

Научная статья

УДК 621.785.53.062

doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10

Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом

Лариса Георгиевна Петрова^{1✉}, д.т.н.,

Владимир Алексеевич Александров², к.т.н.,

Виктор Максимович Вдовин³, мл. науч. сотрудник,

Пётр Евгеньевич Демин⁴, к.т.н.

^{1,2,3,4} *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия*

³ *НПО Лавочкина*

¹ petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>

² met_madi@mail.ru

³ vdovin_victor@bk.ru

⁴ petr-demin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8469-1432>

Аннотация. Рассмотрено исследование метода газового азотирования, позволяющего получать качественные диффузионные слои в быстрорежущей стали Р6М5 на базе зоны внутреннего азотирования без хрупкой нитридной зоны. Приведены результаты исследований фазового состава азотированной стали при изменении азотного потенциала атмосферы при разбавлении аммиака. Показано повышение стойкости азотированного инструмента при сверлении по конструкционной стали и титановому сплаву, что связано с дисперсионным упрочнением зоны внутреннего азотирования нитридами вольфрама.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, режущий инструмент, газовое азотирование, азотированный слой, азотный потенциал

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

Для цитирования: Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №1(127). – С. 3-10. doi:10.30987/2223-4608-2022-1-3-10.

Original article

Hardening of a quick-speed steel tool through nitration process with nitrogen controlled potential

Larisa G. Petrova^{1✉}, IR DR

Vladimir A. Alexandrov², Cand. Sc. Engineering,

Viktor M. Vdovin³, junior research associate

Pyotr E. Demin⁴, Cand. Sc. Engineering

^{1,2,3,4} *Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia*

³ *Lavochkin's Research-and-production Association*

Abstract. The study of the gas nitriding method, which allows obtaining high-quality diffuse layers in high-speed steel P6M5 on the basis of an internal nitrogen hardening zone with no brittle nitride zone, has been viewed. Research results of phase composition of nitrided steel with a change in the nitrogen potential of the atmosphere during dilution of ammonia are presented. Nitrided tool increased resistance during drilling constructional steel and titanium alloy, which is due to precipitation hardening treatment of the internal nitrogenization zone using tungsten nitrides, is given.

Keywords: high-speed steel, toolpiece, gas nitriding, nitration case, nitrogen potential

Acknowledgements: The material was prepared within the framework of scientific research under project no. FSFM 2020 0011 (2019-1342), experimental studies were carried out using the equipment of the MADI Centre of collective usage.

For citation: Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Increasing the durability of high-speed steel tools during nitriding with controlled nitrogen potential // Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, №. 1(127), pp. 3-10. doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10.

Введение

На сегодняшний день постоянно развивающаяся промышленность ужесточает требования к ресурсу работы инструмента, предназначенного для обработки различных деталей машин и агрегатов. Наиболее жесткие требования предъявляются к инструменту из быстрорежущих сталей [1, 2], работающему в сложных условиях, где требуется не только высокая износостойкость, теплостойкость, но и высокая коррозионная стойкость, наряду со стойкостью к ударным нагрузкам. Инструменты, отработавшие свой ресурс, идут на переработку, поскольку дальнейшее использование невозможно ввиду утраты требуемых свойств и изменения геометрических размеров вследствие износа.

Таким образом, повышение стойкости быстрорежущего инструмента способствует ресурсосбережению, поскольку обеспечивает экономию металлов, используемых для легирования сталей, таких как вольфрам и молибден, что делает актуальным исследование по совершенствованию технологий упрочнения режущих частей инструмента. Преимущества поверхностного упрочнения заключаются не только в снижении расхода легирующих элементов, но и в сохранении вязкой сердцевины, что обеспечивает стойкость к ударным нагрузкам.

