

**ИНТЕРАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛЕЗВИЙ  
РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14632816>

**Шарипов Жамшид О  
Тураходжаев Нодир Дж  
Бакоева Шахноза Н.**

<sup>1</sup>*Бухарский инженерно-технологический институт, г.Бухара, улица  
К.Муртазаев, 15-дом, 200100*

<sup>2</sup>*Ташкентский государственный технический университет, г.Ташкент, улица  
И.Каримов, 21-дом, 259100*

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности структуры приповерхностного слоя быстрорежущей стали Р9, модифицированной азотированием, легированием поверхности низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком, и ее влияние на износостойкость инструмента при сухой резке труднообрабатываемого хрома и его сплавов. Одним из перспективных направлений упрочнения инструмента из быстрорежущей стали является создание на их поверхности слоистых структур с градиентом физико-химических свойств между износостойкими покрытиями и основным материалом. Среди методов такой модификации поверхности имеет место особый процесс, основанный на использовании импульсных пучков заряженных частиц высокой интенсивности. Обработка проводилась которая представляет собой комбинацию источника низкоэнергетических сильноточных электронных пучков "РИТМ" и двух систем магнетронного напыления на одной вакуумной камере. Преимущество этого устройства в том, что оно покрывает элементы Nb и Hf на поверхности режущего инструмента, нагревается до  $10^6$  град/с за 5 мкс, в результате чего два элемента диффундируют внутрь режущего инструмента. На основу усиленных режущих инструментов нанесено покрытие PLATIT п311 (TiAl)N. В результате устойчивость режущего инструмента повысилась в 3-4 раза. Исследование проведено на Навоийском машиностроительном заводе и сделаны выводы.

**Ключевые слова:** Быстрорежущий инструмент, азотирование, легирование, нанесения покрытия, износостойкость, твердый сплав, химико-термический обработка.

**ВВЕДЕНИЕ**

Несмотря на увеличивающееся из года в год использование инструментов из твердых сплавов, режущей керамики и сверхтвердых материалов, количество

быстрорежущих сталей, используемых в производстве металлообрабатывающего инструмента, несколько не уменьшается. Это происходит из-за особенностей его физико-механических свойств, а также условий резания. Использование современных быстрорежущих сталей с повышенной жаропрочностью, полученных методами порошковой металлургии, частично решает проблему интенсификации обработки; однако внедрение новых конструкционных материалов с повышенной жаропрочностью неизбежно предъявляет дополнительные требования к инструментальному материалу. В настоящее время широко используется инструмент из быстрорежущей стали с различными износостойкими покрытиями на основе нитридов тугоплавких металлов, полученных методом физического осаждения.

Высокий прогресс в машиностроении предъявляет всё более высокие требования к производительности и снижению себестоимости обработки. Появление новых обрабатываемых материалов, которые варьируются в широких пределах по сложности изготовления, составу материала, размерам и качеству конечной обработки, а также возрастание значения автоматического машиностроения и инновационных технологий привело к необходимости развития новых режущих инструментов и значительному улучшению их характеристик.

Однако следует отметить, что образующиеся в процессе ионного азотирования нитриды железа недостаточно термостабильны, и с целью предотвращения их термохимической диссоциации необходимо ограничивать температуру при нанесении износостойкого покрытия. Термостойкость приповерхностного слоя инструмента, непосредственно примыкающего к покрытию, может быть увеличена за счет дополнительного легирования поверхности нитридной быстрорежущей стали. Режущий инструмент наносят в виде покрытия, например, с помощью магнетронного напыления. После этого инициируется экзотермическая химическая реакция, которая проводится при тепловом взрыве за счет импульсного нагрева поверхности продукта. В этой статье представлены некоторые интересные составы, которые могут быть использованы для получения модифицированных поверхностных слоев рассмотренным здесь методом для увеличения долговечности инструментов, изготовленных из относительно быстрорежущей стали Р9 со средней жаропрочностью, при горизонтальной фрезерной обработке устойчивым, труднообрабатываемым хромовым сплавом 34ХН1МА.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В качестве режущего инструмента при фрезерной обработке использовались специально разработанные режущие дисковые фрезы с различными вариантами комбинированной поверхностной ионно-плазменной обработки (рис.1). Дисковые фрезы были изготовлены из быстрорежущей стали Р9 и подвергнуты стандартной термообработке в соляной ванне. Азотирование обработанных и отшлифованных режущих дисковых фрез проводили на установке типа АПП-2 производства с использованием двухступенчатого вакуумно-дугового газового разряда. Обработка

