

Received: 17.02.2026

Revised: 15.04.2026



Accepted: 24.04.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.2.042-055

INCREASING THE PRODUCTIVITY OF ION-PLASMA NITRIDING IN A GLOW DISCHARGE WITH A MAGNETIC FIELD WITH A SIMULTANEOUS INCREASE IN THE QUALITY OF THE HARDENED LAYER OF THE HS6-5-2 DIN (1.3343 EN) STEEL

R. K. Vafin

*Ufa University of Science and Technology,
32 Zaki Validi St., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia*

 <https://orcid.org/0009-0001-5807-3283>  vafinrk@mail.ru

Email: vafinrk@mail.ru

Address for correspondence: ul. Zaki Validi, 32, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia
Tel.: +7 (927) 941-5041

This paper examines the low productivity of ion-plasma nitriding (IPN) of HS6-5-2 DIN (1.3343 EN) high-speed steel widely used in the production of metal-cutting tools. Conventional IPA modes are characterized by long process cycles (up to 40 hours) entailing high energy consumption and limiting process productivity. Furthermore, nitriding without additional intensification methods exhibits a number of drawbacks reducing the quality of the hardened layer, namely insufficient diffusion zone depth, a sharp microhardness gradient at the layer–base interface, which increases the risk of delamination under contact loads, and a suboptimal wear mechanism with a predominance of adhesive action, which reduces tool life. Therefore, it is a relevant line of research to try to find effective methods for intensifying diffusion processes that can reduce processing time, while simultaneously improving the performance characteristics of the hardened layer.

The paper studies the effect of a magnetic field as an intensifier of ion-plasma nitriding on the diffusion layer growth kinetics in the HS6-5-2 DIN (1.3343 EN) high-speed steel, its structural and phase state, microhardness, and tribological properties. Experiments were conducted on a modernized VELU-5 setup equipped with a magnetic system for generating a closed magnetic field with an induction of 30 to 40 mT. Nitriding was performed in a N₂–H₂–Ar gas mixture, with an arrangement of 0.5–0.1–0.4 volume parts, respectively, at 500 °C for 2 hours.

Keywords: ion-plasma nitriding, magnetic field, HS6-5-2, microhardness, diffusion coefficient, wear resistance

Acknowledgment

The study was carried out with the financial support of state assignment No. FRRR-2026-0005 “Studying new coating materials produced by assisted vacuum-arc deposition for strengthening hard-alloy metal-cutting tools used for processing materials in aero-engine manufacturing”.

References

1. Ramazanov, K.N., Vardanyan, E.L., Nazarov, A.Yu., Muhamadeev, V.R., Nikolaev, A.A., and Muhamadeev, I.R. Effect of thermal cyclic nitriding modes on microstructure and chemical composition of titanium alloy surface layers. *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya*, 2023, 19, 4 (220), 186–192. (In Russian). DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-4-186-192.
2. Nikolaev, A.A., Asylbaev, A.V., Farrakhova, R.A., Pronin, E.A., and Esipov, R.S. The content of the austenitic phase of a dual-phase magnetic material on the basis of siliceous steel upon

- changes in the composition of a gaseous mixture. *Russian Electrical Engineering*, 2022, 93 (12). 767–771. DOI: 10.3103/s1068371222120082.
3. Nagimov, R.Sh., Vafin, R.K., Nikolaev, A.A., and Asylbaev, A.V. Studying the influence of the process conditions of ion nitriding in an arc discharge on the part temperature and the nitrided layer depth during complex ion-plasma processing. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2024, 5, 31–38. (In Russian).
 4. Ramazanov, K.N., Vardanyan, E.L., Mukhamadeev, V.R., Nazarov, A.Yu., Mukhamadeev, I.R., and Nikolaev, A.A. The study of influence of the reaction gases ratio at the Ti-Al-C-N coating deposition on the cutting tool wear resistance. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, 3–2, 32–43. (In Russian). DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-2-32-43.
 5. Petrova, L.G., Belashova, I.S., and Bibikov, P.S. Advances in technological productivity of thermochemical treatment for hardfacing of high alloyed aviation steels. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2022, 8, 3–11. (In Russian). DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-3-11.
 6. Petrova, L.G. and Sergeeva, A.S. Phase structure control in austenite steels during surface strengthening by high-temperature nitride hardening. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2020, 6, 3–11. (In Russian). DOI: 10.30987/2223-4608-2020-6-3-11.
 7. Bibikov, P., Belashova, I., and Prokofyev, M. Nitridation technology specifics of high-alloy corrosion-resistant steels of aviation purposes. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta*, 2021, 28 (2), 206–215. (In Russian). DOI: 10.34759/vst-2021-2-206-215.
 8. Krioni, N.K. and Mingazheva, A.A. Increasing the wear resistance of machine parts by nitriding with integrated surface preparation. *Materials. Technologies. Design*, 2021, 3, 2 (4), 43–50. (In Russian). DOI: 10.54708/26587572_2021_32443.
 9. Konstantinov, V.M., Myshkevich, P.S., and Korneeva, E.K. Improving the effectiveness of nitration of steels by preliminary thermodiffusion alloying. *Aktualnye Voprosy Mashinovedeniya*, 2025, 14, 338–341. (In Russian).
 10. Konstantinov, V.M. and Leshok, V.A. The effect of preliminary plastic deformation on ion-plasma nitriding of the 40KhMFA steel. In: *Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva: sbornik trudov konferentsii* [Modern Technologies for Blank Production, Minsk, April 27, 2023: Proceedings]. BNTU Publ., Minsk, 2023, p. 150–152. (In Russian).
 11. Perevalova, O.B., Panin, A.V., and Sinyakova, E.A. Peculiarities of the surface strengthening of 12Cr ferrite-martensite steel under superposed ion-plasma nitriding and ultrasonic treatment. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, 2012, 3, 43–50. (In Russian).
 12. Shestopalova, L.P. *Nizkotemperaturnoe azotirovanie legirovannykh staley cherez nanooksidnyi baryer* [Low-Temperature Nitriding of Alloy Steels Through a Nano-oxide Barrier: Cand. Thesis]. Moscow, 2009, 197 p. (In Russian).
 13. Kreindel, M.Y., Osipov, I.V., and Rempe, N.G. Plasma parameters in the reflecting discharge with hollow-cathode. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1992, 62 (10), 165–169. (In Russian).
 14. Lopatin, I.V. *Generatsiya obyemnoy plazmy v razryadakh nizkogo davleniya s polym katodom dlya azotirovaniya poverkhnosti metallov* [Generation of Volume Plasma in Low-Pressure Discharges with a Hollow Cathode for Nitriding of Metal Surfaces: Cand. Thesis]. Tomsk, 2013, 161 p. (In Russian).
 15. Koval, N.N. *Istochniki nizkotemperaturnoy plazmy i elektronnykh puchkov na osnove dugovykh razryadov nizkogo davleniya s polym anodom* [Sources of Low-Temperature Plasma and Electron Beams Based on Low-Pressure Arc Discharges with a Hollow Anode: Doctoral Thesis in the Form of a Scientific Report]. Tomsk, 2000, 74 p. (In Russian).
 16. Kibalnikova, O.V., Mikhajlova, A.M., Seryanov, Yu.V., and Baskakov, A.V. Effect of magnetic field on Fe-Ni-Cr steels nitriding. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, 2002, 3, 86–89. (In Russian).

