотирование в плазме вакуумно-дугового разряда и электронно-лучевое легирование обеспечивают формирование прочных, термостойких и устойчивых к абразивному износу слоев. Эти технологии позволяют значительно повысить долговечность инструментов, что особенно важно при обработке жаропрочных и высокопрочных материалов, требующих высокой точности и надежности обработки.

Abstract. The influence of nitriding and electron-beam alloying on high-speed steels is investigated, including vacuum-arc discharge and the application of wear-resistant coatings. The changes in the microstructure of the steel, as well as improvements in its mechanical properties such as hardness, wear resistance, and corrosion resistance, after applying these technologies are analyzed. The results show a significant improvement in the surface layer structure, leading to increased hardness and enhanced wear resistance of the tool. Specifically, nitriding in vacuum-arc discharge plasma and electron-beam alloying lead to the formation of strong, thermally stable, and abrasion-resistant layers. These technologies significantly increase the longevity of tools, which is especially important when machining heat-resistant and high-strength materials that require high precision and reliability.

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda azotlash va elektron-nurli legirlashning tez kesuvchi po'latlarga ta'siri o'rganiladi, bu jarayon vakuum-yoy razryadi va ishqalanishga chidamli qoplamalarni qo'llashni ham o'z ichiga oladi. Po'latning mikrostrukturasiidagi o'zgarishlar hamda uning mexanik xususiyatlari, jumladan, qattqlik, ishqalanishga chidamlilik va korroziyaga chidamlilik kabi xususiyatlarning ushbu texnologiyalar qo'llanganidan keyin yaxshilanishi tahlil qilinadi. Natijalar shundan dalolat beradiki, yuzaga yaqin qavatning strukturasi sezilarli darajada yaxshilanadi, bu esa po'latning qattqligini oshirish va ishqalanishga chidamliligini kuchaytirishga yordam beradi. Xususan, vakuum-yoy razryadi plazmasidagi azotlash va elektron-nurli legirlash kuchli, issiqlikka chidamli va abraziv ishqalanishga bardoshli

TEKNOLOGIYA

qavatlarni shakllantirishni ta'minlaydi. Bu texnologiyalar asboblarning xizmat muddatini sezilarli darajada uzaytirish imkonini beradi, bu esa ayniqsa yuqori haroratga chidamli va yuqori mustahkamlikka ega materiallarni ishlashda, yuqori aniqlik va ishonchlilik talab etilganda alohida ahamiyat kasb etadi.

Ключевые слова: азотирование, электронно-лучевое легирование, быстрорежущие стали, вакуумно-дуговой разряд, износостойкость, твердость, поверхностное упрочнение, микротвердость, жаропрочные материалы, комплексная обработка.

Key words: nitriding, electron beam alloying, high-speed steels, vacuum-arc discharge, wear resistance, hardness, surface hardening, microhardness, heat-resistant materials, complex processing.

Kalit so'zlar: azotlash, elektron nurli legirlash, tez-kislar po'latlar, vakuum-yoyli razryad, yiyelishga bardoshlik, qattiqlik, sirt qotib qolish, mikroqattiqlik, issiqlikka chidamli materiallar, kompleks ishlov berish.

ВЕДЕНИЕ

Азотирование представляет собой процесс термической обработки, в ходе которого азот проникает в поверхностные слои металла, образуя твердые растворы нитридов. Современные методы, такие как вакуумно-дуговой разряд, значительно способствуют улучшению структуры азотированных слоев, обеспечивая их большую толщину и твердость, что особенно важно для быстрорежущих инструментов. При этом критически важным является обеспечение прочной адгезионной связи между азотированным слоем и матрицей инструмента. Это гарантирует высокую стойкость инструмента в процессе эксплуатации. Значительное внимание уделяется исследованию закономерностей формирования приповерхностных слоев быстрорежущих сталей при их азотировании в плазме тлеющего разряда. Множество работ охватывает этот процесс, описывая его особенности и влияние на эксплуатационные характеристики [1,2].

Однако азотирование в газовой плазме двухступенчатого вакуумно-дугового разряда остается недостаточно изученной областью. В условиях вакуумно-дугового разряда можно эффективно управлять технологическими параметрами, что позволяет контролировать фазовый состав, толщину и микротвердость приповерхностного слоя. Эти характеристики оказывают непосредственное влияние на долговечность и работоспособность инструмента.

