

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №7 (145). С.24-32.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 24-32.

Научная статья
УДК 621.785.53.062
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Модифицирование поверхности быстрорежущего инструмента совместным насыщением вольфрамом и азотом

Лариса Георгиевна Петрова¹, д.т.н.
Виктор Максимович Вдовин², аспирант
Александра Сергеевна Сергеева³, к.т.н.

^{1, 3} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

²АО «НПО Лавочкина, Химки, Россия

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

² vdovin_viktor@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2225-3559>

³ sergeevamadi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7897-6714>

Аннотация. Актуальность проводимого исследования обусловлена ужесточением требований к производительности быстрорежущего инструмента при повсеместном внедрении автоматических линий и станков с числовым программным управлением. Повышение ресурса работы инструмента необходимо также в целях снижения потребления дорогостоящих легирующих элементов, в первую очередь, вольфрама. Решение этих задач требует применения технологий упрочнения режущих поверхностей. Свою эффективность при поверхностном упрочнении различных сталей показали комбинированные процессы химико-термической обработки (ХТО), сочетающие диффузионное поверхностное легирование с насыщением азотом. В настоящей работе поставлена цель исследования процесса совместного поверхностного насыщения быстрорежущей стали вольфрамом и азотом для повышения стойкости малоразмерного инструмента. Экспериментальные исследования проводились на образцах и сверлах малого диаметра из стали Р6М5. Для лабораторных экспериментов по комбинированному процессу ХТО использовали установку для азотирования в многокомпонентных средах. Металлизацию вольфрамом осуществляли шликерным методом с параллельным азотированием инструмента в тлеющем разряде. Для определения режима, обеспечивающего необходимые температуры для насыщения вольфрамом и азотом, был проведен замер температур контрольных образцов стали на поверхности и в сердцевине при различных длительностях импульса тока в фазе прогрева. Металлографическим анализом установлено, что в результате ХТО в стали Р6М5 формируется поверхностный модифицированный слой толщиной 10...15 мкм. Структура слоя представляет собой зону внутреннего азотирования, которая состоит из твердого раствора вольфрама и азота в железе и дисперсных включений нитридов вольфрама. Дисперсионное и твердорастворное упрочнение обеспечивает двукратное повышение микротвердости модифицированного W-N слоя по сравнению с основной сплавом. Под упрочненным слоем выявлена переходная диффузионная зона азотистого мартенсита, которая создает плавный градиент микротвердости от слоя к сердцевине, что предохраняет его от охрупчивания, отслаивания и выкрашивания. Методом металлофизического моделирования по разработанной ранее методике проведен расчет показателя упрочнения модифицированного слоя (прироста предела текучести), который показал, что с увеличением концентрации вольфрама в слое растет доля компонента дисперсионного упрочнения частицами W₂N. Натурные испытания в условиях производства установили, что инструмент с упрочненным слоем обладает повышенной стойкостью. Стойкость сверл, определяемая по количеству просверленных отверстий до выхода из строя, повышается в 2,2 раза при сверлении по стали 30ХГСА и более чем в 7,0 раз при сверлении по титановому сплаву BT-23.

Ключевые слова: быстрорежущие стали, инструмент, диффузионная металлизация, азотирование

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., Вдовин В.М., Сергеева А.С. Модифицирование поверхности быстрорежущего инструмента совместным насыщением вольфрамом и азотом // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 24–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Modification of a high-speed cutting tool surface by combined tungsten steel and nitrogen saturation

Larisa G. Petrova¹, D.Eng.

Viktor M. Vdovin², PhD student

Alexandra S. Sergeeva³, PhD Eng.