В настоящее время используется множество разнообразных способов поверхностного упрочнения инструмента, обладающих своими преимуществами и недостатками [3 – 8]. Особое место среди таких процессов занимает химико-термическая обработка (ХТО) [9 – 11] и, прежде всего, азотирование, которое широко применяется для повышения надежности и долговечности широкой номенклатуры сталей, как конструкционных, так и инструментальных.

Одним из главных достоинств процесса

азотирования является возможность управления фазовым составом азотированных слоев в различных сталях в зависимости от требуемых свойств поверхности. Регулирование строения диффузионного слоя наиболее эффективно осуществляется путем контроля азотного потенциала насыщающей среды. Преимуществом процесса применительно к быстрорежущим сталям является относительно низкая температура насыщения, что позволяет сохранить сформированную базовой термообработкой структуру сердцевины.

Недостатком традиционного печного азотирования является большая длительность процесса, одним из путей решения проблемы является азотирование в плазме тлеющего разряда, что существенно ускоряет насыщение стали азотом благодаря интенсификации всех элементарных процессов ХТО [12].

Оптимальный фазовый состав азотированной режущей кромки, обеспечивающий повышение стойкости инструмента, может отличаться в зависимости от условий резания, типа и размера инструмента, а также обрабатываемого материала. Так, для обработки пластмасс и цветных сплавов в быстрорежущей стали P6M5 следует получать диффузионный слой на основе нитридных фаз ($\epsilon+\gamma'$), а для обработки сталей – на основе твердого раствора [9].

В работе [10] предложено формировать заданное строение слоя путем разбавления аммиака продуктами его диссоциации, что позволило определить индивидуальные режимы азотирования для инструмента разного типа-размера. Однако данным способом нельзя подвергать упрочнению инструмент диаметром менее 8 мм, так как при этом выкрашиваются режущие кромки повышенной кривизны. Для малоразмерного инструмента, в частности, для тонких сверл с ограничениями по толщине получаемого упрочнённого слоя требуются особые условия процесса.

Целью настоящей работы является иссле-

дование строения азотированного слоя в быстрорежущей стали в зависимости от величины азотного потенциала насыщающей среды, а также определение оптимальных параметров процесса для повышения стойкости сверл при обработке среднеуглеродистой стали и титана.

Материалы и методы

Исследования проводили на образцах и

сверлах диаметром 1,0 мм и 5,0 мм (рис. 1) из быстрорежущей инструментальной стали Р6М5, химический состав которой по ГОСТ 19265-73 приведен в табл. 1.

Образцы стали и сверла использовали в состоянии после стандартной термообработки (закалки и трехкратного отпуска), которая формирует структуру режущей кромки стали с дисперсными карбидами вольфрама в твердом растворе (рис. 2, а).

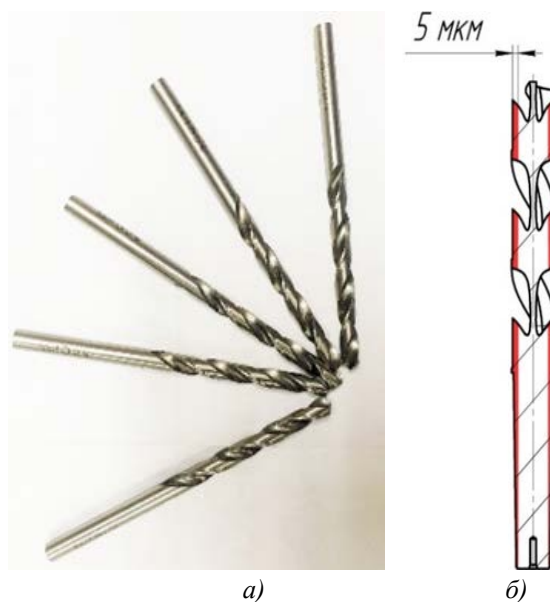


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) исследуемого сверла

1. Химический состав стали Р6М5 по ГОСТ 19265-73

Содержание элемента, % масс.											
C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Co	Ni	Cu	S	P
0,82...0,90	0,2...0,5	0,2...0,5	3,8...4,4	5,5...6,5	1,7...2,1	4,8...5,3	≤0,5	≤0,6	≤0,25	≤0,025	≤0,03