Актуальность данного исследования определяется потребностью в повышении долговечности быстрорежущих инструментов, используемых для обработки жаропрочных сплавов. В этом контексте азотирование, а также нанесение износостойких покрытий играют ключевую роль в улучшении износостойкости и общей производительности инструмента. С целью повышения их эффективности важным аспектом является анализ структуры приповерхностного модифицированного слоя, который формируется в процессе азотирования и нанесения покрытий. Этот слой должен сочетать в себе оптимальную твердость, устойчивость к износу и высокую прочность адгезионной связи с основным материалом инструмента. Целью настоящей работы является улучшение стойкости быстрорежущих инструментов путем комплексного упрочнения, которое включает азотирование и нанесение износостойких покрытий. Это позволит не только повысить прочностные характеристики инструментов, но и увеличить их срок службы при работе с трудносвариваемыми и жаропрочными материалами. Научная новизна работы заключается в разработке комбинированного процесса обработки быстрорежущих сталей, который включает вакуумно-дуговой разряд и легирование электронным пучком. Этот подход позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики инструментов, обеспечивая оптимизацию структуры приповерхностного

офицированного слоя и, как следствие, повышение их стойкости и долговечности в условиях сложных рабочих нагрузок.

Методология исследования

Эксперимент проводился на образцах из стали Р6М5, которые подвергались обработке с помощью электронного пучка и легирования различными материалами. На поверхность азотированного образца воздействовали импульсами НЭСП с плотностью энергии 4.5 Дж/см² и длительностью 5 мкс. На рис.1а продемонстрировано воздействие серии импульсов НЭСП с плотностью энергии 4.5 Дж/см² длительностью 5 мкс на поверхность азотированного образца из стали Р6М5. Теплового воздействия пучка электронов достаточно, чтобы верхний слой металла не только расплавился, но и начал активно испаряться, обнажая карбидную составляющую [3,6].

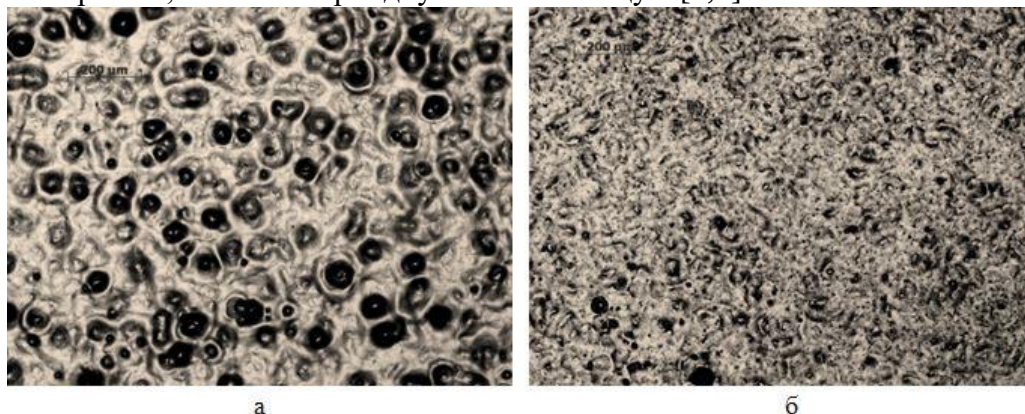


Рис.1 а) Структура поверхности азотированной быстрорежущей стали Р6М5 после воздействия НЭСП, б) То же после электронно-пучкового легирования цирконием.

- Также использовались пленки циркония (Zr) и сплавов, например, Nb70Hf22Ti8, нанесенные методом магнетронного распыления, для последующего электронно-лучевого легирования.
- Применялись методы рентгеноструктурного анализа и SEM (сканирующая электронная микроскопия) для изучения изменений в структуре поверхности образцов.
- Проводились испытания на износостойкость с резанием жаропрочного сплава ХН77ТЮР при определенных условиях (скорость резания, подача, глубина резания) [4,8].

Ход исследования

- После воздействия НЭСП на образцы стали Р6М5, наблюдались изменения в структуре: расплавление верхнего слоя, испарение материала и диссоциация нитридов железа.
- В результате легирования цирконием и последующего воздействия электронным пучком, происходила экзотермическая реакция, образующая нитридную фазу на поверхности и изменяющая структуру.
- Применение легирования различными элементами (цирконием, ниобием, гафнием) позволило значительно изменить глубину модифицированного слоя и его структуру.
- Для оценки эффективности обработок проводились испытания на микротвердость и износостойкость.