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

² JSC "SPA Lavochkina, Khimki, Russia

¹ petrova_madi@mail.ru,

² vdovin_viktor@bk.ru,

³ sergeevamadi@yandex.ru

Abstract. Research significance is contingent on the requirement strengthening for high-speed cutting tools performance and widespread introduction of automatic lines and NC-machines. An increase of the tool service life is also necessary for the reduction of putting expensive alloying elements to use, primarily, tungsten. The solution of these problems requires the use of technologies for hardening cutting surfaces. Combined processes of thermochemical treatment processes, uniting diffusive surface alloying with nitrogen saturation have shown their effectiveness in the surface hardening of various steels. Now the aim is to study the process of combined surface tungsten and nitrogen saturation of high-speed steel for increasing small-sized tool durability. Experimental studies were carried out on samples and small-diameter drills made of P6M5 steel. For laboratory experiments connected with combined process of thermochemical treatment an installation for nitriding in multicomponent media was used. Metallization with tungsten was carried out by the slip method with parallel nitriding of the tool in a glow discharge. To determine the regime that provides the necessary temperatures for oxygen and nitrogen saturation, the temperatures of the control steel samples were measured on the surface and in the core at different durations of the current pulse in the heating phase. Metallographic analysis proved that thermochemical treatment resulted in a modified surface layer with a thickness of 10...15 microns, formed in P6M5 steel. The structure of the layer is an internal nitriding zone, which consists of a solid tungsten and nitrogen solution in iron and dispersed inclusions of tungsten nitrides. Dispersion and solid solution hardening provide a two-fold increase in the microhardness of the modified W-N layer compared to the alloy base. A transitional diffusion zone of nitrogenous martensite has been revealed under the hardened layer, creating a smooth microhardness gradient from the layer to the core, protecting it from embrittlement, peeling and staining. Using a metallographical simulated test in predeveloped methodology, the calculation of the hardening index of the modified layer (yield point increase) was made. It showed that with increase in the concentration of tungsten in the layer, the proportion of the component of the dispersion hardening by W₂N particles also increases. Full-scale tests in production conditions showed that the tool with a hardened layer had increased resistance. The durability of drills, determined by the number of drilled holes made before its dropping-out, increases by 2,2 times when drilling on 30XGSA steel and by more than 7,0 times when drilling a titanium alloy VT-23.

Keywords: high-speed steels, tool, diffusion metallization, nitriding

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under the project No. FSFM-2020-0011 (2019-1342), experimental studies were conducted using the equipment of the MADI collective use center.

For citation: Petrova L.G., Vdovin V.M., Sergeeva A.S. Modification of a high-speed cutting tool surface by combined tungsten steel and nitrogen saturation / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 24–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Введение

Быстрорежущие инструментальные стали применяют для производства сверл, резцов, фрез, метчиков; изготовления режущих кромок инструмента, в том числе, съемных

пластин. К таким сталям предъявляются повышенные требования по теплостойкости, твердости, износостойкости. В процессе работы инструмент из быстрорежущей стали должен сохранять заданный размер и форму, выдерживать серьезные динамические нагрузки и

высокие температуры. Для изготовления быстрорежущего инструмента наиболее распространены вольфрамовые и вольфрамомолибденовые стали (P9, P12, P18, P6M3, P6M5, P8M3), которые используют для обработки черных цветных металлов, а также пластмасс [1]. Эти стали являются наиболее подходящим материалом для изготовления малоразмерного инструмента, в частности, сверл малого диаметра (менее 3,0 мм), поскольку обладают высокой технологической пластичностью.

На сегодняшний день высокие темпы развития машиностроения, повсеместное внедрение автоматических линий и станков с числовым программным управлением ужесточают требования к надежности и производительности инструмента. Повышение ресурса работы инструмента необходимо в целях снижения потребления дорогостоящих компонентов и требует применения технологий упрочнения режущих поверхностей. Последнее особенно актуально для сверл малого диаметра, которые зачастую обладают пониженной стойкостью в силу технологических особенностей изготовления и существенного влияния структурных отклонений (карбидной неоднородности, размера зерна и т. п.) [2, 3].

Одним из подходов для решения задачи повышения ресурса инструмента является получение в режущей кромке мелкодисперсных нитридов вольфрама, что достигается методами химико-термической обработки (азотированием) [4 – 6]. Однако такая обработка не позволяет обеспечить высокую объемную долю нитридов, так как вольфрам в исходной стали в значительной степени связан в карбидную фазу. Представляет интерес использование метода диффузионной металлизации для дополнительного введения вольфрама в поверхностный слой стали, что в сочетании с азотированием позволит получить модифицированный слой, дисперсно-упрочненный нитридами. Данный подход предусматривает использование в качестве матричного материала экономолегированной вольфрамомолибденовой стали (P6M5 вместо P18), что способствует ресурсосбережению и снижению стоимости инструмента.