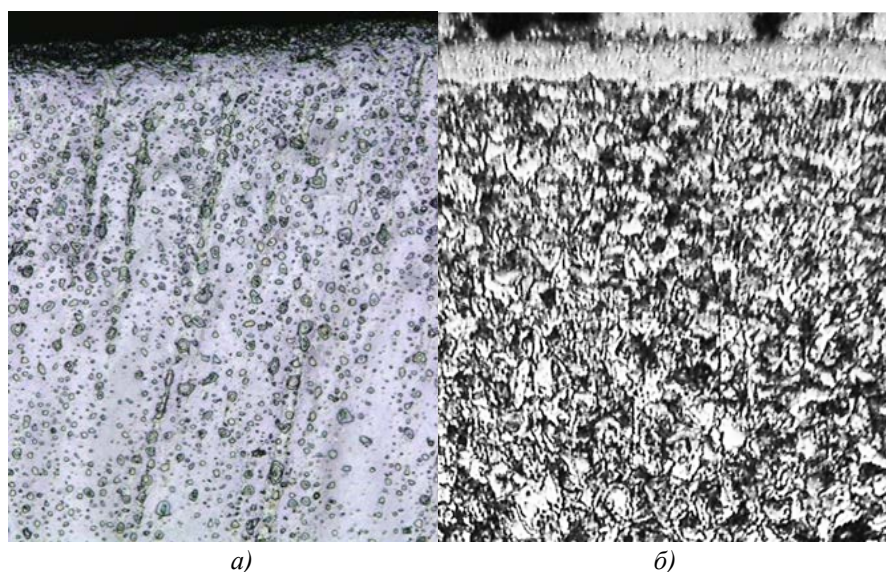


Рис. 2. Микроструктура стали Р6М5:

а – после стандартной термообработки; б – после азотирования в чистом аммиаке

Азотирование проводили на лабораторной установке в муфельной печи мощностью 1,5 кВт, содержащей контейнер для азотирования объёмом $3 \times 10^{-3} \text{ м}^3$. Температура процесса $540 \text{ }^\circ\text{C}$ выбрана ниже температуры отпуска ($550 \text{ }^\circ\text{C}$), чтобы обеспечить сохранение твердости матрицы на исходном уровне. Насыщение вели в среде аммиака, разбавленного водородом; варьирование степени диссоциации аммиака достигалось путем изменения состава атмосферы. Регулирование состава атмосферы в печи осуществляли при помощи блока управления дозированием газовых компонентов. Состав атмосферы на входе и температура в печи устанавливались с использованием программного обеспечения и поддерживались автоматически с использованием контроля технологических параметров процесса.

Азотный потенциал атмосферы в печи π_N^β оценивали по объёмному количеству аммиака в отходящих из печи газах по номограмме, построенной по формуле для определения активности атмосферы:

$$A = F(\beta) [\pi_{N\beta} - \pi_N^0], \quad (1)$$

где π_N^0 – равновесный азотный потенциал для α -фазы; β – объёмная доля диссоциированного аммиака на выходе из печи.

На основании предварительно проведенных исследований кинетики процесса выбрано время насыщения 1 ч, что обеспечивает получение упрочненного слоя на малоразмерном инструменте толщиной не более 5 мкм.

Микроструктуру азотированной стали изучали на поперечных микрошлифах методом металлографического анализа при помощи оптического микроскопа Axiovert 25 SA после электролитического травления в водном растворе щавелевой кислоты. Исследования тонкой структуры и фазового состава слоя проводили методом электронной микроскопии (СММ 2000), сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ Nano Educator) после электролитического травления и методом рентгеноструктурного анализа (ДРОН-3). Идентификация выделений, определение их размеров и объёмной доли проводились по изображениям на микродифракционных картинах и темнопольным изображениям, полученным в соответствующих рефлексах. Съёмки дифрактограмм проводили в монохроматическом $\text{FeK}\alpha$ -излучении.

