

2. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

3. Dameshmend, L. K. Model Reference Adaptive Control of Cutting Force in Milling in Dynamic Systems: Modeling and Control Donath / L. K. Dameshmend, H. A. Pak. – New York, 1985.

4. Li, Xiaoli. On-Line Detection of the Breakage of Small Diameter Drills Using Current Signature Wavelet transform / Li Xiaoli, J. Mach // Tools & Manufacture. – 1999. – No. 39. – P. 157–164.

5. Research on fault monitor system of CNC machining of free-form surfaces based on wavelet analysis. Xu Shuxin, Zhao Ji, Zhan Jianming, [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – No. 129 (1–3). – P. 588–591.

6. Liu, F. Study on Energy Flow Models of Mechanical Transmission Systems / F. Liu, Z. J. Xu // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 1993. – Vol. 6, No. 3. – P. 215–219.

7. Weinert, K. Relation Between Process Energy and Tool Wear when Turning Hardfacing Alloys / K. Weinert // Annals of the CIRP. – 1994. – Vol. 43, No. 1. – P. 97–100.

8. Mallat, S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet transform / S. Mallat // IEEE Trans., PAMI-11. – 1989. – No. 7. – P. 674–693.

9. Daubechies, I. The wavelet transform, time- frequency localization and signal analysis / I. Daubechies // IEEE Trans., IT-36. – 1990. – No. 5. – P. 961–1005.

Поступила 20.01.2009

УДК 621.785.539

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ КАРБОНИТРАЦИИ И СТРУКТУРЫ ДИФФУЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ Р6М5

*Канд. техн. наук КУХАРЕВА Н. Г., инж. ПЕТРОВИЧ С. Н., канд. техн. наук ГАЛЫНСКАЯ Н. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

Повышение эксплуатационных характеристики изделий из инструментальных сталей может быть достигнуто применением поверхностной обработки. В частности, использование диффузионного карбонитрирования в качестве финишной химико-термической обработки деталей машин, инструмента и технологической оснастки позволяет существенно повысить срок их эксплуатации за счет создания на рабочих поверхностях изделий карбонитридного термодиффузионного покрытия [1].

Цель работы – исследование влияния условий проведения термодиффузионной карбонитрации в бесцианистых порошковых средах на механические свойства инструментальных сталей и изучение их взаимосвязи со структурой диффузионных покрытий.

Исследования проводились на быстрорежущей стали Р6М5. Состав стали Р6М5: 0,85 % С; 4,0 % Cr; 6,0 % W; 5,0 % Mo; 2,0 % V [2].

Для придания структурной однородности образцы из стали Р6М5 перед диффузионным

насыщением подвергали типовой термической обработке: закалка от температуры 1220 °С, охлаждение в масле и трехкратный отпуск при температуре 550 °С. Химико-термическую обработку проводили в порошковой среде, которая содержала уголь, соду Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и калий железистосинеродистый K<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> при температурах 450; 500 и 550 °С в течение шести часов.

Металлографические исследования структур, полученных в результате применения химико-термической обработки, были выполнены с помощью оптического микроскопа Neophot-21. Полированные образцы протравливали в 3%-м растворе азотной кислоты HNO<sub>3</sub>.

Рентгеноструктурный анализ при исследовании фазового состава диффузионных покрытий выполнялся на дифрактометре ДРОН-3 с использованием медного излучения CuK<sub>α</sub>, скорость перемещения счетчика – 1 град./мин. Микрорентгеноспектральный анализ осуществлялся с помощью установки Camebaх фирмы Cameca. Количественный стереологический

анализ карбонитридов проводился на аттестованном автоматическом анализаторе изображения Mini-Magiscan фирмы Joуce LoebI, Англия, по программе Genias 26. Объекты распределялись по параметру средний габарит на 10 интервалов от минимального до максимального значения. Замеры микротвердости выполняли на микротвердомере ПМТ-3 с прилагаемой нагрузкой 0,5 Н. Определение сопротивления износу производили с использованием трехвалкового метода с применением удельной нагрузки 50 и 400 МПа. Скорость износа составляла 0,56 м/с, время испытаний – 100 мин, смазка осуществлялась с использованием масла марки SAE30, подаваемого со скоростью 30 кап./мин.