Комбинации процессов диффузионного поверхностного легирования с насыщением азотом показали свою эффективность при

поверхностном упрочнении различных конструкционных сталей [7 – 10]. В настоящей работе поставлена цель исследования процесса совместного насыщения быстрорежущей стали вольфрамом и азотом в тлеющем разряде для повышения стойкости малоразмерного инструмента.

Методика исследований

Исследования проводили на образцах и сверлах диаметром 1,0 мм из быстрорежущей инструментальной стали P6M5 в состоянии после стандартной термообработки, которая формирует структуру стали с дисперсными карбидами вольфрама в твердом растворе.

Для реализации эксперимента по диффузионному вольфрамиранию в сочетании с азотированием использовали лабораторную установку для ионного азотирования в многокомпонентных средах. Металлизацию вольфрамом проводили шликерным методом [10] из суспензии, содержащей нанодисперсный порошок оксида вольфрама WO_3 , хлористый аммоний и связующее вещество (цапонлак). Совместное насыщение стали вольфрамом и азотом осуществлялось в импульсном режиме электрического тока в атмосфере аммиака.

Методом металлофизического моделирования выполнено теоретическое обоснование эффективности дисперсионного упрочнения железной матрицы нитридами вольфрама. В качестве показателя упрочнения используется параметр прироста предела текучести. Для оценки этого параметра при поверхностном легировании железа вольфрамом и азотом применена методика расчета, разработанная для прогнозирования упрочнения в тройных системах Fe-Me-N [11].

Микроструктуру образцов и сверл после диффузионного насыщения изучали на поперечных микрошлифах методом металлографического анализа при помощи оптического микроскопа Axiovert 25 CA при увеличениях $\times 50 \dots \times 500$ крат. В качестве травителя использовали нитал: 10 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Для выявления тонкого строения отдельных участков азотированных слоев использовали метод растровой электронной микроскопии (РЭМ JEOL JSM-6480LV) с

аналитической приставкой (энергодисперсионным анализатором). Электронные изображения микрошлифов и изломов получали в режиме вторичных электронов, а также в характеристическом излучении элементов.

Микротвердость модифицированного слоя измеряли на поперечных микрошлифах на микротвердометре ПМТ-3 с нагрузкой 0,1 Н. Профили микротвердости по глубине получали путем измерения отпечатков с определенным шагом на расстоянии от поверхности.

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

Результаты и их обсуждение

При постановке эксперимента предполагали, что в результате диссоциации аммиака происходит восстановление атомарного вольфрама из оксида водородом, а градиент концентрации вольфрама на поверхности обеспечивает его диффузию в металлическую основу стали. Параллельно осуществляется диффузия образовавшихся ионов азота в металл с образованием модифицированного слоя.

Было учтено, что скорости диффузии вольфрама и азота в железе существенно различаются, что требует различных температур для эффективного насыщения. Как показывают ранние исследования [12], активное проникновение вольфрама в железо происходит при температурах не ниже 1050 °C, но нагрев сердцевин инструмента не должен превышать температуру отпуска стали (600 °C) во избежание ее разупрочнения. Таким образом, процесс должен обеспечить исключительно поверхностный прогрев образца на толщину не более 15 мкм. Эта задача реализуется в импульсном режиме тлеющего разряда с контролем параметра продолжительности импульса в фазах прогрева и остывания.

Для определения режима, обеспечивающего необходимые температуры на поверхности и в сердцевине, был проведен эксперимент по замеру температур в этих участках контрольных образцов стали при различных длительностях импульса в фазе прогрева. Общая продолжительность цикла «нагрев-остывание» была рассчитана в 2,51 мкс на основе известной формулы, связывающей частоту тока с заданной толщиной слоя при поверхностной закалке стали ТВЧ. Экспериментально установлено, что прогрев как поверхностного слоя, так и сердцевин недостаточен при малой длительности фазы прогрева (рис. 1, а). Показано, что выход на требуемые температурные режимы на поверхности и в сердцевине достигается за 45 с при длительности фазы прогрева 0,5 мкс (рис. 1, б). Импульсная смена температур обеспечивает насыщение стали вольфрамом в фазе прогрева и насыщение азотом в фазе остывания.