17. Brokman, A. and Tuler, F. A study of the mechanisms of ion nitriding by the application of a magnetic field. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52 (10), 468–471.
18. Lakhtin, Yu.M., Kogan, Ya.D., Shpis, G.-I., and Bemer, Z. *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya* [Theory and Technology of Nitriding]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1991, 320 p. (In Russian).
19. Gudmundsson, J.T., Alami, J., and Helmersson, U. Evolution of the electron energy distribution and plasma parameters in a pulsed magnetron discharge. *Applied Physics Letters*, 2001, 78 (22), 3427–3429. DOI: 10.1063/1.1376150.
20. Pastukh, I.M. *Teoriya i praktika bezvodorodnogo azotirovaniya v tleyushchem razryade* [Theory and Practice of Hydrogen-Free Nitriding in Glow Discharge]. NNTs KhFTI Publ., Kharkov, 2006, 361 p. (In Russian).
21. Goncharenko, I.M., Grigoriev, S.V., Koval, N.N., and Ivanov, Yu.F. Evolution of the structure and phase composition of hardened 4140 steel in the process of plasma nitriding. In: *5th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*, Tomsk, Russia, September 24–29, 2000: Proceedings, TPU, Tomsk, 2000, pp. 330–333.
22. Vafin, R.K. *Vliyanie ionnogo azotirovaniya v tleyushchem razryade s magnitnym polem na strukturu i fazovyi sostav instrumentalnykh staley* [Effect of Ion Nitriding in a Glow Discharge with a Magnetic Field on the Structure and Phase Composition of the R6M5 and Kh12 Tool Steels: Synopsis of Candidate Thesis]. Tomsk, 2013, 18 p. (In Russian).
23. Vafin, R.K., Asylbaev, A.V., Mamontov, D.V., and Sklizkov, I.D. RF Patent No. 2777900 C2, Byull. Izobret. No. 23, 2022.
24. Lieberman, M.A. and Lichtenberg, A.J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, Wiley, New York, 1994, 572 p.
25. Andreev, A.A., Shulaev, V.M., and Sablev, L.P. Nitriding of steels in a gas arc discharge of low pressure. *Fizicheskaya Inzheneriya Poverkhnosti*, 2006, 4 (3–4), 191–197.
26. Lakhtin, Yu.M. and Kogan, Ya.D. *Azotirovanie stali* [Nitriding of Steel]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1976, 256 p. (In Russian).
27. Petrova, L.G. Control of phase composition of nitrided layers in multicomponent alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 2002, 44 (3–4), 148–153. DOI: 10.1023/A:1019634523844.
28. Chatterjee-Fisher, R., Eissell, F.-W. et al. *Azotirovaniye i karbonitrirovaniye* [Nitriding and Carbonitriding]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1990, 280 p. (In Russian).

Подана в журнал: 17.02.2026



УДК 621.785.532

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.2.042-055

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ПОВЫШЕНИЕМ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ СТАЛИ Р6М5

Р. К. Вафин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450076, Россия

 <https://orcid.org/0009-0001-5807-3283>  vafinrk@mail.ru

Электронная почта: vafinrk@mail.ru

Адрес для переписки: ул. Заки Валиди, д. 32, г. Уфа, Респ. Башкортостан, 450076, Россия

Тел.: +7 (927) 941-50-41

В работе рассмотрена проблема низкой производительности ионно-плазменного азотирования (ИПА) быстрорежущей стали Р6М5, широко применяемой в производстве металлорежущего инструмента. Традиционные режимы ИПА характеризуются длительностью технологического цикла (до 40 часов), что приводит к значительным энергозатратам и ограничивает производительность процесса. Кроме того, при азотировании без использования дополнительных методов интенсификации наблюдается ряд недостатков, связанных с качеством упрочненного слоя: недостаточная глубина диффузионной зоны, резкий градиент микротвердости на границе «слой – основа», повышающий риск отслоения при контактных нагрузках, а также неоптимальный механизм изнашивания с преобладанием адгезионной составляющей, что снижает эксплуатационную стойкость инструмента. В связи с этим актуальным направлением является поиск эффективных методов интенсификации диффузионных процессов, позволяющих сократить время обработки при одновременном улучшении эксплуатационных характеристик упрочненного слоя. Изучено влияние магнитного поля как фактора интенсификации ионно-плазменного азотирования на кинетику роста диффузионного слоя, структурно-фазовое состояние, микротвердость и трибологические свойства быстрорежущей стали Р6М5. Эксперименты проводились на модернизированной установке ВЭЛУ-5, оснащенной магнитной системой для создания замкнутого магнитного поля с индукцией 30–40 мТл. Азотирование осуществлялось в смеси газов N_2-H_2-Ar (с соотношением 0,5–0,1–0,4 объемных частей соответственно) при температуре 500 °С в течение 2 часов.

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование, магнитное поле, Р6М5, микротвердость, коэффициент диффузии, износостойкость

1. Введение

В современной инструментальной промышленности для производства металлорежущего инструмента используются различные материалы. Широкое распространение получили твердосплавные материалы благодаря их высоким механическим характеристикам, таким как твердость, износостойкость, возможность обработки труднообрабатываемых материалов и выполнения операций прерывистого резания. Однако по-прежнему быстрорежущая сталь также широко используется при изготовлении осевого металлорежущего инструмента благодаря ее повышенным прочностным характеристикам, причем даже при высоких температурах, что особенно важно для фрезерования и токарной обработки. Проведенное исследование

коммерческих образцов осевого режущего инструмента крупных отечественных и зарубежных инструментальных компаний, таких как Böhler, Carboday и других, показывает, что быстрорежущие стали активно применяются и по сей день для производства фрез, метчиков, сверл. Однако существуют проблемы при обработке материалов, связанные с поверхностным и тепловым износом, с эффективностью резания.