проводилась при температуре 480°C в течение 30-45 мин, что позволило создать на поверхности термохимически упрочненный слой толщиной до 40 мкм и микротвердостью до  $HV_{60}=120$  МПа. Финишное износостойкое покрытие (TiAl)N, (TiAl)N + ион-азотирование, (TiAl)N+ион-азотирование+ион-легирование(NbHf), с микротвердостью  $HV_{50}=350$  МПа наносили на установке  $\pi 311$  производства Platin. Это покрытие представляет собой комбинацию адгезионного слоя композиции, градиентного покрытия (TiAl)N.



Рис.1. Быстрорежущий Р6М5 дисковых фрез.

Двух и трехфазный слой покрытия с размером зерен (TiAl)N, (TiAl)N + ион-азотирование, (TiAl)N + ион-азотирование +ион-легирование(NbHf) до 5 нм, на границе которого расположена аморфная фаза  $Si_3N_4$ , подавляет коагуляцию зерен основной фазы как в процессе нанесения покрытия, так и в процессе работы инструмента. Межфазные границы, представляющие собой зоны интенсивного рассеивания энергии, отклоняют возникающие трещины от направления распространения, частично или полностью замедляя их. Режущие инструменты являются одним из важнейших элементов при обработке и влияют на точность изделия. Перед нанесением износостойкого покрытия часть образцов подвергалась приповерхностному легированию. Обработка проводилась которая представляет собой комбинацию источника низкоэнергетических сильноточных электронных пучков (НСЭП) «РИТМ» и двух систем магнетронного напыления на одной вакуумной камере [1, 2]. Устройство позволяет наносить пленки на поверхность желаемого продукта с последующим жидкофазным смешиванием материалов пленки и подложки с помощью интенсивного импульсного электронного луча. Генерация НСЭП включает в себя эмиссию электронов, формирование пучка в диоде с плазменным заполнением и его транспортировку в плазменном канале. Принятие такой схемы генерации позволяет получить пучок микросекундной длительности (около 5 мкс) с плотностью тока  $105 \text{ A/cm}^2$  при ускоряющем напряжении 15-30 кВт. При этом площадь разовой обработки составляет около  $50-100 \text{ cm}^2$ . Многофазная структура с использованием легирования в процессе экзотермических химических реакции, происходящей между металлом пленки и азотом, была получена путем нанесения тонкого слоя нитридообразующих элементов (использовались мишени из сплава  $Nb_{72}Hf_{28}$ ) на поверхность инструмента перед его обработкой электронным пучком [3,

4]. В качестве его доноров использовались нестабильные нитриды железа азотированной быстрорежущей стали. Внешний слой обогащен тугоплавкими нитридными фазами, которые из-за чрезвычайно высокой скорости охлаждения остаются небольшими и равномерно распределенными в конечном продукте. Глубина приповерхностного слоя, в котором получается модифицированная стальная структура, составляет 2–10 мм в зависимости от легирующего состава.

#### **Результаты и обсуждения**

В результате проведенного исследования установлено, что нагрузки на электродвигатель на холостом ходу и в рабочем состоянии вертикально-фрезерного станка при обработке фрезами с разными покрытиями и без покрытия при сравнении различны. Установлено, что по сравнению с фрезами без покрытия нагрузка на электродвигатель ниже, чем при измерении сложной обработки режущего инструмента амперметрами (рис.2.).

