



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.785.532
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-111-119

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ КОМПЛЕКСНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. В работе описано влияние температуры и продолжительности процесса ионного азотирования в дуговом разряде с использованием плазменного источника с накалимым катодом на механические характеристики поверхности, в частности на адгезионную прочность покрытия и износостойкость поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки. Комплексная ионно-плазменная обработка состоит из ионного азотирования и последующего нанесения защитного многослойного покрытия системы (TiAl)N, проводимых в едином вакуумном цикле. В качестве используемого материала использовалась быстрорежущая сталь Р6М5. Адгезионная прочность исследовалась склерометрическим методом. Износостойкость исследовалась при помощи методики «шар по диску». Результаты показали, что поверхностная микротвердость увеличивается с течением времени в среднем в 1,5 раза с 860-870 до 1080-1520 HV в зависимости от температуры. Более того, определено, что с увеличением времени азотирования происходит увеличение адгезионной прочности до достижения глубины ~40 мкм. С увеличением продолжительности процесса азотирования увеличивается критическая нагрузка разрушения покрытия, однако результаты коэффициента упругого восстановления We показывают, что для более продолжительных режимов упругое восстановление после снятия нагрузки составляет примерно 30–40%, а для покрытия времени 30–60 мин порядка 50–60%. Адгезионные исследования показали смешанный механизм износа, который сочетает в себе адгезионное и абразивное воздействие. По совокупности исследуемых физико-механических характеристик определено, что технология с режимами обработки $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин обладает сравнительно наивысшими свойствами, а именно интенсивностью изнашивания в $11 \cdot 10^{-5}$ г, адгезионной прочностью в 19,5 Н и микротвердостью поверхности порядка 1270 HV.

Ключевые слова: ионное азотирование, вакуумно-дуговые покрытия, комплексная ионно-плазменная обработка, быстрорежущая сталь, адгезионная прочность, трибологические характеристики

© Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К., 2024

Для цитирования

Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К. Исследование влияния температуры и продолжительности ионного азотирования в дуговом разряде на механические характеристики поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 111-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-111-119>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DURATION OF ION NITRIDING IN AN ARC DISCHARGE ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE AFTER COMPLEX ION-PLASMA TREATMENT

Nagimov R.Sh., Vafin R.K.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. The paper describes the effect of temperature and duration of the ion nitriding process in an arc discharge using a plasma source with a pumped cathode on the mechanical characteristics of the surface, particularly, on the adhesion strength of the coating and the wear resistance of the surface after complex ion-plasma treatment. The complex ion-plasma treatment consists of ion nitriding and subsequent application of a protective multilayer coating of the (TiAl)N system, carried out in a single vacuum cycle. The material used was high-speed steel P6M5. Adhesion strength was investigated by sclerometric method. Wear resistance was investigated using the ball-on-disk technique. The results showed that surface microhardness increases with time in average 1.5 times from 860-870 HV to 1080-1520 HV depending on temperature. Moreover, it was determined that with increasing nitriding time there is an increase in adhesion strength up to a depth of $\sim 40 \mu\text{m}$. With increasing duration of the nitriding process, the critical failure load of the coating increases, however, the results of the elastic recovery factor W_e show that for longer regimes, the elastic recovery after load removal is about 30-40%, while for 30-60 minutes coating, it is about 50-60%. Adhesion studies have shown a mixed mechanism of wear, which combines adhesive and abrasive effects. According to the totality of investigated physical and mechanical characteristics it was determined that the technology with treatment modes $T = 475^\circ\text{C}$, $t = 35 \text{ min}$ has comparatively highest properties, namely wear intensity of $11 \cdot 10^{-5} \text{ g}$, adhesion strength of 19.5 N and surface microhardness of about 1270 HV.

Keywords: ion nitriding, vacuum-arc coatings, complex ion-plasma treatment, high-speed steel, adhesion strength, tribological characteristics

For citation

Nagimov R.Sh., Vafin R.K. Study of the Influence of Temperature and Duration of Ion Nitriding in an Arc Discharge on the Mechanical Characteristics of the Surface after Complex Ion-Plasma Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 111-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-111-119>

Введение

В современном машиностроении быстрорежущая сталь активно используется в производстве инструментов благодаря ее высоким эксплуатационным характеристикам. Однако из-за сравнительно невысокой твердости в 63–66 HRC такой тип материалов обладает невысокой износостойкостью [1].

Для решения этой проблемы используются различные методы упрочнения поверхности, включая нанесение защитных покрытий [2-4] и ионное азотирование [5-8]. В последние годы было разработано множество комбинационных методов, которые позволяют совмещать несколько видов упрочнения поверхности [9-11]. Одним из наиболее эффективных методов является комплексная ионно-плазменная обработка, которая сочетает ионное азотирование с последующим нанесением покрытия. Этот метод увеличивает твердость поверхностного слоя, что способствует плавному градиенту твердости от покрытия к основе, улучшает адгезионную прочность и износостойкость [12-15]. Традиционно процесс комплексной ионно-плазменной обработки проводится в двух вакуумных циклах, что увеличивает время обработки и

требует механической подготовки поверхности. Однако использование плазменного источника с накаливаемым катодом позволяет выполнить весь процесс в одном вакуумном цикле, что сокращает время обработки и увеличивает адгезию покрытий [16-18].