Сравнительную оценку ресурса работы сверл, проазотированных с разным азотным потенциалом, проводили методом исследова-

ния степени затупления во время разделки отверстий по записи звука при помощи закрепленного на заготовке микрофона. Механическую обработку стальной заготовки (Ст3) толщиной 2 мм проводили на универсальном сверлильном станке по ГОСТ 16523-86 (рис. 3, а).

Определяли число отверстий, выполненных сверлом до появления характерного звука при превышении критического значения амплитуды звуковых волн, которые фиксировались и записывались на персональный компьютер.

Натурные испытания сверл проводили на станке Manford VH-610 (см. рис. 3, б) с числовым программным управлением Fanuc в производственных условиях АО «НПО Лавочкина». Стойкость инструмента определяли по количеству просверленных отверстий до выхода из строя при сверлении по стали 30ХГСА (заготовка $38 \times 46 \times 182 \text{ мм}$) по ГОСТ 19903-74 и по титановому сплаву ВТ-23 (лист толщиной 4 мм) по ОСТ 1 90013. Параметры резания: скорость $v = 3 \text{ м/мин}$; число оборотов $S = 455 \text{ об/мин}$; подача $F = 14 \text{ мм/мин}$; подача на оборот $Fz = 0,015 \text{ мм/об}$.



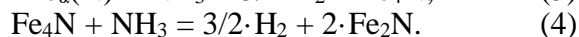
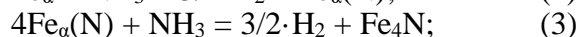
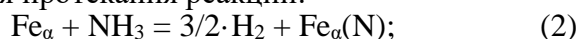
Рис. 3. Испытания на сверление листа из стали Ст3 (а) и вид станка Manford VH-610 (б)

Результаты и обсуждение

Традиционное азотирование быстрорежущей стали в аммиаке обладает существенным недостатком, поскольку формирует на поверхности хрупкую нитридную зону (см. рис. 2, б). Слой при резании легко осыпается, что приводит к катастрофическому разрушению режущей кромки. Поэтому при проведении процесса азотирования необходимо создать такие условия, которые приведут к невозможности образования нитридной корки.

Для предотвращения образования сплошной зоны химических соединений нитридов используются технологические приемы, основанные на изменении азотного потенциала атмосферы: понижение давления и разбавление аммиака, например, инертным газом или продуктами его диссоциации.

Согласно исследованиям Александра В.А. [10] формирование различных фаз при азотировании быстрорежущей стали при $t < 590\text{ }^\circ\text{C}$ в среде аммиака и продуктов его диссоциации ($\text{NH}_3 + \text{N}_2 + \text{H}_2$) зависит от направления протекания реакций:



Направление этих реакций и, следовательно, образование фаз в азотированном слое, определяется соотношением парциальных давлений водорода и аммиака в системе, т.е. азотным потенциалом атмосферы π_N , который зависит от температуры процесса (рис. 4).

Диаграмма на рис. 4 может быть также использована для оценки пограничных значений азотного потенциала при образовании твердого раствора $\text{Fe}_\alpha(\text{N})$ и нитридных фаз при насыщении в среде аммиака, разбавленного водородом.

Согласно данной схеме, при азотировании с низким азотным потенциалом можно получать азотированные слои на базе α -твердого раствора. Однако отсутствие нитридных фаз не позволяет существенно повысить твердость и износостойкость инструмента из быстрорежущей стали. Достичь упрочнения и при этом избежать больших напряжений, приводящих к повышенной хрупкости поверхностного слоя можно путем формирования азотированного слоя на базе зоны внутреннего азотирования (α -твердого раствора с выделениями нитридов). Оценка показывает, что для этого при выбранной температуре азотирования $540\text{ }^\circ\text{C}$

значения азотного потенциала должны быть в интервале от 0,3 до 2,0.