Существует множество плазменных методов структурно-фазовой модификации [1–3]. Одним из наиболее эффективных методов поверхностного упрочнения, позволяющим целенаправленно модифицировать свойства поверхностного слоя без изменения геометрии и свойств сердцевины изделия, является ионно-плазменное азотирование (ИПА) [4]. Данная технология, основанная на обработке изделий в тлеющем разряде низкого давления в азотсодержащей среде, обеспечивает формирование диффузионного слоя с высокой плотностью нитридов, что приводит к значительному повышению микротвердости и долговечности. Однако, несмотря на очевидные технологические преимущества, широкое внедрение ИПА сдерживается рядом экономических и технологических факторов.

Ключевым ограничивающим фактором, снижающим экономическую эффективность и сдерживающим масштабирование процесса, является его относительно низкая производительность, определяемая в первую очередь малой скоростью формирования диффузионного слоя. Традиционные режимы азотирования, обеспечивая высокое качество упрочненного слоя, часто характеризуются значительной продолжительностью технологического цикла: от 10 до 40 часов и более, в зависимости от требуемой глубины слоя и материала обрабатываемой детали. Это приводит к высоким энергозатратам, ограниченной пропускной способности оборудования и, как следствие, к возрастанию себестоимости обработки, что делает процесс менее конкурентоспособным по сравнению с некоторыми альтернативными методами [5–10].

Интенсификация диффузионных процессов при азотировании достигается несколькими принципиально различными подходами, каждый из которых имеет экспериментальное и теоретическое обоснование:

1. Предварительная активация поверхности. В работах А. В. Панина, О. Б. Переваловой, Е. А. Синяковой [11] показано, что ультразвуковая обработка подложки создает развитый дислокационный рельеф, повышающий адсорбционную способность поверхности и ускоряющий последующее насыщение азотом.

2. Барьерные слои. Л. П. Шестопаловой экспериментально обоснована возможность интенсификации процесса при использовании наноксидных барьерных структур [12].

3. Разрядные системы. Фундаментальные исследования эффекта полого катода (Р. Д. Агзамов, В. В. Будилов, Ю. Е. Крейнфельд, Н. М. Лемешев) демонстрируют возможность увеличения скорости насыщения в 1,5–2 раза [13]. Развитие данного направления связано с применением двухступенчатых плазменных генераторов (И. В. Лопатина [14]), позволяющих повысить микротвердость при сокращении цикла обработки в 2–3 раза. Параллельно развивается подход с использованием несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом (Ю. Х. Ахмадеев, Н. Н. Коваль, П. М. Щанин [15]), обеспечивающий сокращение времени обработки в 3–4 раза за счет интенсивной ионной бомбардировки.

4. Магнитное поле. Исследования А. В. Баскакова, О. В. Кибальниковой и А. М. Михайловой [16], а также А. А. Брокмана [17] подтверждают, что наложение постоянного магнитного поля ускоряет кинетику азотирования в 1,5 раза.

Фундаментальной физической причиной, лимитирующей скорость процесса, является кинетика диффузии атомов азота в металлическую решетку, которая зависит от целого комплекса взаимосвязанных параметров. К ним относятся плотность и энергия активных частиц (ионов, атомов) в плазме, состояние поверхности (наличие оксидных пленок, степень активации), температурно-временные условия процесса, а также состав газовой среды. В классических схемах ИПА не все эти параметры оптимизированы для достижения максимальной скорости массопереноса, поскольку приоритет часто отдается исключительно финальным

свойствам слоя, а не динамике их достижения [18]. Таким образом, резерв повышения производительности лежит в интенсификации физико-химических явлений на границе «плазма – поверхность».

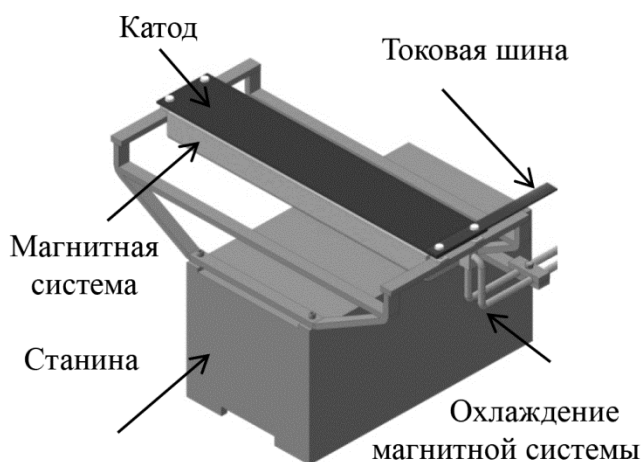
В современной научно-технической литературе намечается несколько перспективных направлений интенсификации ионно-плазменного азотирования [19]. Среди них использование газовых смесей с повышенным химическим потенциалом (например, с добавлением водорода, аргона или углеводородов), применение импульсных режимов питания разряда для увеличения плотности плазмы и управления ее составом, а также совмещение процесса с ионной имплантацией или предварительной плазменной очисткой в усиленных режимах [20, 21, 22]. Однако систематизированные данные о комплексном влиянии таких модификаций как на кинетику роста слоя, так и на его структурно-фазовое состояние и служебные свойства часто носят фрагментарный характер.

Целью настоящего исследования является изучение магнитного поля как фактора интенсификации ионно-плазменного азотирования для повышения производительности и экспериментальная оценка влияния магнитного поля на качество упрочненного слоя на примере быстрорежущей стали Р6М5.

2. Материал и Методика

В качестве объектов исследования была выбрана быстрорежущая сталь Р6М5, подвергнутая ионно-плазменному азотированию в промышленных условиях. Образцы в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 10 мм проходили полный цикл предварительной термической обработки (закалка с последующим трехкратным отпуском для стали Р6М5), а затем тщательную механическую шлифовку и полировку до зеркального состояния поверхности для обеспечения идентичных начальных условий и точности последующего металлографического анализа.

Все эксперименты по азотированию проводились на установке ВЭЛУ-5 (рис. 1), подвергнутой существенной модернизации с целью повышения управляемости и воспроизводимости плазменных параметров. Ключевым элементом модернизации стала интеграция в рабочий объем камеры стандартной магнетронной системы с водяным охлаждением. Магнитная система, расположенная соосно с катодом-подложкодержателем, генерировала замкнутое магнитное поле с индукцией 30–40 мТл, что позволило эффективно захватывать электроны и увеличивать степень ионизации рабочей газовой смеси.



a



б

Рис. 1. Установка ВЭЛУ-5: общий вид (*a*); диэлектрический стол с магнитной системой (*б*) [22]

Обработка велась в смеси газов (N_2-H_2-Ar с соотношением 0,5–0,1–0,4 объемных частей соответственно). Основными управляемыми технологическими параметрами выступали: температура (480–500 °С), давление (50–120 Па при насыщении и до 5 Па при ионной очистке), режим питания разряда (импульсный, с регулируемой скважностью для эффективного дугогашения). Реализация процесса ионного азотирования была выполнена в условиях тлеющего разряда с наложением магнитного поля. Время выдержки при температуре насыщения было установлено равным 2 часам.