Важным аспектом ионного азотирования в данном случае являются технологические режимы ионного азотирования, а именно температура детали и продолжительность цикла. Поскольку слишком высокая поверхностная микротвердость может привести к охрупчиванию поверхности и снижению адгезии покрытия, необходимо получить оптимальное время и температуру процесса [19].

Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния температуры образца P6M5 и продолжительности процесса ионного азотирования на механические характеристики поверхностного слоя после комплексной ионно-плазменной обработки.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала была использована быстрорежущая сталь P6M5. Образцы прошли термообработку, включающую в себя закалку при

температуре 1280°C и трехкратный отпуск при температуре 560°C.

Комплексная ионно-плазменная обработка, состоящая из ионного азотирования с использованием плазменного источника с накалимым катодом (ПИНК) и последующего нанесения защитного многослойного покрытия системы (TiAl)N, проводилась в модернизированной вакуумной установке ННВ-6.6 И1 (рис. 1). Процесс комплексной обработки осуществлялся в едином технологическом цикле, то есть процессы ионного азотирования и нанесения покрытия проводились последовательно в одной вакуумной камере.

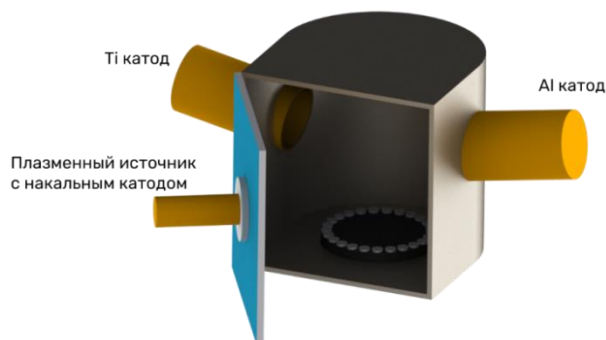


Рис. 1. Схема модернизированной установки ННВ-6.6 И1
Fig. 1. Schematic diagram of the modernized installation NNV-6.6 I1

Процесс ионного азотирования с ПИНК проводился при различных температурных режимах, которые регулировались при помощи технологических параметров, а именно отрицательного смещения потенциала на подложке, тока разряда плазменного источника и состава газа. Используемые температурные режимы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технологические режимы ионного азотирования
Table 1. Technological modes of ion nitriding

Технология	Смещение потенциала, В	Ток разряда, А	Состав газа Ar/N ₂ , %	Температура, °С
T1	400	40	50/50	315
T2	600	30	70/30	400
T3	550	50	50/50	475
T4	450	20	70/30	240

Нанесение многослойного покрытия (TiAl)N проводилось при одновременном распылении с катодом из титана и алюминия. Для создания слоев TiAl/TiAlN использовались инертный газ аргон и смесь газов аргона и азота соответственно. В процессе нанесения покрытия использовались следующие режимы: $I_{Ti} = 90$ А, $I_{Al} = 60$ А, $U_{П} = 180$ В, $P = 10^{-2}$ Па. Вращение стола, на котором закреплены образцы, составляло 1,5 об/мин.

Перед проведением комплексной ионно-плазменной обработки образцы нагревались и проходили процесс постепенной ионной очистки.

Измерение микротвердости поверхности производилось на микротвердомере EMCO DuraScan-50 с нагрузкой 50 г и определялось по методу Виккерса.

Глубина азотированного слоя измерялась методом измерения микротвердости по глубине. Значения измерялись каждые 5-10 мкм по глубине. Итоговые значения являлись средним арифметическим из пяти замеров.

Толщина покрытия определялась на установке CSM Calotest.

Определение адгезионной прочности производилось склерометрическим методом на установке CSM MicroScratch Tester. Выявление критической нагрузки, коэффициента упругого восстановления и других параметров рассчитывались при помощи программного обеспечения Scratch. В работе использовался алмазный индентор Rockwell D-027 с радиусом 200 мкм, при увеличивающейся нагрузке от 0,03 до 30 Н с длиной царапины 5 мм и скоростью 1,67 мм/мин.

Определение износостойкости образцов проводилось на установке Nanovea Tribometer с использованием стандартной методики «шар по диску».

Полученные результаты и их обсуждение

Для определения влияния продолжительности процесса ионного азотирования были проведены исследования при 15, 30, 60, 120 и 180 мин.

Результаты измерения микротвердости поверхности приведены в табл. 2.