Теоретические основы эксперимента

Исходя из теории поверхностного упрочнения, импульсное воздействие электронного пучка вызывает нагрев и расплавление металла, что активирует физико-химические процессы, такие как образование нитридов. Образование нитридных фаз

(например, нитридов циркония и ниобия) улучшает износостойкость и теплостойкость приповерхностного слоя. После нанесения тонкой пленки циркония (Zr) на образцы с использованием метода магнетронного распыления, при толщине пленки около 0,2 мкм, и последующего воздействия электронным пучком, происходит инициирование экзотермических химических реакций, приводящих к образованию нитридной фазы. Формирование тугоплавкого нитридного слоя на поверхности значительно снижает степень испарения металла, а структура материала приобретает мелкодисперсный характер (см. рис. 1б). Подтверждением образования нитридной фазы служат результаты рентгеноструктурного анализа (рис. 2 в). Важно отметить, что в данном случае содержание остаточного аустенита в приповерхностном слое существенно уменьшается.

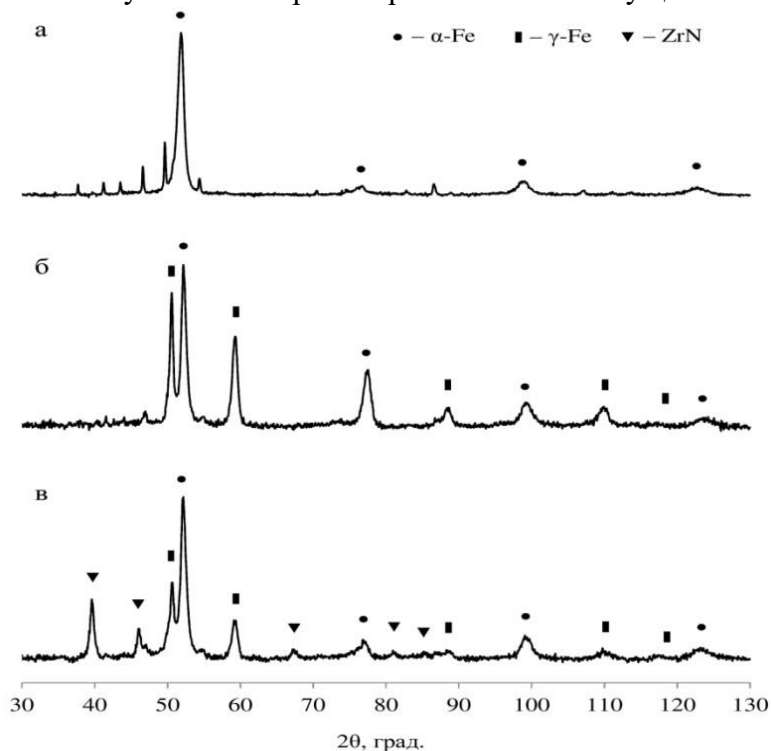


Рис.2. а) Дифрактограмма (CoK α) с поверхности образца азотированной стали Р6М5, б) то же после воздействия НЭСП, в) то же после нанесения на поверхность пленки Zr перед облучением.

В данном случае происходит деформационное упрочнение, вызванное упругой волной, генерируемой импульсным электронным лучом. Однако из-за короткой длительности процесса и тепловой инерции металла, нагрев, вызванный сжатием и трением, не влияет на поведение вещества. Основная роль принадлежит механическому активированию быстропротекающих физико-химических процессов, которые происходят как в жидкой, так и в твердой фазах. Появление расплава увеличивает межфазную поверхность и ускоряет реакцию образования нитридов, благодаря выделению энергии в экзотермической реакции. Множественное воздействие импульсов почти не изменяет микроструктуру. Для полного превращения достаточно 5-6 импульсов НЭСП (рис.3а). Распределение циркония вблизи поверхности представлено на рис.3б. Цирконий распределяется в приповерхностном слое толщиной около 2 мкм, а зона воздействия пучка составляет 5-6 мкм. Это способствует образованию быстро закаленных слоев с более мелкодисперсной структурой, улучшая характеристики поверхности. При последующем нанесении износостойкого покрытия и отпуске при 450°C содержание остаточного аустенита значительно уменьшается [5,7].