Диагностика параметров плазмы тлеющего разряда проводилась с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра с охранным кольцом. Данная конструкция зонда минимизировала влияние краевых эффектов и загрязнений, что обеспечило высокую точность измерений [23].

Для измерения толщины упрочненного слоя использовался металлографический метод. Шлифы образцов подготавливались по стандартной процедуре механической шлифовки и полировки. Для выявления границы диффузионной зоны и белого слоя применялось последовательное химическое травление (пикратный реактив пикрат натрия) для визуализации нитридных фаз и последующее травление 4-процентным раствором нитрата (HNO_3 в C_2H_5OH) для выявления общей структуры стали. Исследование микроструктуры проводилось на инвертированном оптическом микроскопе Zeiss Axiovert, оснащенной системой цифровой фоторегистрации. Построение концентрационных профилей распределения азота по глубине осуществляли на растровом электронном микроскопе JSM-6390 с EDS приставкой.

Оценка основных упрочняющих эффектов азотирования выполнялась путем измерения микротвердости поперечного шлифа. Испытания проводились на микротвердомере Buehler Omnimet Micromet-5101 по методу Виккерса при нагрузке 0,05 Н (50 г) с выдержкой 15 секунд. Замеры выполнялись от края поверхности вглубь материала с фиксированным шагом, что позволило построить аппроксимированные кривые распределения микротвердости по глубине. Для каждого режима обработки производилось не менее 20 измерений на разных участках шлифа для обеспечения статистической достоверности.

Износостойкость азотированных образцов из стали Р6М5 оценивалась с использованием трибометра NanoVea по схеме трения «шар по диску» (ball-on-disk) в условиях сухого трения (без смазочного материала). В качестве контртела применялся шар диаметром 30 мм из стали 100Cr6 (химический состав: 1,0 % С, 1,5 % Cr), а удаление материала происходило преимущественно за счет абразивного взаимодействия с твердыми частицами коллоидной суспензии SiO_2 0,05 мкм согласно стандартной методике ASTM G99. Оценка износостойкости выполнялась по объему или глубине износа, формируемого на поверхности образца в результате механического воздействия при вращении шара. Данный подход позволяет количественно характеризовать сопротивление азотированного слоя изнашиванию в условиях сухого контактного взаимодействия, что является важным критерием качества упрочненного слоя для инструментальных сталей, работающих в условиях интенсивного трения без смазки.

Для количественного анализа диффузионных процессов при ионно-плазменном азотировании быстрорежущей стали Р6М5 использован метод Матано – Больцмана. Данный метод позволяет рассчитать концентрационную зависимость коэффициента диффузии азота по экспериментальному концентрационному профилю. В рамках подхода исходный профиль концентрации преобразуется в зависимость координаты изоконцентратной плоскости от времени, после чего численно находится интеграл Больцмана с помощью программы OriginPro. Применение метода Матано – Больцмана в настоящей работе позволило установить влияние внешнего магнитного поля на кинетику диффузионного насыщения и оценить изменение диффузионной подвижности азота в приповерхностных слоях стали.

3. Результаты и обсуждение

Анализ кинетики роста диффузионного слоя является фундаментальным этапом исследования и повышения производительности процессов химико-термической обработки, в частности ионно-плазменного азотирования. Его проведение обусловлено комплексом научных и прикладных задач: установление базовых закономерностей, оптимизация технологических режимов и оценка эффективности интенсифицирующих методов, связь кинетики роста со структурой и идентификация лимитирующих стадий процесса.

Изучение зависимости толщины слоя от времени (рис. 2) позволяет проверить соответствие процесса классическим диффузионным моделям или выявить отклонения от них. Это является основой для прогнозирования результатов обработки. На основе экспериментальных кинетических кривых роста диффузионного слоя можно с высокой точностью рассчитать необходимую длительность технологического цикла для достижения заданной глубины слоя, что критически важно для планирования производства [24].

Как отмечено в источнике [25], азотированный слой характеризуется двухуровневой структурой. Поверхностная зона состоит из нитридов ϵ -фазы, а прилегающий к основе подслоя представляет собой α -твердый раствор. Рост слоя в первые 2–3 ч при ИПА в магнитном поле линейно зависит от времени и лимитируется на уровне порядка 100 мкм на рубеже 3 и более часов, это может указывать на лимитирование процесса поверхностной реакцией (рис. 2).