Таблица 2. Микротвердость поверхности образцов после ионного азотирования, HV_{0.1}
Table 2. Surface microhardness of samples after ion nitriding, HV_{0.1}

Технология	Время				
	15 мин	30 мин	60 мин	120 мин	180 мин
T1	870	950	1040	1220	1250
T2	860	980	1150	1250	1430
T3	870	1010	1250	1430	1520
T4	850	855	860	960	1080

Из полученных результатов видно, что при увеличении времени азотирования поверхности ее микротвердость также увеличивается, что объясняется повышением концентрации азота в поверхностном слое. Однако следует учитывать, что чрезмерно высокая микротвердость может привести к охрупчиванию поверхности, что отрицательно сказывается на ее адгезионных свойствах. Кроме того, можно заметить, что технологии с более высокими температурами (технологии T2 и T3) имеют более высокую микротвердость.

Азотирование при времени в 15 мин не оказывает значительного влияния на микротвердость по сравне-

нию с необработанным образцом. При этом азотирование при температуре в 240°C практически не влияет на микротвердость. Исходя из этого, можно сделать вывод, что для достижения наилучшего результата целесообразно применять технологии Т2 и Т3. Однако для получения более точной зависимости технологических режимов на адгезионную прочность покрытия необходимо провести соответствующие испытания. Для указанных технологий результаты склерометрических испытаний представлены в табл. 3, 4 и на рис. 2, 3 соответственно.

Из расчетов склерометрических показателей видно, что с увеличением продолжительного азотирования увеличивается критическая нагрузка разрушения покрытия, однако результаты коэффициента упругого восстановления We показывают, что для более продолжительных режимов упругое восстановление после снятия нагрузки составляет примерно 30–40%, а для покрытия времени 30–60 мин порядка 50–60%.

Анализ влияния продолжительности ионного азотирования на физико-механические свойства поверхности показал, что с увеличением времени свойства меняются нелинейно. Поскольку более продолжительный процесс ионного азотирования оказывает существенное влияние на охрупчивание поверхности, адгезионные свойства в таком случае ухудшаются.

Таблица 3. Количественные результаты склерометрических испытаний для технологии Т2

Table 3. Quantitative sclerometric test results for T2 technology

Время, мин	L_c , Н	$F_{n_{\max}}$, Н	$F_{n_{30}}$, мкМ	We , %
180	15	12,1	8	40,2
120	15,2	11,8	8,5	25
60	14,9	11,2	9,9	52
30	12,8	12,8	10,5	57
15	9,8	14,2	9,3	37

Таблица 4. Количественные результаты склерометрических испытаний для технологии Т3

Table 4. Quantitative sclerometric test results for T3 technology

Время, мин	L_c , Н	$F_{n_{\max}}$, Н	$F_{n_{30}}$, мкМ	We , %
180	18,5	9,3	8,4	31,1
120	16	8,1	4,8	31,6
60	16,4	10,8	7,3	50,1
30	12,6	13,6	9,8	62
15	10,7	15,8	10,6	58,7

По результатам литературного анализа было определено, что наилучшей стойкостью обладают образцы с глубиной азотированного слоя в ~ 40 мкМ [13].