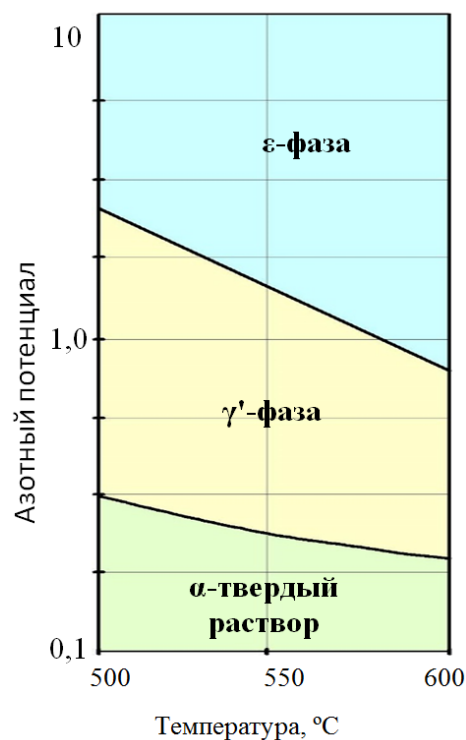


Рис.4. Диаграмма равновесного азотного потенциала атмосферы для различных фаз системы Fe-N в зависимости от температуры

Ввиду высокой концентрации углерода и легирующих элементов в исследуемой стали область γ' -фазы значительно сужается, а область α -фазы расширяется, при этом появляется термодинамическая возможность образования нитридов легирующих элементов.

В табл. 2 приведены определяемые дифракционным анализом фазы на поверхности стали Р6М5, азотированной при различных значениях азотного потенциала, что, в целом, соответствует оцененному теоретически фазовому составу на диаграмме (см. рис. 4).

2. Влияние азотного потенциала среды на фазовый состав азотированного слоя стали Р6М5 и на ресурс работы сверл

π_N	Фазы на поверхности	Число отверстий до затупления
2,70	ε	—
2,06	$\varepsilon + \gamma' + \alpha$	22
1,75	$\gamma' + \alpha$	57
0,98	$\alpha + \gamma$	49
0,52	α	13

На рис. 5, *a* видно, что нитридная зона ϵ -фазы, формируемая при азотном потенциале $\pi_N = 2,7$, выявляется микроструктурным анализом. При $\pi_N < 2$ сплошной нитридной корки не образуется (см. рис. 5, *б*, *в*).

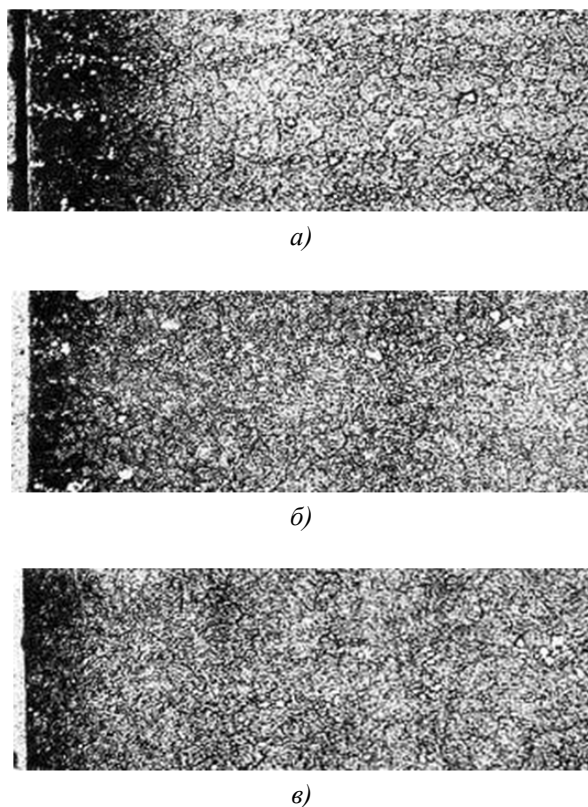


Рис. 5. Микроструктуры стали Р6М5, азотированной при разном азотном потенциале:

a – $\pi_N = 2,7$; *б* – $\pi_N = 1,75$; *в* – $\pi_N = 0,52$

Из табл. 2 следует, что непосредственно на поверхности нитридов легирующих элементов не обнаруживается, тогда как в зоне внутреннего азотирования на расстоянии 10 мкм от поверхности определяются наноразмерные (не более 10 нм) выделения нитридов вольфрама в твердом растворе (рис. 6).

При этом на микродифракционной картине индицируются рефлексы, относящиеся к плоскостям (335) α -фазы и (001) нитрида WN. Подобное строение зоны внутреннего азотирования является предпосылкой упрочнения поверхностного слоя, что обуславливает повышение износостойкости азотированного инструмента.

Испытания показали, что ресурс работы сверл, оцениваемый по изменению звука при сверлении отверстий, после азотирования увеличивается (рис. 7).

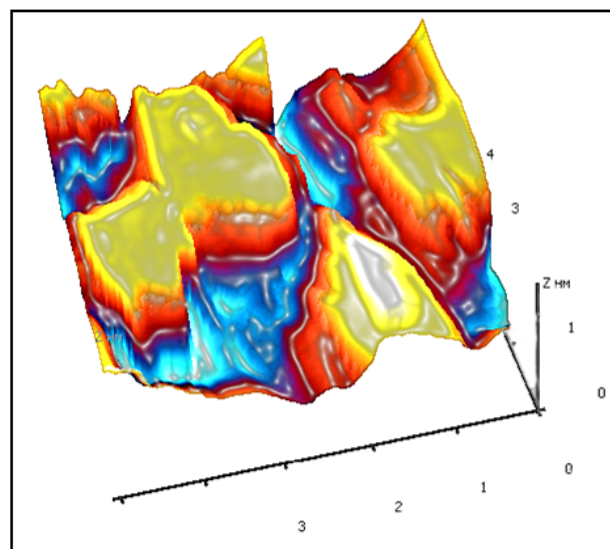


Рис. 6. Выявление частиц нитридов вольфрама в азотированном слое стали Р6М5 методом сканирующей зондовой микроскопии

При этом число выполненных отверстий до характерного звука затупления при достижении критической амплитуды звуковых колебаний (горизонтальная линия на рис. 7), зависит от азотного потенциала, т.е. определяется фазовым составом азотированного слоя.

Из табл. 2 видно, что наилучшим ресурсом обладает инструмент, азотированный при $\pi_N = 1,75$ и $\pi_N = 0,98$, когда формируется структура поверхностного слоя на базе зоны внутреннего азотирования. Сверло, азотированное при $\pi_N = 1,75$, обрабатывает в 4 раза больше отверстий по сравнению с неазотированным, которое нарежет лишь 14 отверстий до затупления.

Наличие ϵ -фазы (при $\pi_N = 2,06$) снижает ресурс азотированного инструмента, тем не менее число просверленных отверстий оказывается выше, чем при обработке не азотированным сверлом. Понижение азотного потенциала до $\pi_N = 0,52$ уменьшает ресурс инструмента до показателей неазотированной стали, что связано с малой толщиной слоя и низким уровнем упрочнения твердого раствора.

Проведение натурных испытаний на производстве подтвердило, что наилучшей стойкостью обладает инструмент, азотированный с азотным потенциалом $\pi_N = 1,75$: число отверстий до выхода азотированного сверла из строя увеличивается по сравнению с неазотированным сверлом при обработке стали в 2,25 раза, а титанового сплава – в 5 раз (рис. 8).