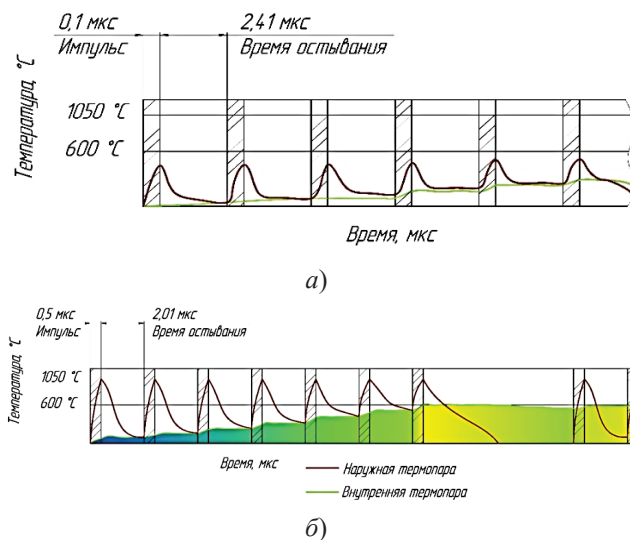


Рис. 1. Схема температурных условий на поверхности и в сердцевине изделия, подвергаемого импульсному нагреву в электрическом разряде при различных длительностях импульса в фазе прогрева: 0,1 мкс (а) и 0,5 мкс (б)

Fig. 1. Diagram of temperature conditions on the surface and in the core of a product subjected to pulsed heating in an electric discharge at different pulse durations in the heating phase: 0,1 ms (a) and 0,5 ms (b)

Исследования микроструктуры стали после совместного насыщения вольфрамом и азотом показали, что на поверхности образуется упрочненный слой искомой толщины (10...15 мкм), в котором присутствуют

дисперсные частицы, визуализируемые в характеристическом излучении азота (рис. 2).

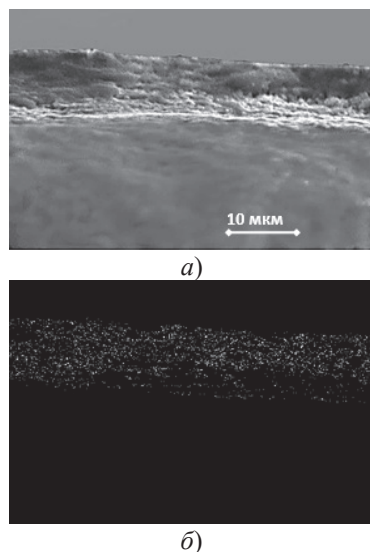


Рис. 2. РЭМ изображения модифицированного слоя в стали P6M5 во вторичных электронах (а) и в характеристическом излучении азота (б)
Fig. 2. SEM images of the modified P6M5 steel layer in secondary electrons (a) and in a characteristic nitrogen radiation (b)

Присутствие вольфрама в этих частицах подтверждается спектральным анализом (рис. 3), что позволяет идентифицировать их как нитриды вольфрама.

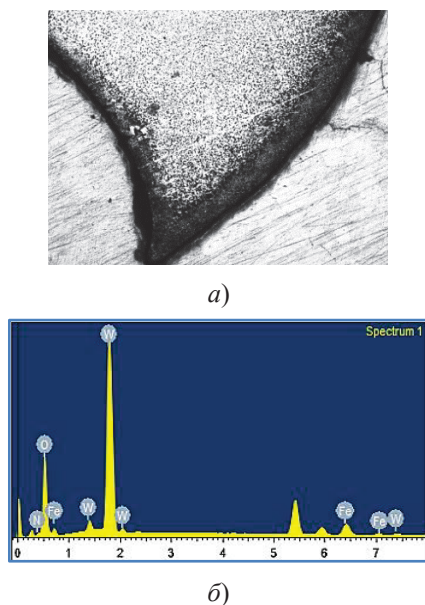


Рис. 3. Изображение режущей кромки сверла с модифицированным слоем, $\times 100$ (а) и спектр элементов в точке локализации дисперсной частицы в слое (б)
Fig. 3. Cutting edge image of a drill with a modified layer, $\times 100$ (a) and the spectrum of elements at the point of localization of a dispersed particle in the layer (b)

Таким образом, экспериментально установлено, что модифицированный слой формируется на базе зоны внутреннего азотирования, т. е. представляет собой твердый раствор вольфрама и азота в железе с дисперсными включениями нитридов вольфрама, что позволяет применить расчетную методику прогнозируемого упрочнения на основе металлофизической модели.