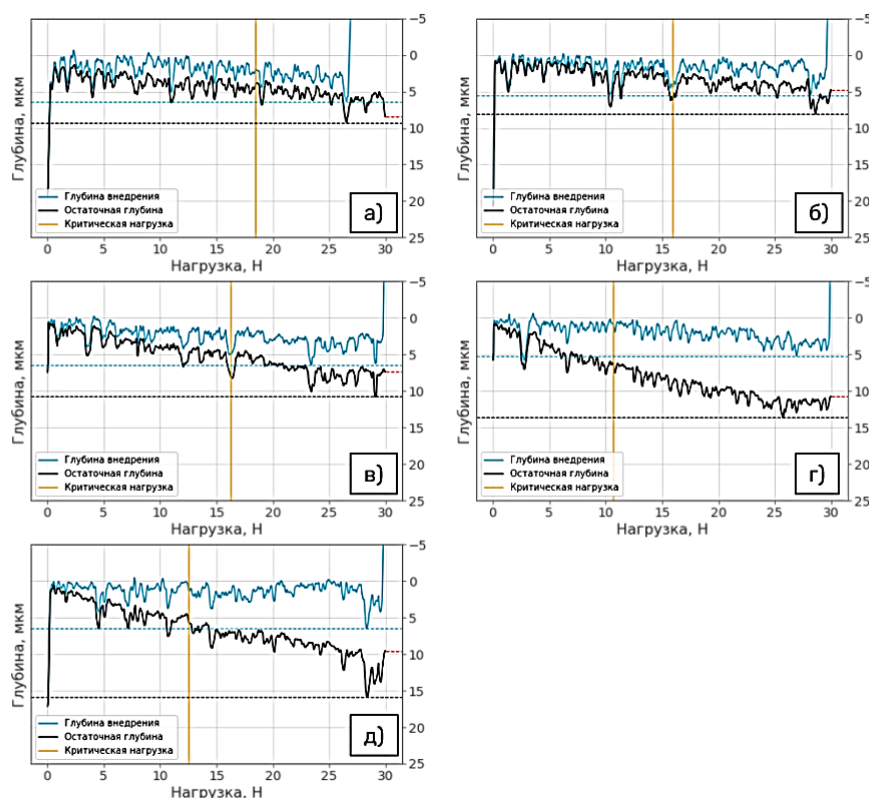


Рис. 2. Склерометрические испытания для технологии Т2 при времени азотирования: а – 180 мин; б – 120 мин; в – 60 мин; г – 30 мин; д – 15 мин

Fig. 2. Sclerometric tests for T2 technology at nitriding time: а is 180 min, б is 120 min, в is 60 min, г is 30 min, д is 15 min

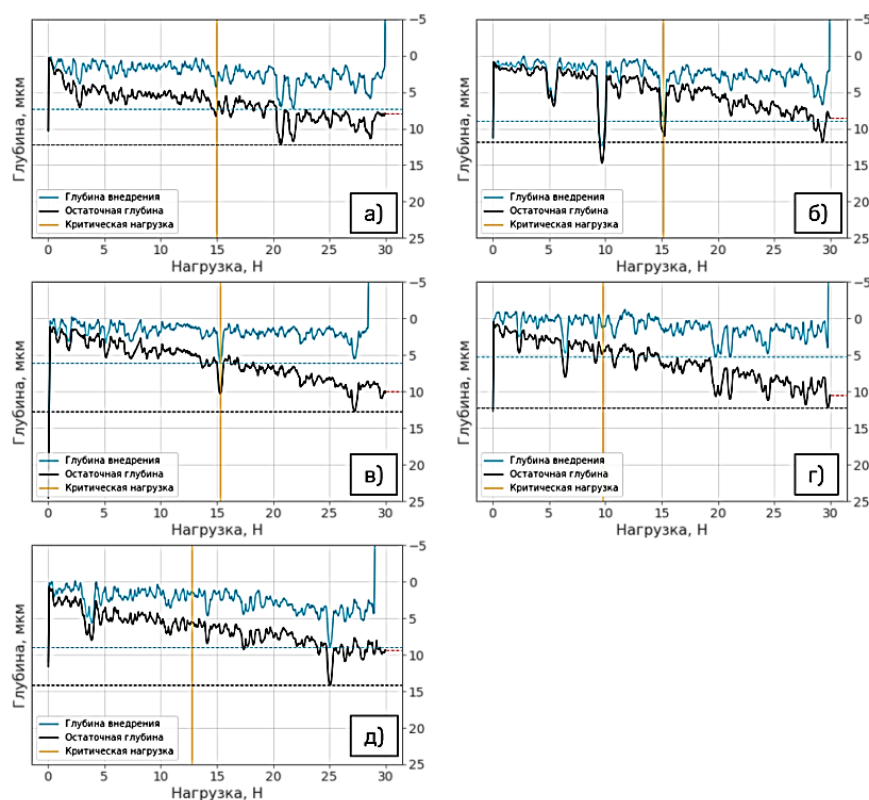


Рис. 3. Склерометрические испытания для технологии Т3 при времени азотирования: а – 180 мин; б – 120 мин; в – 60 мин; г – 30 мин; д – 15 мин

Fig. 3. Sclerometric tests for T3 technology at nitriding time: а is 180 min, б is 120 min, в is 60 min, г is 30 min, д is 15 min

Зная необходимую глубину и используя аппроксимацию глубины по времени, можно определить, что для технологии Т2 время азотирования для достижения диффузионного слоя в 40 мкм составляет 47 мин, а для технологии Т3 – 35 мин. Для верификации полученных данных были проведены измерения микротвердости по глубине (рис. 4).

Результаты показывают, что глубина азотирования для образцов, обработанных при $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин, составляет 45 мкм, а для образцов, обработанных при $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин – 43 мкм. Полученные значения отличаются от заданной глубины на 2–5%, а

значит, результаты являются достоверными. Поверхностная микротвердость для технологий 1 и 2 составила 1230 и 1272 $\text{HV}_{0.05}$ соответственно.

Результаты склерометрических испытаний представлены на рис. 5 и в табл. 5.

Результаты показали, что образец, обработанный технологией $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин, показал наилучшие результаты по критической нагрузке L_c , а также по максимальной глубине проникновения индентора и по глубине проникновения индентора при 30 Н.

Результаты трибологических исследований приведены на рис. 6.