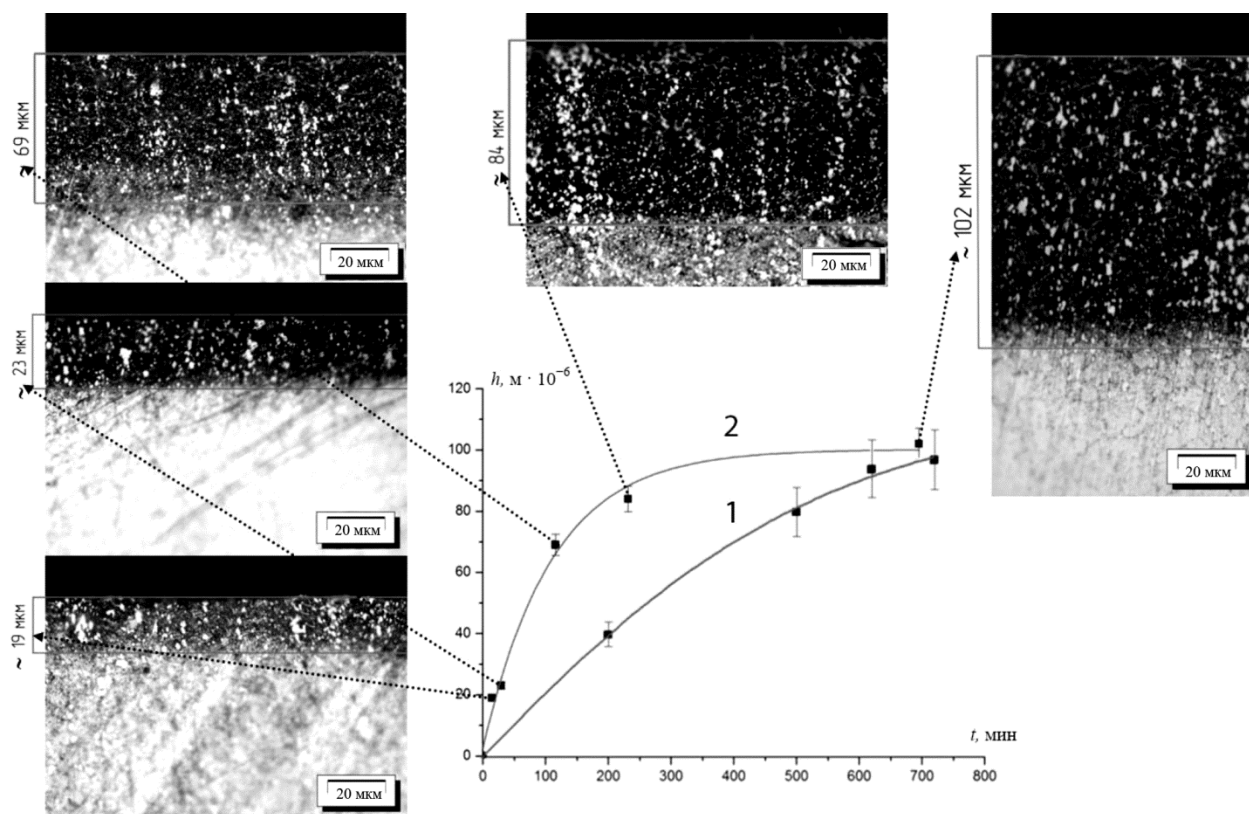


Рис. 2. Кинетика роста упрочненного слоя при азотировании стали Р6М5:

1 – для сопоставления по данным работы [2525]; 2 – в тлеющем разряде с магнитным полем, $T = 480\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 50\text{ Па}$ [22]

Сравнительный анализ градиентов микротвердости в зоне насыщения подтверждает существенные технологические преимущества схемы азотирования с магнитным полем. Преимущества выражаются в двух аспектах:

1. Увеличение эффективной глубины упрочнения. При применении магнитного поля глубина слоя с модифицированными свойствами увеличивается примерно в 1,5 раза (с ~55 до ~85 мкм).

2. Оптимизация градиента механических свойств. Профиль твердости для данного режима (рис. 3) характеризуется более плавным, экспоненциальным затуханием, что является индикатором высокой адгезии и отсутствия резкого скачка свойств на границе. Это минимизирует риск отслоения упрочненного слоя под нагрузкой.

Следует отметить, что рост диффузионного слоя при азотировании следует базовому правилу фазовых превращений: порядок формирования монокомпонентных прослоек повторяет порядок однофазных полей на диаграмме состояния Me–N, через которые проходит изотерма, соответствующая температуре процесса. Таким образом, фазовый состав слоя является прямым следствием термодинамического равновесия при заданной температуре [26, 27].

Интенсивность роста фаз лимитируется диффузией в их объеме и через граничные области. Результаты, представленные на рис. 2, демонстрируют активирующее влияние магнитного поля на процесс азотирования в тлеющем разряде. Физической причиной служит увеличение концентрации заряженных частиц плазмы вблизи катода за счет магнитного поля (рис. 4), что усиливает концентрационный градиент азота и интенсифицирует диффузию.

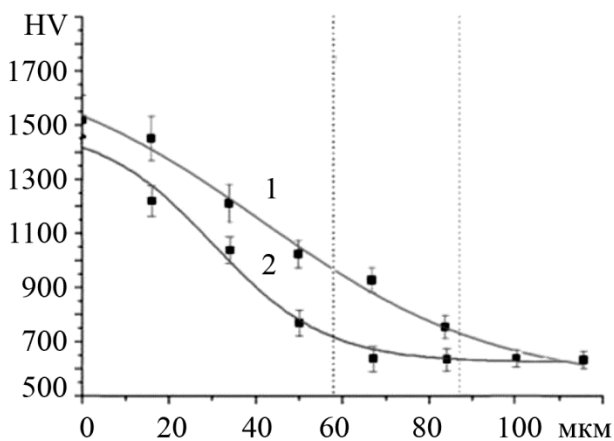


Рис. 3. Профили микротвердости (HV) стали Р6М5 после азотирования при 500 °С в течение 2 ч [22]: 1) с магнитным полем (50 Па), 2) без поля (120 Па)

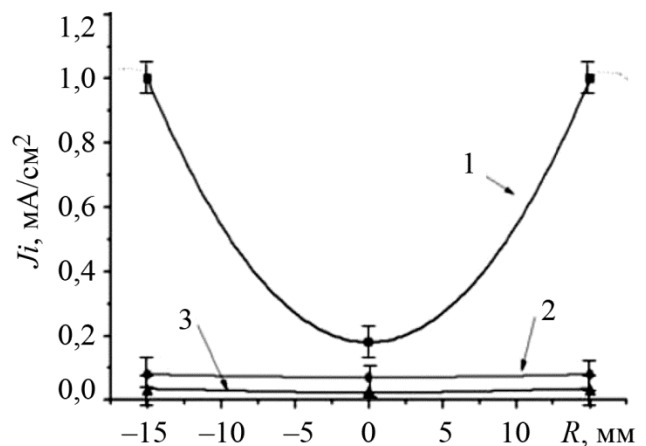


Рис. 4. Распределение плотности ионного тока по радиусу на разных расстояниях от катода [22]: L = 6 мм (1), 10 мм (2), 22 мм (3)

Для количественной оценки транспорта азота в диффузионной зоне рассчитаны эффективные коэффициенты диффузии D_{eff} с использованием метода Матано – Больцмана. Расчет выполнялся по концентрационным профилям распределения N по глубине (рис. 5). Показано, что наложение магнитного поля приводит к увеличению D_{eff} в 4 раза по сравнению с азотированием без поля в интервале температур 490–500 °С. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что магнитное поле оказывает ускоряющее действие на диффузионные процессы, что согласуется с известными представлениями о влиянии внешних магнитных полей на подвижность точечных дефектов и границ зерен в азотированных слоях [16].