Как показано в работе [11], упрочнение зон внутреннего азотирования в сталях после комбинированной обработки, состоящей из диффузионной металлизации и азотирования, происходит преимущественно в результате суммарного действия механизмов твердорастворного упрочнения азотом и дисперсионного упрочнения нитридами легирующего металла. При этом уровень твердорастворного упрочнения железа легирующим металлом пренебрежимо мал. Согласно термодинамической оценке, наиболее стабильным соединением в системе Fe-W-N является ГЦК нитрид W_2N . Исходя из образования именно этого нитрида, для расчета прироста предела текучести вольфрамо-азотированного железа использовали соотношение:

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma^N + \Delta\sigma^{W_2N}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma^N$ – параметр твердорастворного упрочнения системы Fe-W-N азотом; $\Delta\sigma^{W_2N}$ – параметр дисперсионного упрочнения нитридными частицами.

Используемая методика расчета предполагает зависимость каждой из компонент упрочнения в выражении (1) от концентрации металла в диффузионном слое (C_W), которая в свою очередь, перераспределяется между твердым раствором (C_W^{α}) и нитридной фазой $C_W^{W_2N}$. Соотношение между этими концентрациями описывается выражениями:

$$C_W^{\alpha}/C_W = \zeta_W \text{ и } C_W^{W_2N}/C_W = 1 - \zeta_W, \quad (2)$$

где ζ_W – коэффициент перераспределения, принимаемый $\zeta_W = 0,6$ для вольфрама.

Для расчета твердорастворного упрочнения азотистого феррита использовали классическую зависимость предела текучести от концентрации азота в твердом растворе C_N :

$$\Delta\sigma^N = k_N C_N, \quad (3)$$

где k_N – коэффициент твердорастворного упрочнения железа азотом, равный 4670 МПа.

Наличие легирующего элемента в железе оказывает влияние на количество растворенного азота через коэффициенты активности γ_{Me}^N , которые, в свою очередь, зависят от концентрации этого металла:

$$C_N = \frac{C_N^0}{\gamma_{Me}^N}; \lg \gamma_{Me}^N = -A C_{Me}^n, \quad (4)$$

где C_N^0 – равновесная концентрация азота в системе Fe-N (0,05 % по массе); A и n – индивидуальные индексы для данного легирующего металла.

Используя данные работы [11], для вольфрама получаем зависимость:

$$\lg \gamma_W^N = -0,118 C_W, \quad (5)$$

Путем комбинации выражений (3), (4) и (5) для расчета параметра твердорастворного упрочнения железа азотом в системах Fe-W-N получено уравнение:

$$\Delta\sigma^N = 233,5 \cdot 10^{-0,118 C_W}, \quad (6)$$

Для расчета параметров дисперсионного упрочнения нитридными выделениями применена формула Мотта-Набарро [11], которая связывает напряжения $\Delta\tau$, возникающие в металле с частицами, с их объемной долей f :

$$\Delta\tau_{MeN} = 2G_{Fe} \cdot \varepsilon \cdot \delta \cdot f, \quad (7)$$

где $2G_{Fe}$ – модуль сдвига железа, равный 82000 МПа.

В формуле (7) интегральный показатель ε связывает упругие константы матричного металла и нитридной частицы (объемный модуль K , модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν), а параметр размерного несоответствия δ рассчитывается на основе разницы в периодах решеток металла-растворителя α_{Fe} и нитрида α_{W_2N} . Расчеты с использованием соответствующих констант дают значения безразмерных параметров для нитрида вольфрама: $\varepsilon_{W_2N} = 0,443$ и $\delta_{W_2N} = 0,359$.

Объемная доля частиц нитридов вольфрама пропорциональна концентрации вольфрама, связанного в нитриды $C_W^{W_2N}$:

$$f_{W_2N} = C_W^{W_2N} \cdot \frac{M_{W_2N} \rho_{Fe}}{100 M_W \rho_{W_2N}}, \quad (8)$$

где M_{W_2N} и M_W – молекулярные массы нитрида W_2N ($M_{W_2N} = 382$) и легирующего металла ($M_W = 184$); ρ_{Fe} – удельный вес железа ($\rho_{Fe} = 7,68$ г/см³), ρ_{W_2N} – удельный вес нитрида W_2N ($\rho_{W_2N} = 12,2$ г/см³).