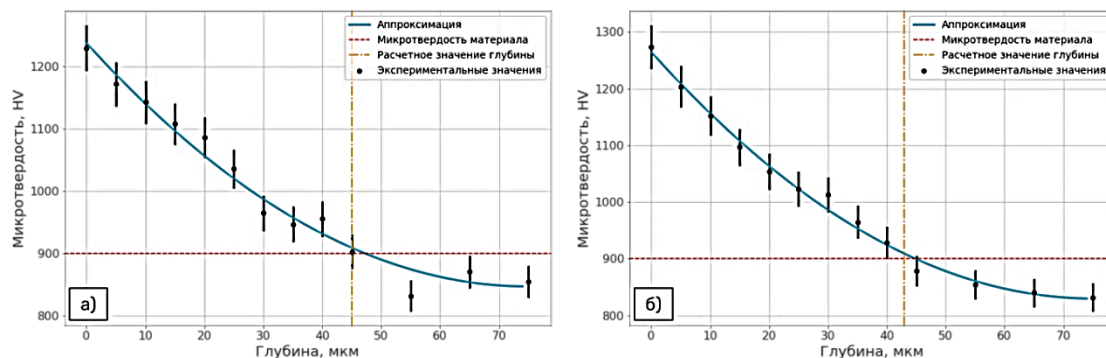


Рис. 4. Измерение микротвердости по глубине для образцов: а – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин

Fig. 4. Depth microhardness measurement for samples: а is $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

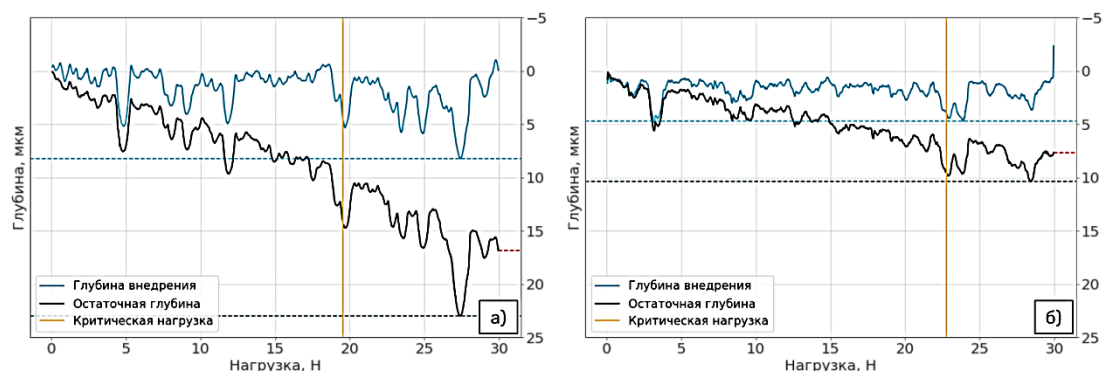


Рис. 5. Склерометрические испытания для технологий: а – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
Fig. 5. Sclerometric tests for: a is $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

Таблица 5. Количественные результаты склерометрических испытаний
Table 5. Quantitative sclerometric test results

Технология	L_c , Н	$F_{n_{\max}}$, Н	$F_{n_{30}}$, мкм	We , %
$T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин	19,5	23	16,8	64,2
$T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин	22,8	10,4	7,7	54,6

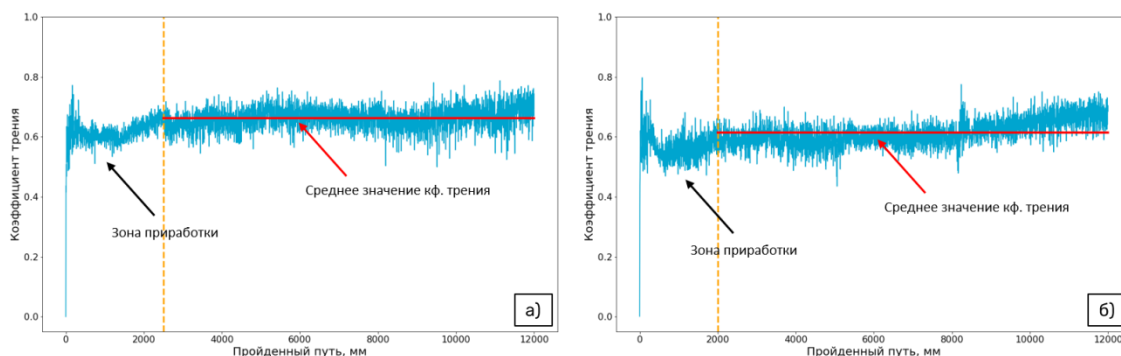


Рис. 6. Трибологические испытания для технологий: а – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
Fig. 6. Tribological testing for technologies: a is $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

Анализ результатов трибологических испытаний показал, что технология 1 имеет средний коэффициент трения 0,66, а технология 2 – 0,6. Для качественной оценки необходимо измерить удельную скорость износа, которая рассчитывается по формуле

$$Wr = \frac{\Delta m}{\rho \cdot l \cdot F_N}, \quad (1)$$

где Wr – удельная скорость износа, $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$; ρ – плотность материала ($0,0083 \text{ г/мм}^3$) для быстрорежущей стали Р6М5; l – общая длина пройденного пути шарика (226 м); F_N – средняя нормальная нагрузка, Н.