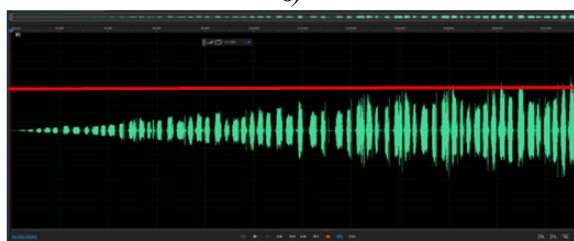
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Показания звуковых колебаний при разделке отверстий в стали Ст3 сверлами диаметром 5 мм: а – без азотирования; б – $\pi_N = 0,52$; в – $\pi_N = 0,98$; г – $\pi_N = 1,75$

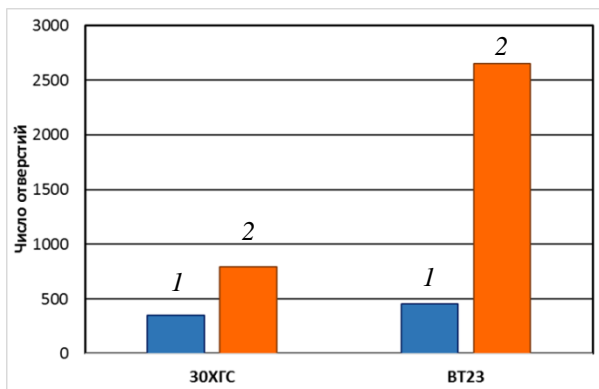


Рис. 8. Показатели стойкости инструмента при обработке стали и титанового сплава: 1 – не азотированное сверло; 2 – азотирование при $\pi_N = 1,75$

Выводы

1. Предлагаемый процесс азотирования быстрорежущей стали при $t = 540^\circ\text{C}$ в смеси аммиака и водорода оптимизирован по азотному потенциалу ($\pi_N = 1,75$), что позволяет сформировать диффузионный слой на базе зоны внутреннего азотирования с выделением дисперсных нитридов вольфрама и при отсутствии сплошной зоны хрупкой ϵ -фазы на поверхности.

2. Азотирование в данном режиме существенно увеличивает стойкость инструмента в условиях сверления по конструкционной стали и титановому сплаву, благодаря дисперсионному упрочнению зоны внутреннего азотирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адашкин, А.М., Кремнев, Л.С., Сапронов, И.Ю. Быстрорежущие стали нового поколения // Перспективные материалы. – 2014. – № 2. – С. 48-54.

2. Гурьев, А.М., Иванов, С.Г., Гурьев, М.А., Бердыченко, А.А., Черных, Е.В. Влияние режимов термической обработки на структуру и физико-механические свойства быстрорежущей стали // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 103-108.

3. Александров, В.А. Использование модифицированных сталей в различных видах режущего инструмента // Евразийское Научное Объединение. – 2020. – №12-2 (70). – С. 70-75.

4. Кремнев, Л.С., Виноградова, Л.А., Онегина, А.К., Сапронов, И.Ю. Особенности состава, структуры и свойств быстрорежущих сталей для металлорежущего инструмента с ионно-плазменными покрытиями на основе нитрида титана // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – №1 (679). – С. 4-9.

5. Афанасьева, Л.Е., Барабонова, И.А., Раткевич, Г.В. Лазерная наплавка быстрорежущей стали // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2018. – № 11. – С. 53-57.

6. Полетаев, В.А. Упрочнение сверл из быстрорежущей стали импульсной магнитной обработкой // NovaInfo.Ru. – 2017. – Т. 1. – № 73. – С. 43-47.

7. Упрочнение контактных поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей дисперсно-упрочненным композитным хромовым покрытием / С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – №12 (156). – С. 572-574.