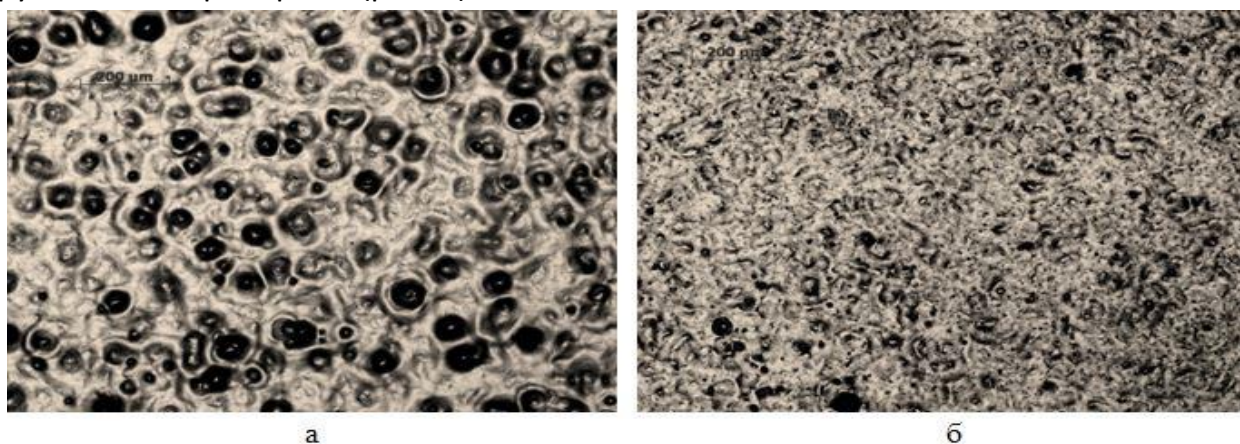


Рис.2 а) Структура поверхности азотированной быстрорежущей стали P9 после воздействия НЭСП, б) То же после электронно-пучкового легирования цирконием.

Облучение НЭСП вызывает диссоциацию нитридов железа, особенно  $\epsilon$ -фазы; на поверхности образуется большое количество остаточного аустенита (рис.3б). После нанесения на образцы тонкой пленки толщиной около 0,2 мкм с помощью магнетронного распылителя и последующего воздействия электронного пучка можно инициировать экзотермические химические реакции образования нитридной фазы [5, 6].

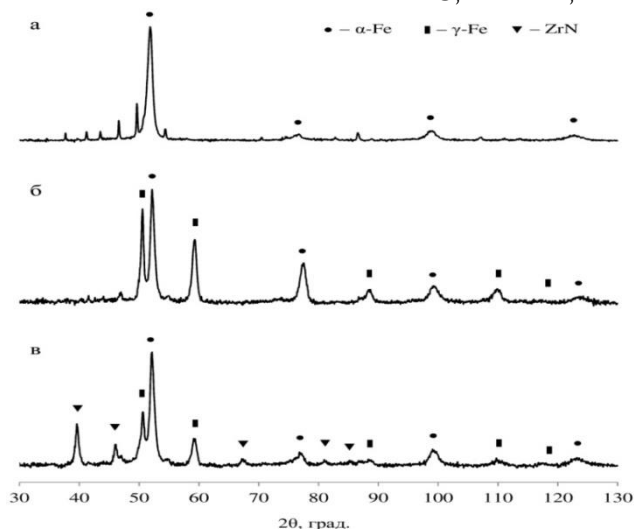
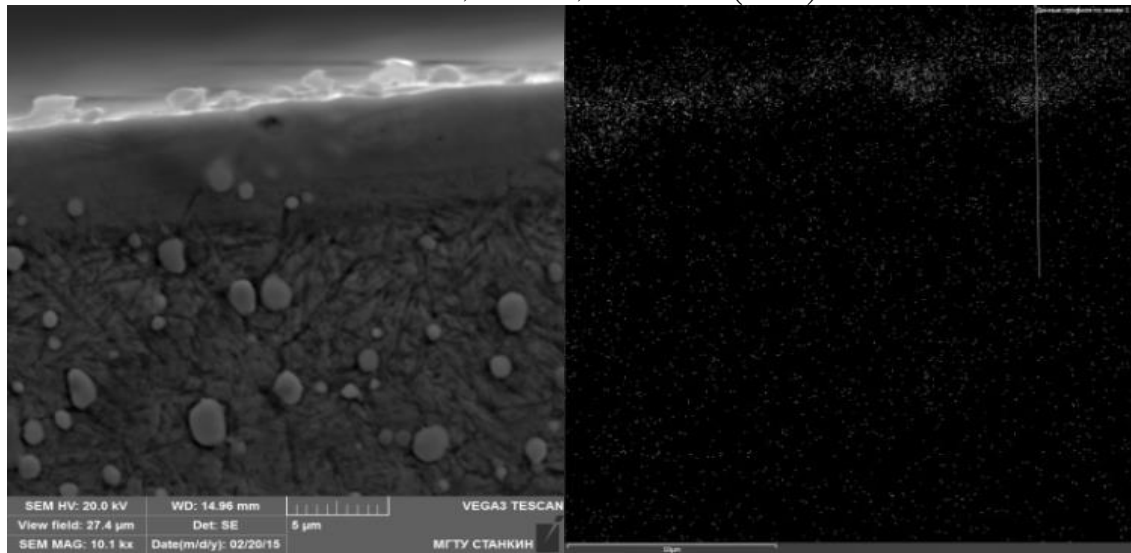