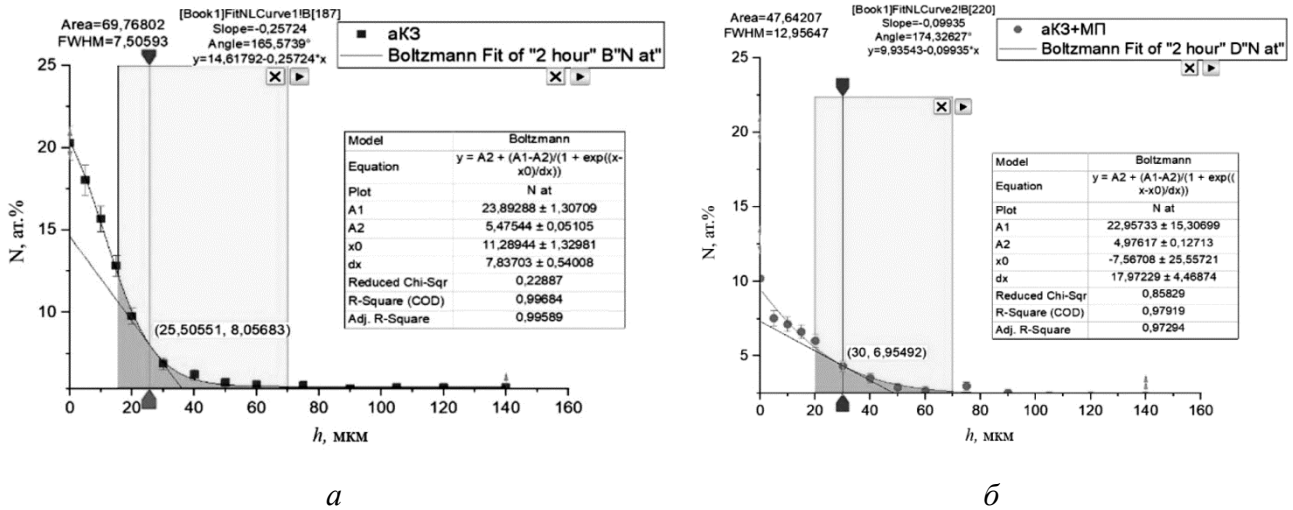


Рис. 5. Концентрационные профили распределения N по глубине азотирования в тлеющем разряде стали Р6М5 в течение 2 ч, $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$: без магнитного поля (а); с магнитным полем (б)

Полученные в работе количественные значения эффективных коэффициентов диффузии были сопоставлены с литературными данными для аналогичных сталей и режимов азотирования. Установлено, что значение D_{eff} в отсутствие магнитного поля составляет $0,5 \times 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$, что хорошо согласуется с результатами работ [18, 20, 26, 28]. При наложении магнитного поля наблюдается увеличение коэффициента диффузии до $2 \times 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$, кратное увеличение коэффициента диффузии превышает общепринятый (в 7–10 %) разброс значений, принимаемый при его расчете. Это позволяет утверждать, что эффект ускорения диффузии под действием магнитного поля является статистически значимым и не может быть объяснен исключительно технологическим разбросом параметров обработки.

Увеличение эффективного коэффициента диффузии под действием магнитного поля позволяет при неизменной длительности цикла получить диффузионный слой большей глубины, что при сохранении градиента твердости повышает несущую способность упрочненного слоя при контактном нагружении.

Для быстрорежущей стали Р6М5, широко применяемой при изготовлении режущего инструмента, трибологические свойства поверхности являются определяющими с точки зрения эксплуатационной стойкости. Качество упрочненного слоя, формируемого в процессе азотирования, не может быть оценено исключительно по структурным параметрам (глубина слоя, микротвердость) без учета его поведения в условиях трения, износа и контактного нагружения. Именно износостойкость, сопротивление схватыванию и задиристость выступают интегральными показателями, связывающими технологию обработки с реальными условиями работы инструмента. В связи с этим оценка качества азотированного слоя на стали Р6М5 должна включать не только структурно-фазовый анализ, но и количественные трибологические испытания, имитирующие эксплуатационные режимы нагружения (рис. 6).

Известно [20], что азотирование стали Р6М5 приводит к формированию двухслойной структуры: поверхностной зоны соединений (преимущественно ϵ -фаза $\text{Fe}_2 - 3 \text{ N}$ и γ' -фаза $\text{Fe}_4 \text{ N}$) и подповерхностной диффузионной зоны с выделениями нитридов легирующих элементов (Cr, Mo, V, W). С трибологической точки зрения зона соединений выполняет функцию антифрикционного барьера: она снижает коэффициент трения при граничном трении, уменьшает адгезионное взаимодействие с контртелом и повышает сопротивление схватыванию, что особенно важно для быстрорежущих сталей, работающих в условиях высоких контактных давлений и температур. Однако избыточная толщина зоны соединений (более 15–20 мкм) или ее высокая пористость приводит к обратному эффекту: охрупчивание поверхност-

ного слоя вызывает микросколы и отслоения при циклическом контактном нагружении, что резко снижает износостойкость. Таким образом, качество упрочненного слоя определяется не максимальной твердостью, а оптимальным сочетанием толщины, фазового состава и структурной целостности зоны соединений.

Диффузионная зона, лежащая под слоем соединений, обеспечивает градиентный переход твердости от поверхности к сердцевине. С трибологической точки зрения этот градиент критически важен: при его отсутствии (слишком резком переходе) возникает высокая вероятность хрупкого разрушения под действием контактных напряжений. Для стали Р6М5 характерно образование сложных карбонитридов ванадия, вольфрама и молибдена, которые создают высокую дисперсионную твердость. Однако неравномерное распределение этих фаз или формирование нитридной сетки по границам зерен снижает усталостную контактную прочность и может служить очагами зарождения трещин при трении качения или скольжения. Количественная оценка трибологических свойств – через коэффициент трения и изучение механизма износа – позволяет объективно судить о том, насколько сформированная структура соответствует эксплуатационным требованиям конкретного инструмента.