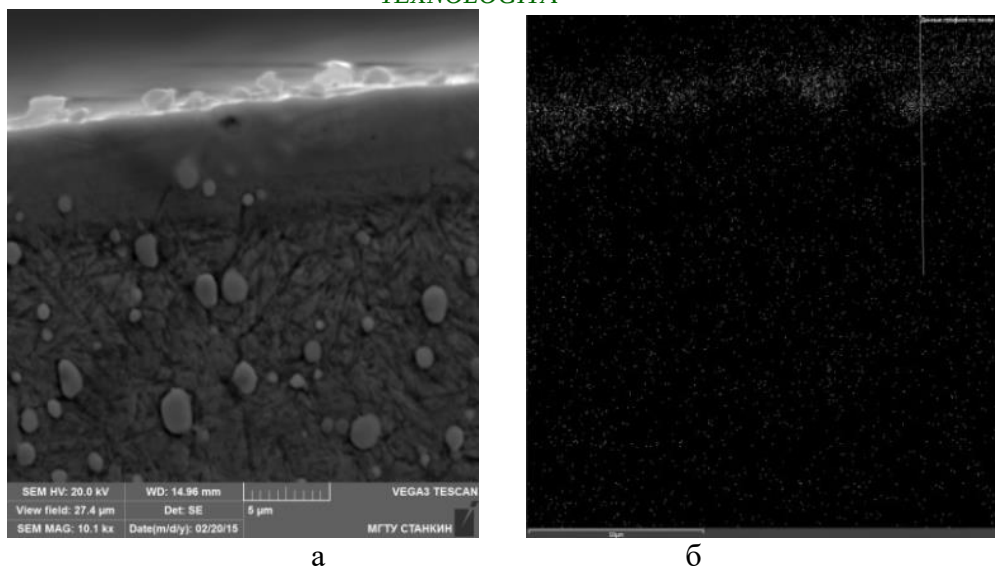


Рис.3. Модифицированный нитридом циркония приповерхностный слой быстрорежущей стали Р6М5. а) SEM изображение протравленного шлифа, б) карта распределения циркония по шлифу.

При облучении ниобиевым сплавом, нанесенным на поверхность металла, на дифрактограмме (рис.3) появляются отражения, свидетельствующие о формировании нитридной фазы. SEM-изображение (рис.4) показывает, что ниобий и гафний равномерно распределяются по глубине приповерхностного слоя до 10 мкм (рис.5б), что связано с более высокой температурой перемешивания металлов в зоне плавления по сравнению с цирконием.