Рис.3. а) Дифрактограмма ( $\text{CoK}\alpha$ ) с поверхности образца азотированной стали Р6М5,

б) то же после воздействия НЭСП, в) то же после нанесения на поверхность пленки NbHf перед облучением.

Из-за образования тугоплавкой нитридной пленки на поверхности значительно уменьшается испарение металла, и структура становится мелкодисперсной (рис.2б). Образование нитридной фазы подтверждается данными рентгеноструктурного анализа (рис.3в). Следует отметить, что в последнем случае содержание остаточного аустенита в приповерхностном слое значительно ниже. В то же время, в нашем случае, мы имеем дело с деформационным упрочнением, вызванным прохождением упругой волны, возникающей при импульсном электронно-лучевом воздействии [7, 8]. Однако, из-за короткой продолжительности процесса и тепловой инерции нагрев, вызванный сжатием и внутренним трением, скорее всего, не будет физическим фактором, определяющим поведение материала в таких условиях. В этом случае ключевую роль должна сыграть механическая активация высокоскоростных физико-химических процессов, которые неизбежно происходят как в жидкой, так и в твердой фазах. Появление расплава вызывает резкое увеличение межфазной поверхности и увеличение скорости реакции образования нитридов из-за дополнительного выделения.



а

б

Рис.4. Модифицированный нитридом циркония приповерхностный слой быстрорежущей стали Р9. а) SEM изображение протравленного шлифа, б) карта распределения ниобии, гафнии по шлифу

**Энергии во время экзотермической реакции.** Многократные запуски процесса практически не изменяют исходную микроструктуру. Как правило, для полного прохождения процесса микролегирования достаточно серии из пяти или шести импульсов НСЭП. Распределение ниобии и гафнии у поверхности показано на рисунке 4б. Как видно из этого рисунка, Nb, Hf находятся только в приповерхностном слое толщиной около 2 мкм. Но толщина зоны воздействия электронно-лучевой обработки составляет 5–6 мкм (рис. 4а). Высокая подводимая энергоёмкость и малое время взаимодействия позволяют рассчитывать на формирование быстро отверждаемых слоев с более однородной и мелкодисперсной структурой и улучшение эксплуатационных характеристик приповерхностного слоя за счет вторичного упрочнения с образованием мартенситно-карбидной структуры с высокой твердостью. Механизм износа на задней поверхности режущего инструмента играет важную роль в определении срока службы инструмента в том числе и при обработке труднообрабатываемого никелевого сплава. Также при последующем нанесении износостойкого покрытия инструмент подвергается не менее двух часов отпуску при температуре 450°C, что снижает содержание остаточного аустенита в модифицированном слое и способствует снятию остаточных напряжений [9, 10]. Проводилось на НГМК ПО «НМЗ» на испытания износостойкость проводились при точении ковальной, жаропрочного сплава 34ХН1МА при скорости резания  $V=10$  м/мин, скорости подачи  $s=0,100$  мм/об, глубине резания  $t=3$  мм. В качестве критерия разрушения была выбрана скорость износа задней и передней поверхности 0,4 мм. Полученные результаты представлены в таблице ниже. Кованная болванка марки 34ХН1МА, твердостью НВ375 заготовка обработки проводилась на горизонтально-фрезерном станке ФУС-32. Высокопроизводительная обработка, а также высокие