8. Александров, В.А., Петрова, Л.Г., Сергеева, А.С., Косачев, А.В., Александров, В.Д. Повышение стойкости

режущего инструмента методом модифицирования поверхности с нанесением покрытий из соединений вольфрама в высокочастотном разряде // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – №1 (157). – С. 30-35.

9. Артингер, И. Инструментальные стали и их химико-термическая обработка: Справочник. – М.: Metallurgiya, 1982. – 312 с.

10. Александров, В.А., Богданов, К.В. Азотирование инструмента из высокохромистых и быстрорежущих сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 5. – 14 с.

11. Александров, В.А., Петрова, Л.Г., Сергеева, А.С., Александров, В.Д., Ахметжанова, Э.У. Комбинированные плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте // СТИН. – 2019. – № 3. – С. 13-16.

12. Петрова, Л.Г., Александров, В.А., Сергеева, А.С. Электрический разряд как технологический фактор интенсификации процессов химико-термической обработки изделий машиностроения // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2019. – №12 (102). – С. 36-43.

REFERENCES

1. Adaskin, A.M., Kremnev, L.S., Sapronov, I.Yu. / High-speed steels of the new generation. Perspektivnyemateriali, 2014, No. 2, pp. 48-54.

2. Guryev, A.M., Ivanov, S.G., Guryev, M.A., Berdychenko, A.A., Chernykh, E.V. Influence of heat treatment modes on the structure and physico-mechanical properties of high-speed steel. / Fundamental problems of modern materials science, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 103-108.

3. Alexandrov, V.A. The use of modified steels in various types of cutting tools. / Eurasian Scientific Association, 2020, No.12-2 (70), pp. 70-75.

4. Kremnev, L.S., Vinogradova, L.A., Onegina, A.K., Sapronov, I.Yu. Special features of the composition, structure and properties of high-speed steels for cutting tools with ion-plasma coatings based on titanium nitride. / Metal science and heat treatment, 2012, No.1 (679), pp. 4-9.

5. Afanasyeva, L.E., Barabonova, I.A., Radk000000000000000000000000000000000000evich, G.V. Laser surfacing of high-speed steel. / Mechanics and physics of processes on the surface and in contact with solids, parts of technological and power equipment, 2018, No. 11, pp. 53-57.

6. Poletaev V.A. Hardening of high speed steel drills by pulsed magnetic treatment. / NovaInfo.Ru, 2017, Vol. 1, No. 73, pp. 43-47.

7. Hardening of contact surfaces of tools made of high-speed steels with a dispersed-hardened composite chrome coating / S.Y. Zhachkin, A.I. Boldyrev et al. / Hardening technology and coatings, 2017, No.12 (156), pp. 572-574.

8. Alexandrov, V.A., Petrova, L.G., Sergeeva, A.S., Kosachev, A.V., Alexandrov, V.D. Increasing cutter power by surface modification with coating of tungsten compounds in a high-frequency discharge. / Hardening technology and coatings, 2018, vol. 14, No.1 (157), pp. 30-35.

9. Artinger, I. Tool steels and their chemical-thermal treatment. / Handbook, M.: Metallurgiya, 1982, 312 p.

10. Alexandrov, V.A., Bogdanov, K.V. Nitriding of tools from high-chromium and high-speed steels. / Uprochn. Tekhnol. Pokr., 2005, No. 5, 14 p.

11. Alexandrov, V.A., Petrova, L.G., Sergeeva, A.S., Alexandrov, V.D., Akhmetzhanova, E.U. Production of tool coatings by combined chemicothermal plasma methods. / STIN, 2019, No. 3, pp. 13-16.

12. Petrova, L.G., Alexandrov, V.A., Sergeeva, A.S. Electric discharge as technological factor of intensification of chemical-thermal treatment of engineering products. / Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2019, No.12 (102), pp. 36-43.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.10.2021; одобрена после рецензирования 16.11.2021; принята к публикации 05.12.2021.

The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 16.11.2021; accepted for publication 05.12.2021.