Для того чтобы величину напряжений в параметр предела текучести применили известное соотношение: $\Delta\sigma = 2,75\Delta\tau$, включающее ориентационный множитель для объемно-центрированной кристаллической решетки железа.

В итоге связь параметра дисперсионного упрочнения ферритной матрицы нитридами вольфрама с базовой концентрацией металла в железе описывается выражением:

$$\Delta\sigma^{W_2N} = 374,5 C_W, \quad (9)$$

Для сравнения, рассчитанный по аналогичной методике коэффициент дисперсионного упрочнения железа карбидами вольфрама оказывается неизмеримо меньше ($\Delta\sigma^{W_2C} = 13,2 C_W$), что обусловлено гораздо более низким фактором размерного несоответствия решеток карбида и железа. Таким образом, проведенный расчет подтверждает более высокую прогнозируемую эффективность дисперсионного упрочнения нитридами вольфрама.

Проведенное сопоставление значимости механизмов твердорастворного упрочнения азотом и дисперсионного упрочнения нитридами системы Fe-W-N показало, что при низкой входной концентрации вольфрама C_W вклады этих механизмов примерно равны. Так, при $C_W = 1,0$ % по массе $\Delta\sigma^{W_2N}$ и $\Delta\sigma^N$ составляют, соответственно, 48,5 % и 51,5 % от общей величины упрочнения (рис. 4, а). Тогда как с увеличением этой концентрации значимость дисперсионного механизма увеличивается. При $C_W = 5,0$ % по массе вклад в общее упрочнение $\Delta\sigma^{W_2N}$ составляет уже 67 % против 33 % для $\Delta\sigma^N$ (рис. 4, б).

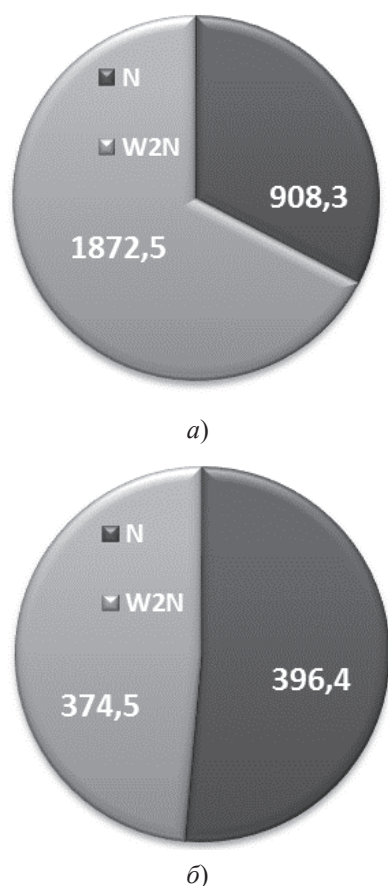


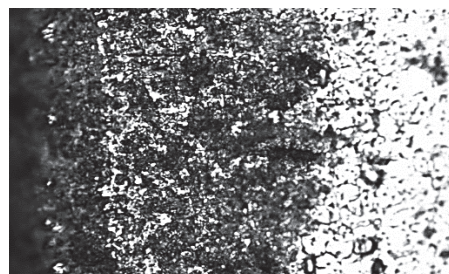
Рис. 4. Диаграмма вкладов прироста предела текучести (МПа) в суммарное упрочнение сплавов Fe-W-N при твердорастворном упрочнении вольфрамом («N») и дисперсионном упрочнении нитридами вольфрама («W₂N»): расчет для концентрации вольфрама в системе 1,0 % (а) и 5,0 % (б)

Fig. 4. Diagram of the yield point increase (MPa) contributions to the total hardening of Fe-W-N alloys under tungsten solid-solution hardening («N») and tungsten nitride dispersion hardening («W₂N»): calculation for the tungsten concentration in the system of 1,0 % (a) and 5,0 % (b)

Эксперименты подтвердили, что благодаря дисперсионному и твердорастворному упрочнению модифицированный W-N слой в быстрорежущей стали обладает повышенной микротвердостью, почти в два раза превышающей микротвердость основы (рис. 5, а). Под упрочненным слоем имеется переходная диффузионная зона азотистого мартенсита (см. рис. 3, а, рис. 5, б), что обусловлено продвижением азота на большую глубину по сравнению с диффузией атомов вольфрама. Переходная зона обеспечивает плавное изменение микротвердости от слоя к сердцевине, что предохраняет его от охрупчивания, отслаивания и выкрашивания.