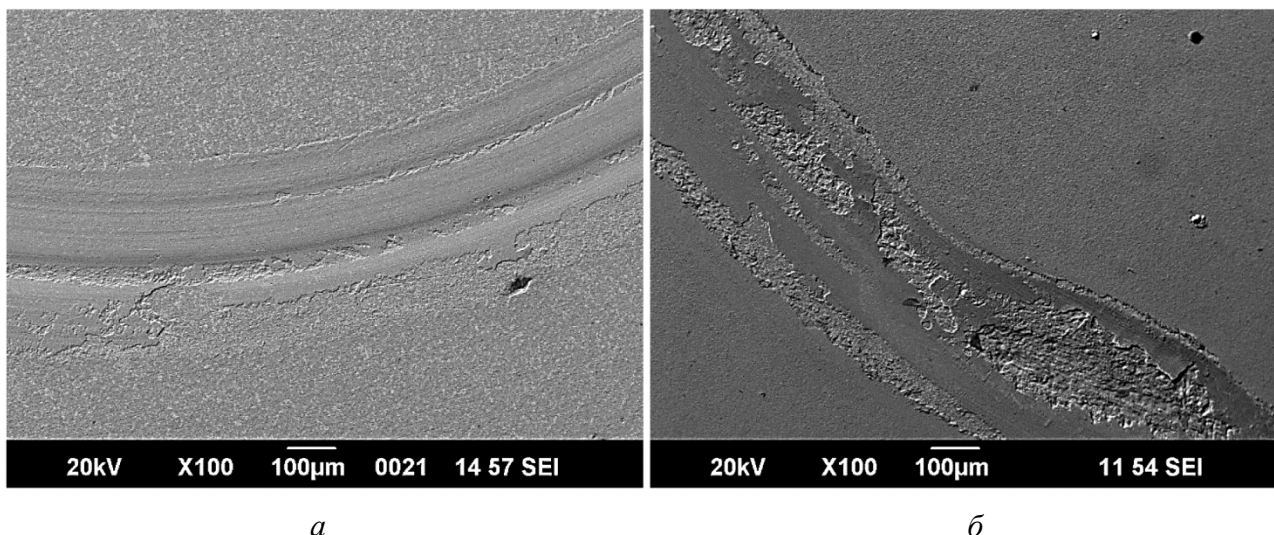


Рис. 6. Морфология поверхности в зоне износа (РЭМ-микроскопия) после ионно-плазменного азотирования при $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч: с магнитным полем (а); без магнитного поля (б)

Результаты морфологического анализа поверхностей износа (рис. 6) для исследованных режимов обработки позволяют идентифицировать смешанный адгезионно-абразивный механизм деструкции как для образца стали Р6М5 после азотирования с магнитным полем, так и для образца после азотирования без магнитного поля. Диагностическими признаками служат два типа морфологических элементов: протяженные параллельные борозды (царапины), свидетельствующие об абразивном износе, и локализованные участки с неровными краями и следами пластического отрыва материала, характерные для адгезионного взаимодействия.

Детальное сопоставление микрофотографий выявляет важную закономерность: абразивная составляющая является доминирующей для образца после азотирования в магнитном поле, ее доля в общем балансе механизмов изнашивания возрастает. Количественными индикаторами этого сдвига являются: 1) уменьшение на микрофотографиях площади, занятой характерными адгезионными вырывами; 2) соответствующее снижение амплитуды флуктуаций коэффициента трения на кинетических кривых (рис. 7), поскольку именно адгезионное схватывание генерирует наиболее резкие скачки трения.

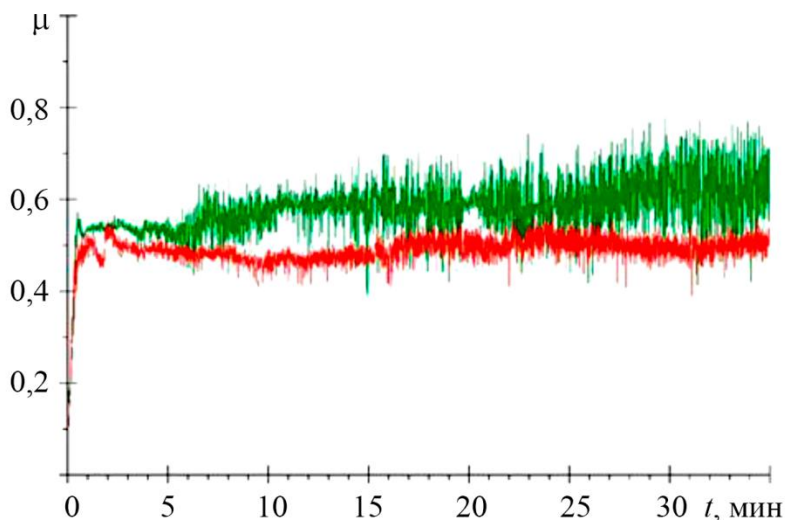


Рис. 7. Зависимости коэффициента трения от времени испытания для предварительно деформированной стали Р6М5 после ионно-плазменного азотирования в течение 2 ч, $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$: — без магнитного поля; — с магнитным полем

Амплитуда флуктуаций коэффициента трения уменьшается для образцов после азотирования с использованием магнитного поля, что является диагностическим признаком подавления адгезионного механизма изнашивания. Это происходит благодаря двум взаимосвязанным структурным изменениям, инициированным магнитным полем:

1. Массовое образование нитридных фаз по всему объему насыщенного слоя.
2. Формирование протяженной приповерхностной зоны с аномально высокой микротвердостью (до 1500 HV).

В результате формируется стабильный, износостойкий поверхностный слой, в котором абразивный механизм начинает доминировать над неустойчивым адгезионным схватыванием. Таким образом, магнитное поле в итоге обеспечивает переход к более стабильному и благоприятному с точки зрения трения режиму изнашивания.

4. Заключение

Установлено, что наложение магнитного поля с индукцией 30–40 мТл в процессе ионно-плазменного азотирования стали Р6М5 приводит к ускорению роста диффузионного слоя. При длительности обработки 2 часа глубина упрочненного слоя в 1,5 раза более обширная в сравнении с азотированием без магнитного поля, что свидетельствует о существенной интенсификации массопереноса.

Методом Матано – Больцмана по концентрационным профилям распределения азота рассчитаны эффективные коэффициенты диффузии D_{eff} . Показано, что наложение магнитного поля увеличивает D_{eff} с $0,5 \times 10^{-10}$ до $2,0 \times 10^{-10}$ см²/с, то есть в 4 раза, что подтверждает статистически значимый эффект ускорения диффузии и не может быть объяснено технологическим разбросом параметров обработки.

Азотирование в магнитном поле обеспечивает формирование более благоприятного профиля микротвердости: максимальная твердость достигает 1500 HV, а градиент твердости по глубине характеризуется плавным экспоненциальным распределением. Это повышает качество упрочненного слоя и снижает риск его отслоения при контактных нагрузках.

Испытания на трибометре по схеме «шар по диску» в условиях сухого трения показали, что азотирование с магнитным полем приводит к изменению механизма изнашивания. Доминирующим становится абразивный механизм с подавлением адгезионной составляющей, что под-

тверждается морфологическим анализом поверхностей износа и снижением амплитуды флуктуаций коэффициента трения.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания № FRRR-2026-0005 «Исследование новых материалов покрытий, полученных методом ассистированного вакуумно-дугового осаждения, для упрочнения металлорежущих инструментов из твердого сплава, применяемых для обработки материалов авиадвигателестроительной отрасли».