требования, предъявляемые к качеству поверхности обрабатываемой детали, вызывают необходимость в дальнейшем развитии современных режущих инструментов, необходимые свойства которого достигаются за счет применения новых материалов, технологий нанесения покрытий, изменения микрогеометрии и режущей кромки инструмента, финишной обработки режущей кромки. Кроме того, с появлением все более труднообрабатываемых материалов появляется потребность в инструментах с более высокой твердостью, формоустойчивостью и износостойкостью.

Изношевание фрез во время обработки

Табл.1

Наименование инструмент	Режимы резания			Стойкость инструмент Т, мин
	, об/ мин	, мм	, мм/ мин	
Фреза дисковая отрезная №1 (покрытие (TiCr)N-(TiAl)N- (CrAlSi)N+ион- азотирование)	50	.0	00	1. До обработки детали наружный диаметр фрезы имел $\varnothing 49.5$ мм.
				2. Глубина прорези 3 мм на длину 170 мм
				3. После обработки износ по наружному диаметру составил 0.2 мм.
Фреза дисковая отрезная №2 (покрытие (алмазоподобное (DLC))	50	.0	00	1. До обработки детали наружный диаметр фрезы
				2. Глубина прорези 3 мм на длину 170 мм
				3. После обработки износ по наружному диаметру составил 0.15 мм.
Фреза дисковая отрезная №3 (покрытие (TiAl)N + ион- азотирование+ион- легирование (NbHf))	50	.0	00	1. До обработки детали наружный диаметр фрезы имел $\varnothing 50$ мм.
				2. Глубина прорези 3 мм на длину 170 мм
				3. После обработки износ по наружному диаметру составил 0.1 мм.



Фреза дисковая отрезная №4 (покрытие (TiAl)N)	50	.0	00	1. До обработки детали наружный диаметр фрезы <del>имел <math>\phi 40.5</math> мм.</del>
				2. Глубина прорези 3 мм на длину 170 мм
				3. После обработки износ по наружному диаметру составил 0.4 мм.
Фреза дисковая отрезная №5 (покрытие (TiAl)N + ион- азотирование)	50	.0	00	1. До обработки детали наружный диаметр фрезы <del>имел <math>\phi 40.5</math> мм.</del>
				2. Глубина прорези 3 мм на длину 170 мм
				3. После обработки износ по наружному диаметру составил 0.2 мм.
Фреза дисковая отрезная №6 (покрытие (TiCr)N-(TiAl)N-(CrAlSi)N (nATCrO3))	50	.0	00	1. До обработки детали наружный диаметр фрезы имел $\phi 50.7$ мм.
				2. Глубина прорези 3 мм на длину 170 мм
				3. После обработки износ по наружному диаметру составил 0.2 мм.
Фреза дисковая отрезная №7 (без покрытие )	50	.0	00	1. До обработки детали наружный диаметр фрезы <del>имел <math>\phi 40.5</math> мм.</del>
				2. Глубина прорези 3 мм на длину 170 мм
				3. После обработки износ по наружному диаметру составил 0.5 мм.

При резке необработанным инструментом характерным местом появления износа был кончик дисковых фрезы.

### ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов указывают на возможность получения на поверхности быстрорежущей стали инструмента слоев, модифицированных поверхностным легированием. Такие слои были получены благодаря иницированию экзотермических химических реакций между подложкой и нанесенной на нее тонкой пленкой. В продуктах реакции обнаружено образование составляющих новой фазы.