а)

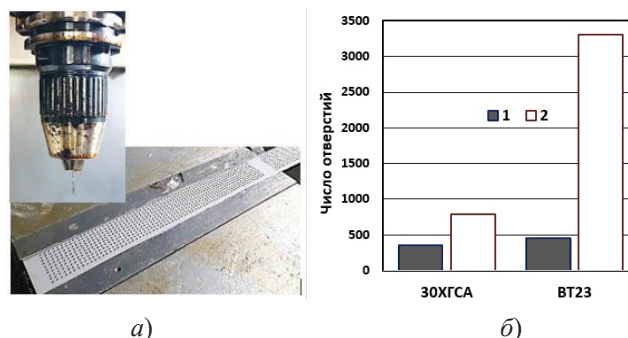


б)

Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине слоя в стали P6M5 (а) в сопоставлении с его микроструктурой (б)

Fig. 5. Distribution of microhardness over the layer thickness in steel P6M5 (a) comparing to its microstructure (b)

Натурные испытания сверл с модифицированным диффузионным W-N слоем (рис. 6, а) показали существенное увеличение их стойкости при сверлении конструкционной стали 30ХГСА (в 2,2 раза) и кратное (более чем в 7,0 раз) увеличение стойкости при сверлении отверстий в титановом сплаве BT-23 (рис. 6, б). Количество отверстий при сверлении по титану инструментом с полученным слоем на 25 % превышает число отверстий, просверленных инструментом с нанесенным CVD-покрытием нитрида вольфрама.



а)

б)

Рис. 6. Натурные испытания по сверлению титанового сплава BT-23 (а) и их результаты: сравнительная диаграмма стойкости необработанных сверл и сверл с модифицированным W-N слоем (б)

Fig. 6. Full-scale drilling tests of titanium alloy VT-23 (a) and their results: comparative resistance diagram of unworked drills and drills with modified W-N layer (b)

Заключение

Исследованный процесс поверхностного модифицирования быстрорежущей стали Р6М5 совместным насыщением вольфрамом и азотом позволяет сформировать диффузионный слой толщиной 10...15 мкм на базе зоны внутреннего азотирования – азотистого мартенсита с дисперсными частицами нитридов вольфрама. Подтвержденными экспериментально расчетами по металлофизической модели установлено, что упрочнение модифицированного слоя, выражающееся в повышении микротвердости, обусловлено дисперсионным и твердорастворным механизмами.

Натурные испытания малоразмерных (1,0 мм в диаметре) сверл с модифицированным диффузионным слоем показали существенное увеличение их стойкости, определяемой по числу просверленных отверстий до их выхода из строя. При сверлении по конструкционной стали 30ХГСА стойкость повышается в 2,2 раза, при сверлении по титановому сплаву ВТ-23 стойкость увеличивается более чем в 7,0 раз.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адашкин А.М. Быстрорежущие стали нового поколения / А.М. Адашкин, Л.С. Кремнев, И.Ю. Сапронов // Перспективные материалы. 2014. № 2. С. 48–54.
2. Григорьев С.Н., Черкасов П.М., Сгибнев Р.В. Технологические особенности вакуумно-плазменной обработки осевого мелкогабаритного инструмента // Материалы Всероссийской научно-практической конференции и выставки «Технологии и оборудование для нанесения износостойких, твердых и коррозионностойких покрытий». Москва: РХТУ, 2004. С. 54–55.
3. Поletaев В.А. Упрочнение сверл из быстрорежущей стали импульсной магнитной обработкой // Novainfo.ru. 2017. Т. 1. № 73. С. 43–47.
4. Александров В.А. Азотирование инструмента из высокохромистых и быстрорежущих сталей / В.А. Александров, К.В. Богданов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 5. С. 14–20.
5. Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 1 (127). С. 3–10. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10.
6. Belashova I. S., Petrova L. G., Aleksandrov V. D., Demin P. E. Improving the Properties of Low-Alloy and Carbon Steel Tools by Cyclic Nitriding // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 1. P. 53–56. DOI 10.3103/S1068798X18010057

7. Малахов А.Ю., Александров В. А., Перекрестова В. А. Комбинирование процессов металлизации и низкотемпературного азотирования // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 46-7. С. 36–43. DOI 10.18411/lj-01-2019-130.