Фазовый состав карбонитридных покрытий на стали Р6М5 изучен в ранее проведенных исследованиях и описан в [3].

Из анализа микроструктур диффузионных слоев (рис. 1) следует, что количество, форма и характер распределения карбонитридных включений в слоях, полученных при различных температурах обработки, отличаются. Увеличение температуры проведения процесса насыщения приводит к получению диффузионных слоев с большим количеством карбидных и карбонитридных включений, имеющих меньшие размеры и более округлую форму.

Проведенный количественный микрорентгеноспектральный анализ (рис. 2–4) показал,

что  $\epsilon$ -карбонитрид, являющийся основной фазой диффузионного слоя, легирован молибденом, вольфрамом, ванадием и хромом. Хром является основным легирующим элементом  $\epsilon$ -карбонитрида, повышает его стабильность, твердость и износостойкость. Как известно [3, 4], хром в стали Р6М5 равномерно перераспределяется между структурными составляющими, т. е. 50 % от его содержания в стали находится в карбидной фазе, причем не в специальных карбидах хрома, а в качестве легирующего элемента в цементите, и 50 % хрома – в  $\alpha$ -фазе.  $\epsilon$ -карбонитрид образуется как на базе  $\alpha$ -фазы, так и  $Fe_3C$ , наследуя атомы хрома с их равномерным распределением в структуре. На рис. 2–4 это выявляется почти прямой линией.

Установлено, что увеличение температуры насыщения не сказывается на распределении хрома в диффузионном слое. При этом увеличение температуры насыщения приводит к снижению количества вольфрама в диффузионном слое и незначительному уменьшению количества молибдена (рис. 4).

В работе проведен количественный стереологический анализ, позволивший выявить количественное соотношение мелких и крупных частиц\* в слое в зависимости от температуры проведения процесса насыщения.

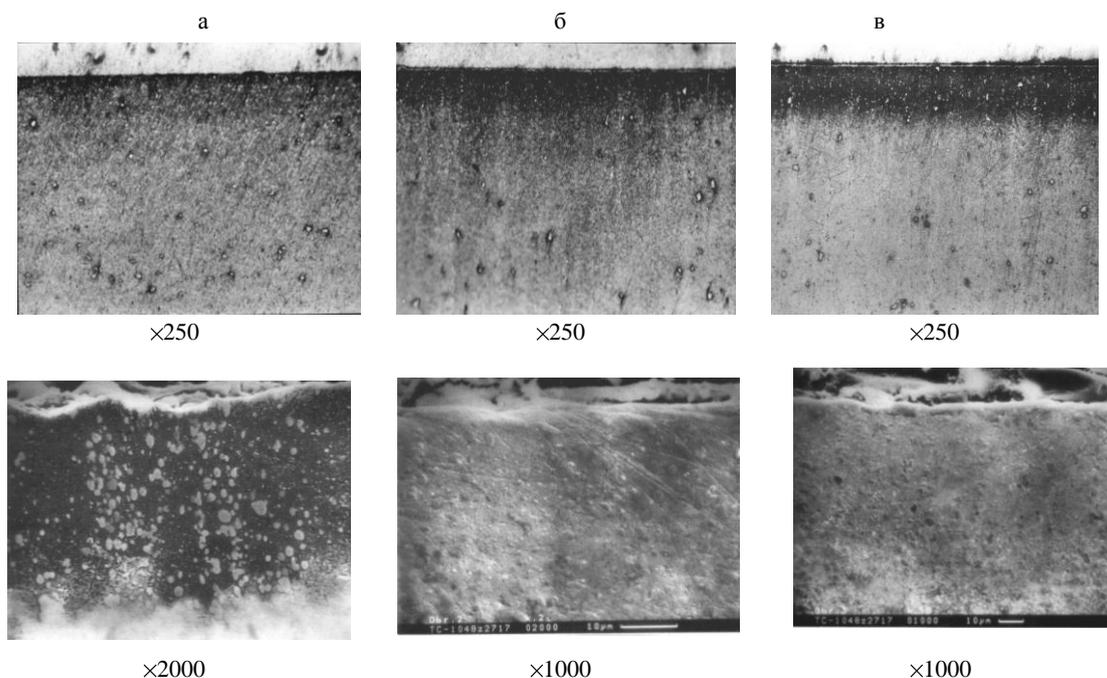


Рис. 1. Микроструктура карбонитридного слоя на стали Р6М5: а – температура насыщения составляет 450 °С, время – 6 ч; б – 500 °С, 6 ч; в – 550 °С, 6 ч