Также можно использовать микролегирование. В частности, такая обработка, которую рекомендуется проводить перед нанесением износостойкого покрытия, позволяет влиять на процессы износа не только высокоскоростного, но и быстрорежущего инструмента, что позволяет повысить стойкость (в 2-3 раза) раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Li W.Z. et al Influence of Al content on the mechanical properties and thermal stability in protective and oxidation atmospheres of Zr-Cr-Al-N coatings, *Surface and Coatings Technology* 236 (2013) 238-246
2. [Sharipov J.](#) et al [Increasing the Resistance of the Cutting Tool during Heat Treatment and Coating.](#) *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 050042
3. Fedorov S Sharipov J and Abrorov A 2021 Increasing the surface stability of the cutting tool through complex machining *Journal of Physics: Conference Series* **1889** 022079
4. N R Barakaev, M Z Sharipov, A S Abrorov, 5. Kh. K. Rakhmanov, Overview of the IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering –APITECH-IV 2022. *Journal of Physics: Conference Series* 2388 (2022) 011001 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2388/1/011001
5. Khayridin Rakhmanov, K., Fayziev, S., Mirzayeva, S., Toyirova, G. Research of the oscillation process of raw cotton during transportation *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2388(1), 012167
6. Xu, Y.X. et al Thermal stability and oxidation resistance of sputtered Ti single bondAl single bondCr single bondN hard coatings, *Surface and Coatings Technology* 324 (2017) 47-57
7. Holec D. et al, Phase stability and alloy-related trends in Ti–Al–N, Zr–Al–N and Hf–Al–N systems from first principles, *Surface & Coatings Technology* 206 (2011)1698–1704
8. Khayridin Rakhmonov, Sirojiddin Fayziev, Khakimboy Rakhimov, Dilfuza Kazakova 2021 Relative speed and temperature effect investigation of the of the drying agent on the moisture content of cotton *E3S Web Conf* **264** 04008
9. J.C. Díaz-Guillén et al. Duplex plasma treatment of AISI D2 tool steel by combining plasma nitriding (with and without white layer) and post-oxidation. *Surface & Coatings Technology* **385** (2020) 125420
10. O.V. Krysina et al, Multi-layered gradient (Zr,Nb)N coatings deposited by the vacuum-arc method. *Surface & Coatings Technology* 393 (2020) 125759
11. Yamamoto K. et al. Properties of (Ti,Cr,Al)N coatings with high Al content deposited by new plasma enhanced arc-cathode. *Surface and Coatings Technology* 174 (2003) 620-626
12. F. Huang, G. Wei, J.A. Barnard, M.L. Weaver Microstructure and stress development in magnetron sputtered TiAlCr(N) films. *Surf. Coat. Technol.*, 146–147 (2001), 391–397

13. L.A. Donohue, I.J. Smith, W.-D. Munz, I. Petrov, J.E. Greene, *Surf. Coatings Technol.* 94–95(1997) 226
14. P.L. Tam, et al. Structural, mechanical, and tribological studies of Cr-TiAl-N coating with different chemical compositions. *Thin Solid Films* 516(16) (2008)5725-57
15. F.O.Qosimov et al. Drive Control Algorithm in Conditions of Insufficient Information. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, 1323 AISC, страницы 504–511.
16. K.Karimov et al. Simulation of fluid outflow from a channel with complex geometry. *E3S Web of Conferences*, 2020, 224, 02003
17. Furkat Ismoyilov et al. Improvement of the machine for wool scutching for obtaining ecologically clean fiber. *E3S Web of Conferences* 390, 01010 (2023)
18. Khayridin Rakhmonov, Sirojiddin Fayziev, Khakimboy Rakhimov, Dilfuza Kazakova 2021 Relative speed and temperature effect investigation of the drying agent on the moisture content of cotton *E3S Web Conf* **264** 04008
19. A. Djuraev, S. Sayitkulov, O. Rajabov, J. Kholmiraev, B. Haydarov. Analysis of the impact effect of a piece of cotton with a flat surface with a multi-sided grates slope/ *Journal of Physics: Conference Series*. **2373** 022048 (2022)
20. A.Amonov et al. Determination of the friction force between the roller of the polymer composition coating equipment on the seams of tarpaulin materials and the surface of the tarpaulin. *AIP Conference Proceedings* Том 278923 June 2023 Номер статьи 0400532022
21. Mavlonova I., et al. Experimental studies of the dynamics of the proposed design of the presser foot with an additional conical spring. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2373(2), 022047