Литература

1. Влияние режимов термоциклического азотирования на микроструктуру и химический состав поверхностных слоев титанового сплава / К. Н. Рамазанов, Э. Л. Варданян, А. Ю. Назаров, В. Р. Мухамадеев, А. А. Николаев, И. Р. Мухамадеев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19, 4 (220). – С. 186–192. – DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-4-186-192.
2. The content of the austenitic phase of a dual-phase magnetic material on the basis of siliceous steel upon changes in the composition of a gaseous mixture / A. A. Nikolaev, A. V. Asylbaev, R. A. Farrakhova, E. A. Pronin, R. S. Esipov // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93 (12). – P. 767–771. – DOI: 10.3103/s1068371222120082.
3. Исследование влияния технологических режимов ионного азотирования в дуговом разряде на температуру детали и глубину азотированного слоя при комплексной ионно-плазменной обработке / Р. Ш. Нагимов, Р. К. Вафин, А. А. Николаев, А. В. Асылбаев // Технология машиностроения. – 2024. – № 5. – С. 31–38.
4. Исследование влияния соотношения реакционных газов при осаждении покрытия системы Ti-Al-C-N на износостойкость режущего инструмента / К. Н. Рамазанов, Э. Л. Варданян, В. Р. Мухамадеев, А. Ю. Назаров, И. Р. Мухамадеев, А. А. Николаев // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – №№ 3–2. – С. 32–43. – DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-2-32-43.
5. Петрова Л. Г., Белашова И. С., Бибииков П. С. Совершенствование технологий химико-термической обработки для поверхностного упрочнения высоколегированных сталей авиационного назначения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – № 8 (134). – С. 3–11. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-3-11.
6. Петрова Л. Г., Сергеева А. С. Контроль фазового состава аустенитных сталей при поверхностном упрочнении методом высокотемпературного азотирования // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 6 (108). – С. 3–11. – DOI: 10.30987/2223-4608-2020-6-3-11.
7. Бибииков П. С., Белашова И. С., Прокофьев М. В. Особенности технологии азотирования высоколегированных коррозионностойких сталей авиационного назначения // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28 (2). – С. 206–215. – DOI: 10.34759/vst-2021-2-206-215.
8. Криони Н. К., Мингажева А. А. Повышение износостойкости деталей машин азотированием с комплексной подготовкой поверхности // Materials. Technologies. Design. – 2021. – Т. 3, 2 (4). – С. 43–50. – DOI: 10.54708/26587572_2021_32443.
9. Константинов В. М., Мышкевич П. С., Корнеева Е. К. Повышение эффективности азотирования сталей предварительным термодиффузионным легированием // Актуальные вопросы машиноведения. – 2025. – Т. 14. – С. 338–341.
10. Константинов В. М., Лешок В. А. Влияние предварительной пластической деформации на ионно-плазменное азотирование стали 40ХМФА // Современные технологии для заготовительного производства, Минск, 27 апреля 2023 г. : сборник трудов конференции. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 150–152.

11. Перевалова О. Б., Панин А. В., Синякова Е. А. Особенности поверхностного упрочнения 12Cr ферритно-мартенситной стали при совмещении ионно-плазменного азотирования и ультразвуковой обработки // *ФиХОМ*. – 2012. – № 3. – С. 43–50.
12. Шестопалова Л. П. Низкотемпературное азотирование легированных сталей через нанооксидный барьер : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. – Москва, 2009. – 197 с.
13. Крейндель Ю. Е., Осипов И. В., Ремпе. Н. Г. Параметры плазмы в отрицательном разряде с полым катодом // *ЖТФ*. – 1992. – Т. 62 (10). – С. 165–169.
14. Лопатин И. В. Генерация объемной плазмы в разрядах низкого давления с полым катодом для азотирования поверхности металлов : дис. ... канд. техн. наук : 05.27.02. – Томск, 2013. – 161 с.
15. Коваль Н. Н. Источники низкотемпературной плазмы и электронных пучков на основе дуговых разрядов низкого давления с полым анодом : дис. ... докт. техн. наук в форме науч. докл. : 05.27.02. – Томск, 2000. – 74 с.
16. Кибальникова О. В., Махайлова А. М., Баскаков А. В. Влияние магнитного поля на азотирование сталей системы Fe-Ni-Cr // *Физика и химия обработки материалов*. – 2002. – № 3. – С. 86–89
17. Brokman A., Tuler F. A study of the mechanisms of ion nitriding by the application of a magnetic field // *Journal of Applied Physics*. – 1981. – Vol. 52 (1). – P. 468–471.
18. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бемер // М. : *Металлургия*, 1991. – 320 с.
19. Gudmundsson J. T., Alami J., Helmersson U. Evolution of the electron energy distribution and plasma parameters in a pulsed magnetron discharge // *Applied Physics Letters*. – 2001. – Vol. 78 (22). – P. 3427–3429. – DOI: 10.1063/1.1376150.
20. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков : *ННЦ ХФТИ*, 2006. – 361 с.
21. Evolution of the structure and phase composition of hardened 4140 steel in the process of plasma nitriding / I. M. Goncharenko, S. V. Grigoriev, N. N. Koval, Yu. F. Ivanov // 5th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, September 24–29, 2000 : *Proceedings*. – Tomsk : *TPU*, 2000. – P. 330–333.
22. Вафин Р. К. Влияние ионного азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем на структуру и фазовый состав инструментальных сталей Р6М5 и Х12 : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. – Томск, 2013. – 18 с.
23. Патент № 2777900 С2 Рос. Федерация. Способ диагностики плазмы и зонд Ленгмюра с защитным кольцом для его реализации : № 2021100442 : заявл. 12.01.2021 : опубл. 11.08.2022 / Вафин Р. К., Асылбаев А. В., Мамонтов Д. В., Склизков И. Д.
24. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. – New York : *Wiley*, 1994. – 572 p.
25. Андреев А. А., Шулаев В. М., Саблев Л. П. Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления // *Фізична інженерія поверхні*. – 2006. – № 4 (3–4). – С. 191–197.
26. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали – М. : *Машиностроение*, 1976. – 256 с.
27. Petrova L. G. Control of phase composition of nitrided layers in multicomponent alloys // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2002. – Vol. 44 (3–4). – P. 148–153. – DOI: 10.1023/A:1019634523844
28. Азотирование и карбонитрирование / Р. Чаттерджи–Фишер, Ф.-В. Эйзелл и др. – М. : *Металлургия*, 1990. – 280 с.