\* Карбидные, нитридные и карбонитридные включения, присутствующие в слое, в дальнейшем именуются частицами.

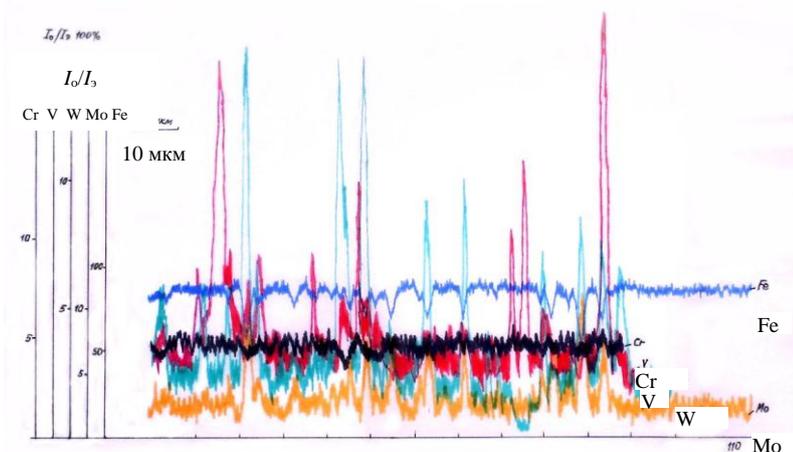


Рис. 2. Распределение элементов по толщине диффузионного слоя при  $T_{\text{нас}} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$

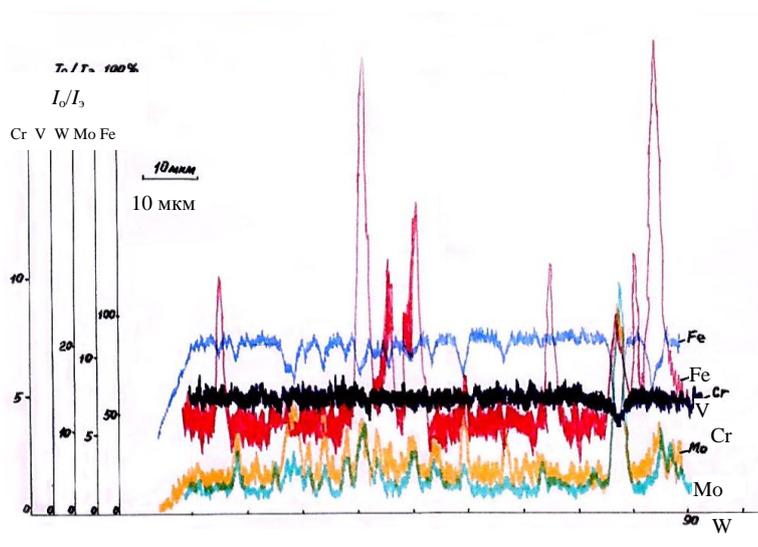


Рис. 3. Распределение элементов по толщине диффузионного слоя при  $T_{\text{нас}} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