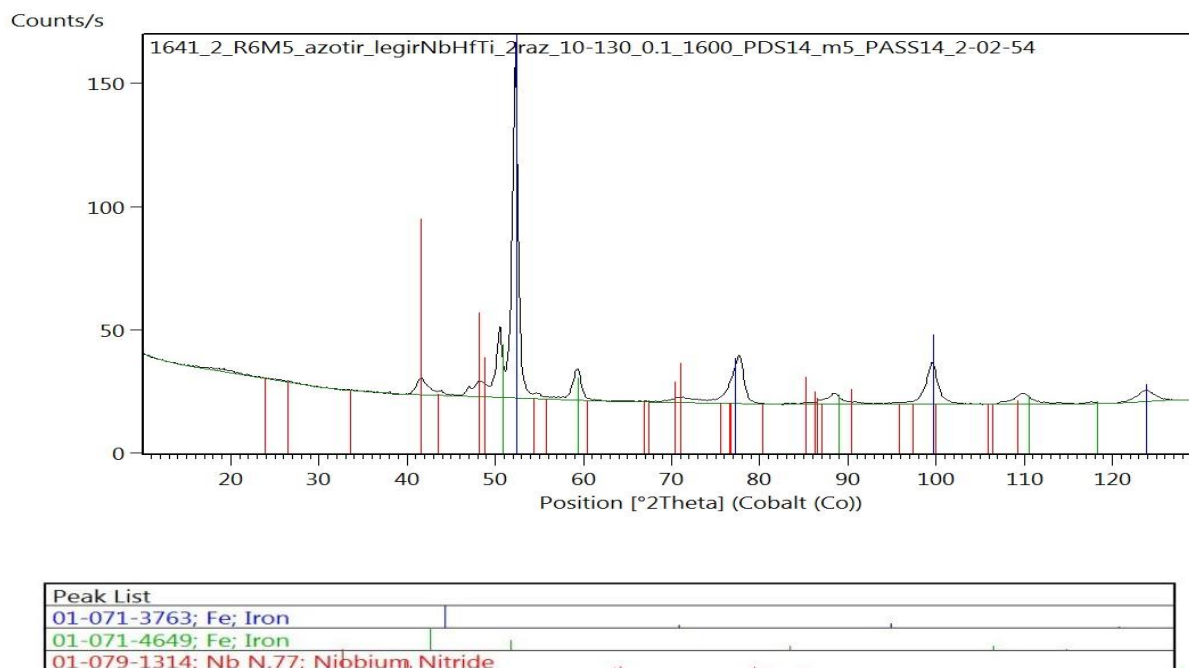


Рис.4 Дифрактограмма (CoKα) с поверхности образца азотированной стали Р6М5 после нанесения на поверхность пленки сплава NbHfTi перед облучением

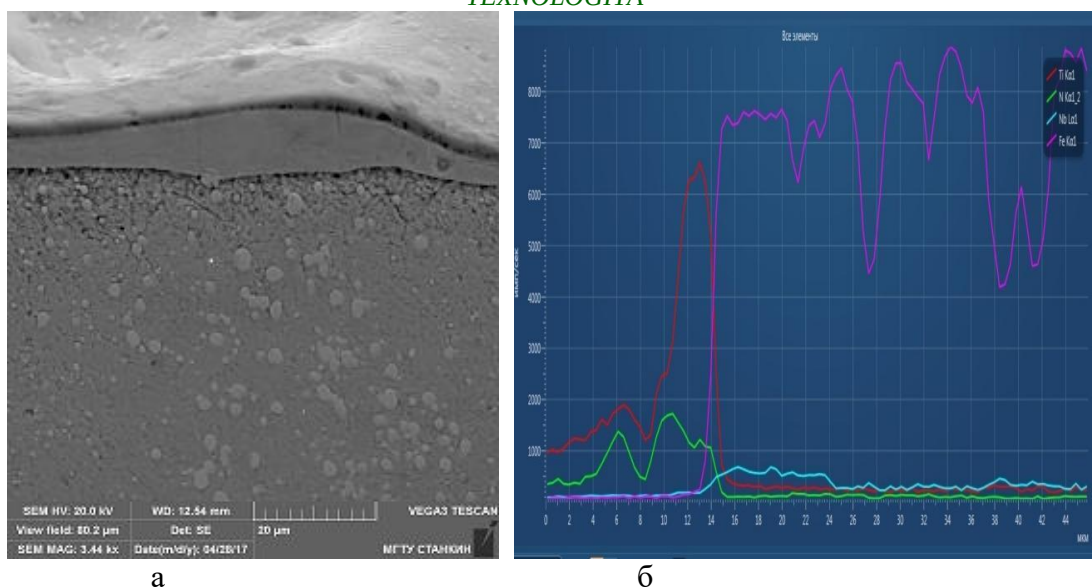


Рис.5 Образец из стали Р6М5 после комплексной поверхностной обработки: ионное азотирование + микролегирование сплавов Nb70Hf22Ti8 + износостойкое покрытие nATCRo3, а) SEM изображение, б) распределение некоторых химических элементов в приповерхностном слое.

Измерение микротвердости на поперечном шлифе показало наличие упрочненной зоны глубиной до 80 мкм. (рис. 6)