Разность масс определялась замерами до и после проведения испытаний и составила $14 \cdot 10^{-5}$ г для технологии 1 и $11 \cdot 10^{-5}$ г для технологии 2. Средняя нормальная нагрузка в результате испытаний составила 2,65 и 2,49 Н соответственно. В результате интенсивность изнашивания для обоих образцов отличилась

незначительно и составила для технологий $2,81 \cdot 10^{-5}$ и $2,38 \cdot 10^{-5}$ соответственно (рис. 7). Характер износа можно определить по трекам (рис. 8).

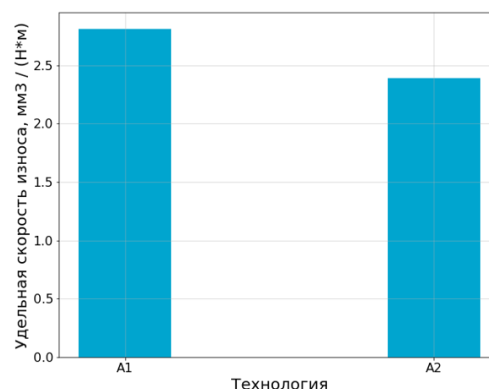


Рис. 7. Значения интенсивности изнашивания:
а – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
Fig. 7. Wear rate values: a is $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

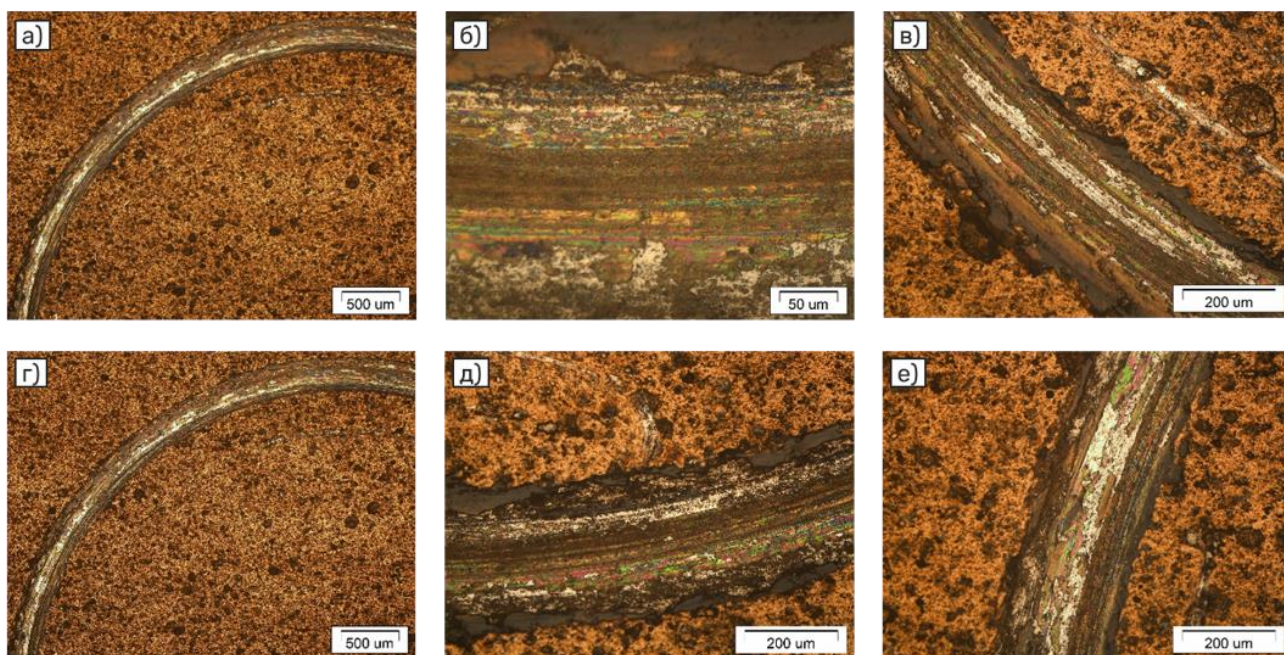


Рис. 8. Треки износа для технологий: а–в – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; г–е – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
 Fig. 8. Wear tracks for technologies: [а, б, в]: $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, [г, д, е] $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

По трекам видно, что наблюдается смешанный механизм износа, который сочетает в себе адгезионное и абразивное воздействие. Это подтверждается наличием участков сцепления и явных царапин от твердых частиц вдоль трека износа. Особенностью является характер разрушения участков адгезионного взаимодействия, который происходит без выраженного течения материала и имеет хрупкий характер из-за наличия напряжений в материале вследствие образования твердого раствора внедрения азота, что приводит к уменьшению пластичности слоев.