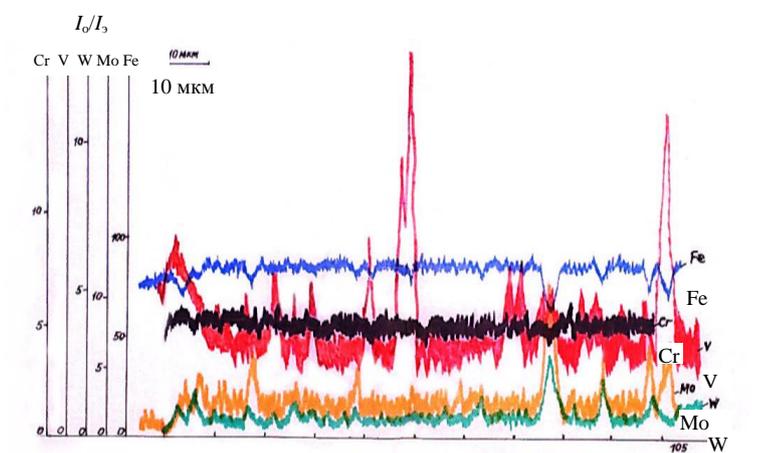


Рис. 4. Распределение элементов по толщине диффузионного слоя при  $T_{\text{нас}} = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$

В результате проведенного анализа были обчислены крупные (от 0–0,5 до 4,5–5,0 мкм) и мелкие (от 0–0,1 до 0,9–1,0 мкм) частицы, обнаруженные в диффузионном слое.

Для удобства обозначения размеров частиц введена классификация их по классам.

Для крупных карбидов и карбонитридов: 1-му классу соответствуют частицы размерами 0–0,5 мкм; 2-му – 0,5–1,0; 3-му – 1,0–1,5; 4-му – 1,5–2,0; 5-му – 2,0–2,5; 6-му – 2,5–3,0; 7-му – 3,0–3,5; 8-му – 3,5–4,0; 9-му – 4,0–4,5; 10-му – 4,5–5,0 мкм.

Для мелких карбидов и карбонитридов: 1-му классу соответствуют частицы размерами 0–0,1 мкм; 2-му – 0,1–0,2; 3-му – 0,2–0,3; 4-му – 0,3–0,4; 5-му – 0,4–0,5; 6-му – 0,5–0,6; 7-му – 0,6–0,7; 8-му – 0,7–0,8; 9-му – 0,8–0,9; 10-му – 0,9–1,0 мкм.

На рис. 5 представлены гistogramмы распределения объектов по среднему габариту.

Из гistogramм видно, что с увеличением температуры процесса карбонитрации до 550 °С возрастает общее количество карбидных и карбонитридных частиц, при этом увеличивается количество мелких частиц в диффузионном слое.

Исследования по изучению влияния условий проведения термодиффузионной карбонитрации на твердость покрытий, формирующихся на стали Р6М5, показали, что характер хода кривых изменения микротвердости по глубине слоя при различных температурах термодиффузионной обработки не меняется. Как видно из рис. 6, максимальные значения микротвердости карбонитридного слоя на стали Р6М5 имеет в поверхностных зонах слоя, затем плавно уменьшается

от поверхности в глубь образца до твердости сердцевины, соответствующей 8300 МПа при всех исследуемых температурах обработки. Увеличение температуры проведения процесса карбонитрации позволяет повысить поверхностную твердость от 10050–11450 МПа при 450 °С до 13400–15250 МПа при 550 °С и протяженность зоны повышенной твердости от 80 до 120 мкм.