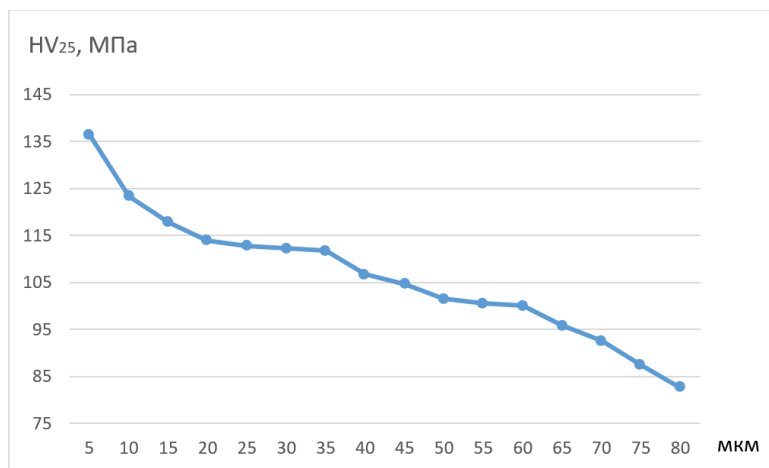


Рис.6 Микротвердость на поперечном шлифе

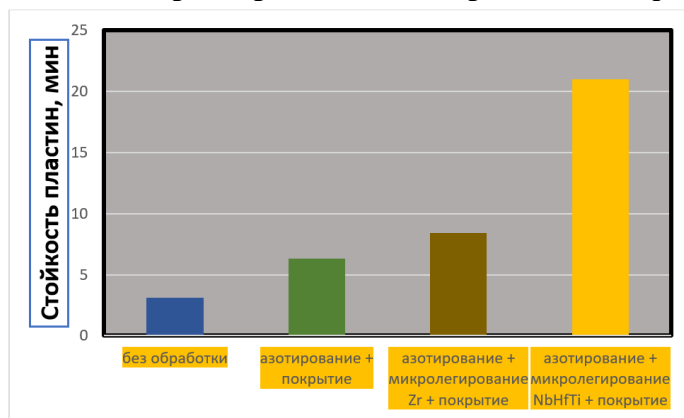


Рис.7 Стойкость пластин с комплексной поверхностной обработкой (мин).

Проведенные исследования по изнашиванию пластин из стали Р6М5 показали, что электронно-лучевое легирование в сочетании с операцией нанесения износостойкого покрытия может оказывать существенное влияние на процесс изнашивания инструмента. Стойкостные испытания проводились на операции точения жаропрочного сплава при скорости резания $v=10\text{ м/мин}$, подаче $s=0.115\text{ мм/об}$, глубине резания $t=1\text{ мм}$. В качестве критерия отказа была выбрана величина износа по задней поверхности 0.3 мм . Результаты испытаний приведены на рис.7.

Замедленное изнашивание по задней поверхности на инструменте с комбинированной обработкой, которая представляет собой ионное азотирование на глубину около 40 мкм и последующее нанесение износостойкого покрытия, можно объяснить тем, что приповерхностный слой, созданный под покрытием, имеет повышенную твердость в сочетании с более высокой теплостойкостью и лучше сопротивляется микропластическим деформациям (рис.9). Повышается формоустойчивость режущего клина, что снижает уровень внутренних напряжений в износостойком покрытии.

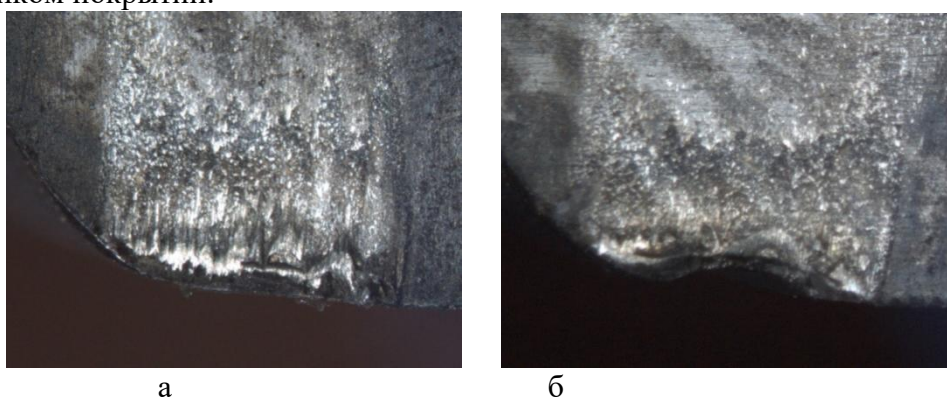


Рис.8. Изнашивание пластины из стали Р6М5 при точении сплава ХН77ТЮР, $v = 10\text{ м/мин}$, $s = 0.115\text{ мм/об}$, $t=1\text{ мм}$, а) после 1 мин., б) после 3 мин резания.