По совокупности исследуемых физико-механических характеристик определено, что технология с режимами обработки $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин обладает сравнительно наивысшими свойствами.

Заключение

Таким образом, впервые изучено влияние температуры детали и продолжительности процесса ионного азотирования на микротвердость, адгезионную прочность и износостойкость поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки. Установлено, что по совокупности исследуемых физико-механических характеристик определено, что технология с режимами обработки в плазменном источнике с накальным катодом при технологических режимах $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин обладает интенсивностью изнашивания в $11 \cdot 10^{-5}$ г и адгезионной прочностью в 19,5 Н.

Список источников

1. Власов С.Н., Пикмирзин М.Ю., Власова А.С. Анализ методов упрочнения металлорежущего инструмента // Парадигма. 2019. №. 2. С. 113-119.

2. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
3. Формирование геометрии кромки режущего инструмента методом лазерной абляции и влияние лазерной обработки на стойкость пластин из Р6М5 / Федоров С.В. и др. // Илм-фан ва инновацион ривожланиш/Наука и инновационное развитие. 2020. Т. 3. №. 5. С. 80-85.
4. Мигранов М.Ш., Мухамадеев В.Р., Мигранов А.М. Исследование триботехнических характеристик материалов и покрытий для металлорежущего инструмента // Трибология – машиностроению. 2018. С. 338-341.
5. Рамазанов К.Н., Будилов В.В., Вафин Р.К. Азотирование быстрорежущей стали Р6М5 в тлеющем разряде с наложением магнитного поля // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №. 5. С. 39-42.
6. Будилов В.В., Рамазанов К.Н., Вафин Р.К. Влияние скрещенных электрических и магнитных полей на ионное азотирование в тлеющем разряде // Физика и химия обработки материалов. 2011. №. 6. С. 10-15.
7. Золотов И.В., Рамазанов К.Н. Влияние азотирования в тлеющем разряде с полым катодом на структуру и свойства поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1 // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20. №. 2 (72). С. 23-28.
8. Вафин Р.К. Влияние ионного азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем на структуру и фазовый состав инструментальных сталей Р6М5 и Х12: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Вафин Руслан Каримович. Уфа, 2013. 142 с.

9. Gómez-Vagas O. A. et al. TiN and Boride Layers Obtained by Dehydrated Paste-Pack Boriding and PVD Treatments Formed on AISI M2 Steel // *Microscopy and Microanalysis*. 2019, vol. 25, no. S2, pp. 770-771.
10. Naeem M. et al. Wear and corrosion studies of duplex surface-treated AISI-304 steel by a combination of cathodic cage plasma nitriding and PVD-TiN coating // *Ceramics International*. 2022, vol. 48, no. 15, pp. 21473-21482.
11. Das K. et al. Effect of Pre-treatment and Duration of Pulse Plasma Nitriding on Duplex Plasma Treatment by Physical Vapor Deposition of TiN on AISI D2 Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023, pp. 1-13.
12. Moreno-Bárcenas A. et al. Synergistic effect of plasma nitriding and bias voltage on the adhesion of diamond-like carbon coatings on M2 steel by PECVD // *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 374, pp. 327-337.
13. Chang Y.Y., Chao L.C. Effect of substrate bias voltage on the mechanical properties of AlTiN/CrTiSiN multilayer hard coatings // *Vacuum*. 2021, vol. 190, 110241.
14. Serra P. L. C. et al. A review of duplex treatment effect on high-speed steel tools // *J Multidiscip Eng Sci Technol*. 2020, vol. 7, no. 4.
15. Quinones-Salinas M.A., Mercado-Solis R.D. Comparative study of three methods for measuring thickness of PVD hard coatings // *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2015, vol. 9, no. 6, pp. 493-509.
16. Libório M. S. et al. Enhanced surface properties of M2 steel by plasma nitriding pre-treatment and magnetron sputtered TiN coating // *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2020, vol. 14, no. 4, pp. 288-306.
17. Díaz-Guillén J.C. et al. Duplex plasma treatment of AISI D2 tool steel by combining plasma nitriding (with and without white layer) and post-oxidation // *Surface and Coatings Technology*. 2020, vol. 385, 125420.
18. Mercado-Solis R.D. et al. Micro-scale abrasive wear testing of CrN duplex PVD coating on pre-nitrided tool steel // *Materials Research*. 2017, vol. 20, pp. 1092-1102.
19. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 379 с.
- resistant coatings: textbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 336 p. (In Russ.)
3. Fedorov S. V. et al. Formation of cutting tool edge geometry by laser ablation and the influence of laser treatment on the durability of P6M5 inserts. *Nauka i innovacionnoe razvitie* [Science and Innovation Development], 2020;3(5):80-85.
4. Migranov M. Sh., Mukhamadeev V. V. R., Migranov A. M. Investigation of tribotechnical characteristics of materials and coatings for metal-cutting tools. *Tribologiya – mashinostroeniye* [Tribology for Mechanical Engineering], 2018;338-341. (In Russ.)
5. Ramazanov K. N., Budilov V. V., Vafin R. K. Nitriding of high-speed steel P6M5 in a glow discharge with a superimposed magnetic field. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2010;(5):39-42. (In Russ.)
6. Budilov V. V., Ramazanov K. N., Vafin R. K. Influence of crossed electric and magnetic fields on ion nitriding in glow discharge. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2011;(6):10-15. (In Russ.)
7. Zolotov I. V., Ramazanov K. N. Influence of nitriding in the glow discharge with a hollow cathode on the structure and surface properties of titanium alloys BT6 and BT3-1. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University], 2016;20(2):23-28. (In Russ.)
8. Vafin R. K. Vliyanie ionnogo azotirovaniya v tleyushchem razryade s magnitnym polem na strukturu i fazovyy sostav instrumentalnykh stalej R6M5 i H12: dis. ... kand. tekhn. nauk [Influence of ion nitriding in glow discharge with magnetic field on structure and phase composition of tool steels P6M5 and X12. Ph.D. dissertation]. Ufa, 2013. 142 p. (In Russ.)
9. Gómez-Vagas O. A. et al. TiN and Boride Layers Obtained by Dehydrated Paste-Pack Boriding and PVD Treatments Formed on AISI M2 Steel. *Microscopy and Microanalysis*. 2019;25(S2):770-771.
10. Naeem M. et al. Wear and corrosion studies of duplex surface-treated AISI-304 steel by a combination of cathodic cage plasma nitriding and PVD-TiN coating. *Ceramics International*. 2022;48(15):21473-21482.
11. Das K. et al. Effect of Pre-treatment and Duration of Pulse Plasma Nitriding on Duplex Plasma Treatment by Physical Vapor Deposition of TiN on AISI D2 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023;1-13.
12. Moreno-Bárcenas A. et al. Synergistic effect of plasma nitriding and bias voltage on the adhesion of diamond-like carbon coatings on M2 steel by PECVD. *Surface and Coatings Technology*. 2019;374:327-337.
13. Chang Y.Y., Chao L.C. Effect of substrate bias voltage on the mechanical properties of AlTiN/CrTiSiN multilayer hard coatings. *Vacuum*. 2021;190:110241.