8. Александров В.А., Петрова Л.Г., Сергеева А.С. [и др.]. 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. Демин П. Е., Барабанов С. И., Малахов А. Ю., Александров В. А. Упрочнение штамповых сталей металлокерамическими покрытиями, получаемыми способом газового азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 2 (128). С. 17–21. DOI 10.30987/2223-4608-2022-2-17-21.

10. Petrova L.G., Demin P.E. Surface modification techniques for steel components working in wear and corrosion conditions/ Key Engineering Materials. 2022. Т. 909 KEM. С. 108–114.

11. Петрова Л.Г. Оценка прогнозируемого упрочнения железа при поверхностном легировании металлом в сочетании с азотированием // Технология металлов. 2022. № 8. С. 41–52. DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-8-41-52.

12. Aleksandrov V.A., Petrova L.G., Sergeeva A.S., Aleksandrov V.D., Akhmetzhanova E.U. Production of tool coatings by chemicothermal plasma methods // Russian Engineering Research. 2019. Т. 39. № 8. С. 693–695. DOI 10.3103/S1068798X19080033

REFERENCES

1. Adaskin A.M. High-speed steels of a new generation / A.M. Adaskin, L.S. Kremnev, I.Yu. Sapronov // Perspective materials, 2014, no. 2. pp. 48–54.
2. Grigoriev S.N., Cherkasov P.M., Shibnev R.V. Technological features of vacuum-plasma processing of axial small-size tools // Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference and exhibition "Technologies and equipment for the application of wear-resistant, hard and corrosion-resistant coatings". Moscow: RChTU, 2004, pp. 54–55.
3. Poletaev V.A. Hardening of high-speed steel drills using pulsed magnet treatment / V.A. Poletaev // Novainfo.ru. 2017, vol. 1, no. 73, pp. 43–47.
4. Alexandrov V.A. Nitriding of tools made of high-chromium and high-speed steels / V.A. Alexandrov, K.V. Bogdanov // Hardening technologies and coatings, 2005, no. 5. pp. 14–20.
5. 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, no. 1 (127), pp. 3-10. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10.
6. Belashova I. S., Petrova L. G., Aleksandrov V. D., Demin P. E. Improving the Properties of Low-Alloy and Carbon Steel Tools by Cyclic Nitriding // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 1. P. 53–56. DOI 10.3103/S1068798X18010057.

7. Malakhov A.Yu., Alexandrov V. A., Perekrestova V. A. Combination of metallization and low-temperature nitriding processes // Trends in the development of science and education, 2019, no. 46-7, pp. 36–43. DOI 10.18411/lj-01-2019-130.

8. Alexandrov V.A., Petrova L.G., Sergeeva A.S. [et al.]. Increasing the durability of cutting tools by surface modification with coating of tungsten compounds in high-voltage discharge // Hardening technologies and coatings, 2018, vol. 14, no. 1(157). pp. 30–35.

9. Demin P. E., Barabanov S. I., Malakhov A. Yu., Alexandrov V. A. Hardening of stamped steels with metal-ceramic coatings obtained by gas nitriding method // Science-intensive technologies in mechanical engineering,

2022, no. 2 (128), pp. 17–21. DOI 10.30987/2223-4608-2022-2-17-21.

10. Petrova L.G., Demin P.E. Surface modification techniques for steel components working in wear and corrosion conditions/ Key Engineering Materials. 2022. vol. 909 KE M. pp. 108–114.

11. Petrova L.G. Evaluation of the predicted hardening of iron during surface alloying with metal in combination with nitriding // Technology of metals, 2022, no. 8. pp. 41–52. DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-8-41-52.

12. Aleksandrov V.A., Petrova L.G., Sergeeva A.S., Aleksandrov V.D., Akhmetzhanova E.U. Production of tool coatings by thermochemical plasma methods // Russian Engineering Research, 2019, vol 39, no 8. pp. 693–695. DOI 10.3103/S1068798X19080033.

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 13.04.2023; одобрена после рецензирования 27.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 13.04.2022; approved after reviewing 27.04.2022; assepted for publication 11.05.2023.