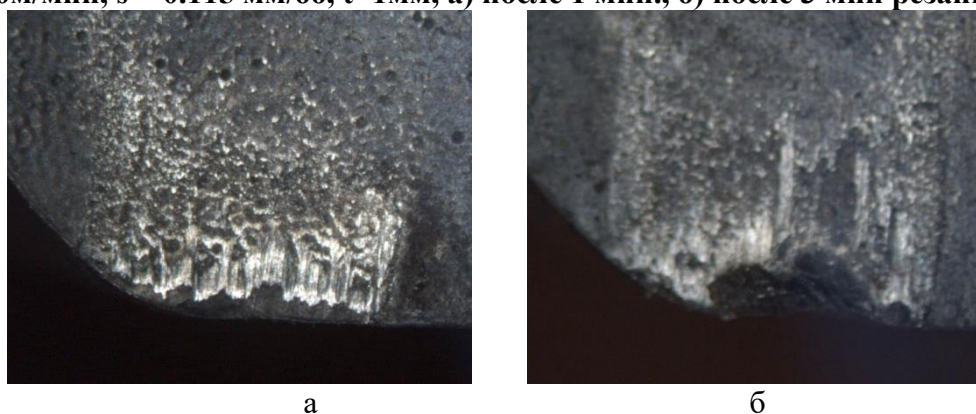


Рис.9. Изнашивание пластины из стали Р6М5 (азотирование + покрытие) при точении жаропрочного сплава, $v = 10\text{ м/мин}$, $s = 0.115\text{ мм/об}$, $t=1\text{ мм}$, а) после 3 мин., б) после 6 мин резания.

Следует отметить, что время обработки инструмента микролегированием составляет около 15 минут без учета времени вакуумирования рабочей камеры, что определяет невысокую стоимость процесса и позволяет обеспечить полную загрузку промышленной машины для нанесения износостойких покрытий среднего размера с длительностью рабочего цикла 4 – 5 часов при помощи одной установки для поверхностного легирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Комбинированная обработка быстрорежущих сталей, включающая ионное азотирование и электронно-лучевое легирование, значительно улучшает механические свойства приповерхностного слоя.

- Легирование цирконием и ниобиево-гафниевыми сплавами оказывает различное влияние на глубину и характер модификации слоя, с лучшими результатами для сплавов NbHfTi.

- После обработки образуются высококачественные нитридные фазы, что снижает испарение материала и повышает износостойкость.

- Микротвердость упрочненной зоны увеличивается, что подтверждает эффективность обработки.

- Комбинированная обработка существенно снижает износ инструмента при резании жаропрочных сплавов и продлевает срок службы инструмента, обеспечивая высокую теплостойкость и защиту от микропластических деформаций.

Таким образом, результаты эксперимента демонстрируют значительное улучшение свойств быстрорежущих инструментов благодаря использованию комплекса обработок, что открывает новые возможности для повышения их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров, А. А., & Кузнецов, И. М. (2020). Влияние азотирования на износостойкость быстрорежущих сталей. *Журнал "Поверхность"*, 45(3), 56-64.

2. Петров, В. И., & Мельников, С. И. (2021). Исследование структуры приповерхностных слоев быстрорежущих сталей при азотировании в плазме. *Материалы и технологии*, 9(2), 98-105.

3. Иванов, М. В., & Коваленко, Н. П. (2022). Поверхностное модифицирование сталей методом азотирования и электронно-лучевого легирования. *Технология обработки материалов*, 17(1), 44-51.

4. Смирнов, А. И., & Зайцев, В. С. (2020). Модификация поверхностных слоев быстрорежущих инструментов методом плазменного азотирования. *Научные труды Сибирского государственного аэрокосмического университета*, 31(4), 123-128.

5. Волков, Д. Ю., & Степанов, В. В. (2019). Исследование влияния азотирования на механические свойства быстрорежущих сталей. *Техника и технологии обработки металлов*, 15(6), 77-84.

6. Равшанов Ж. Р. и Исаев Д.Т. Повышения износостойкости твёрдых сплавов методом нанесения износостойких покрытий //Инновационные научные исследования: теория, методология, практика. – 2018. – С. 50-52.

7. Исаев Д. Т. Методы воздействия электронных пучков на твердый сплав H13A //ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ НАУКА: СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ. – 2022. – С. 53-56.

8. Isaev D. T. et al. Integrated surface vacuum-plasma hardening of tools from high-alloyed quick-steel steel //International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS). – 2020. – T. 4. – №. 7. – С. 98.