References

1. Vlasov S.N., Pikmirzin M.Yu., Vlasova A.S. Analysis of methods of metal-cutting tool hardening. *Paradigma* [Paradigm], 2019;(2):113-119. (In Russ.)
2. Vereshchaka A. S. *Rabotospособnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiyami: ucheb. posobie* [Workability of cutting tools with wear-

14. Serra P. L. C. et al. A review of duplex treatment effect on high-speed steel tools. *J. Multidiscip Eng. Sci. Technol.* 2020;7(4).
15. Quinones-Salinas M. A., Mercado-Solis R. D. Comparative study of three methods for measuring thickness of PVD hard coatings. *International Journal of Surface Science and Engineering.* 2015;9(6):493-509.
16. Libório M. S. et al. Enhanced surface properties of M2 steel by plasma nitriding pre-treatment and magnetron sputtered TiN coating. *International Journal of Surface Science and Engineering.* 2020;14(4):288-306.
17. Díaz-Guillén J. C. et al. Duplex plasma treatment of AISI D2 tool steel by combining plasma nitriding (with and without white layer) and post-oxidation. *Surface and Coatings Technology.* 2020;385:125420.
18. Mercado-Solis R. D. et al. Micro-scale abrasive wear testing of CrN duplex PVD coating on pre-nitrided tool steel. *Materials Research.* 2017;20:1092-1102.
19. Grigoriev S. N., Tabakov V. P., Volosova M. A. *Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti kontaktnyh ploshchadok rezhushchego instrumenta: monografiya* [Technological methods to improve the wear resistance of contact areas of cutting tools: monograph]. Stary Oskol: TNT, 2011, 379 p. (In Russ.)

Поступила 27.04.2024; принята к публикации 29.04.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 27/04/2024; revised 29/04/2024; published 24/12/2024

Нагимов Рустем Шамилевич – аспирант, ассистент,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: r.sh.nagimov@gmail.com. ORCID 0000-0002-5854-3396

Вафин Руслан Каримович – кандидат технических наук, доцент,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: vafinrk@mail.ru. ORCID 0000-0003-3222-049X

Rustem Sh. Nagimov – Postgraduate Student, Assistant,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: r.sh.nagimov@gmail.com. ORCID 0000-0002-5854-3396

Ruslan K. Vafin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: vafinrk@mail.ru. ORCID 0000-0003-3222-049X