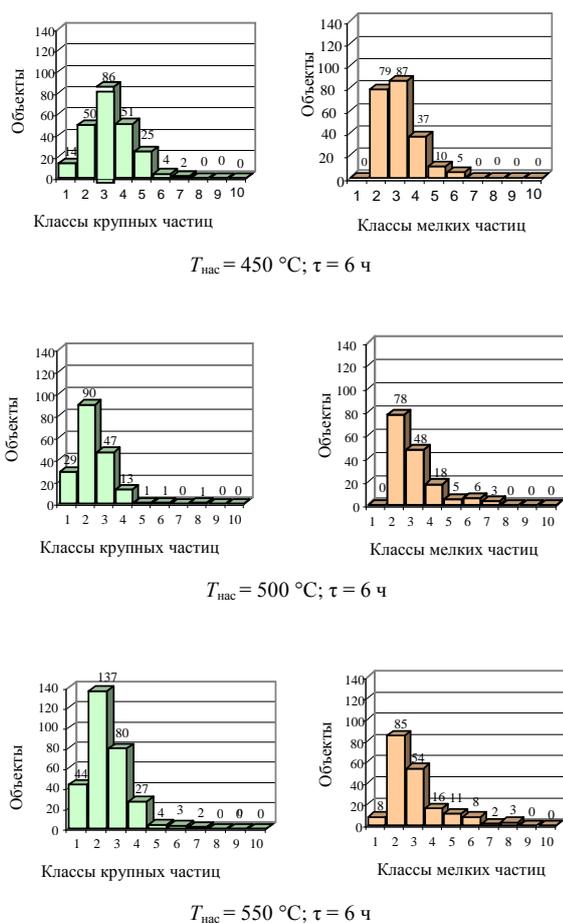


Рис. 5. Гистограммы распределения частиц по дисперсности в зависимости от температуры обработки

В результате проведения процесса низкотемпературной карбонитрации износостойкость быстрорежущей стали может быть повышена в 1,2 раза. Как видно из рис. 7, наилучшие результаты по износостойкости исследуемых покрытий получены на образцах, карбонитрированных при температурах 450–500 °С, причем ужесточение режима испытаний еще больше подчеркивает тенденцию улучшения износо-

стойкости на образцах, прошедших процесс обработки при более низкой температуре. Несмотря на то, что в данном случае в карбонитридном слое содержится наименьшее количество мелкодисперсных карбидов и карбонитридов и слой обладает наименьшей микротвердостью, эксплуатационная стойкость данных покрытий максимальная. Это заключение подтверждено промышленными испытаниями, проведенными на ОАО «ТайМ», резьбонарезного инструмента. Наилучшие результаты показали метчики, подвергнутые карбонитрации при 450 °С.

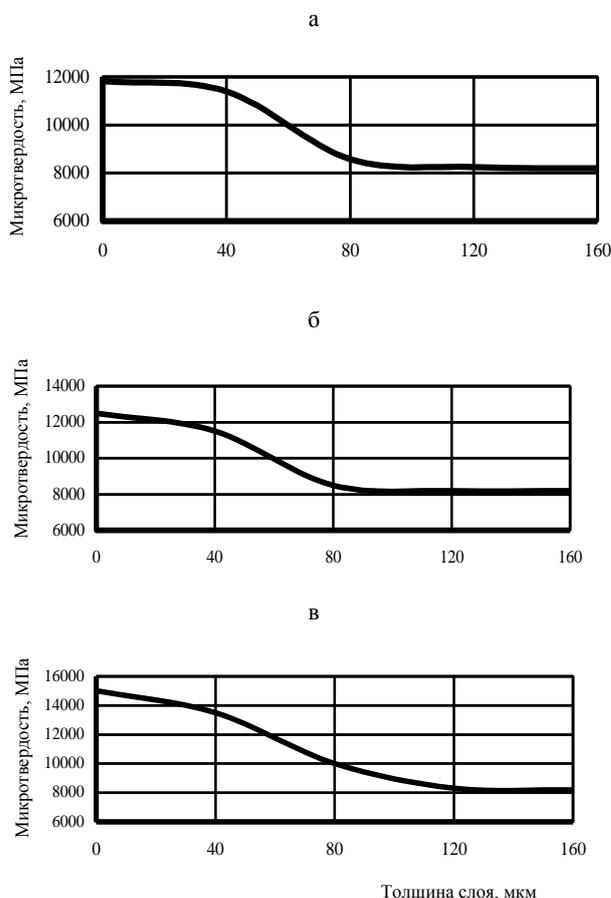


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине карбонитридного слоя на стали Р6М5: а –  $T_{\text{нас}} = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; б – 500 °С; в – 550 °С

Приведенные результаты исследований позволяют предположить, что определяющее влияние на износостойкость карбонитридных покрытий, полученных на стали Р6М5 из порошковых бесцианистых сред, оказывает химический и структурный состав покрытий. А именно при увеличении температуры карбо-

нитрации от 450 до 550 °С в диффузионном слое происходит перераспределение легирующих элементов – уменьшается количество вольфрама и молибдена (рис. 4). Кроме этого, при повышении температуры насыщения увеличивается толщина хрупкой поверхностной оксикаридной зоны слоя, которая в процессе эксплуатации скалывается и, играя роль абразива, вносит дополнительное разрушающее воздействие.

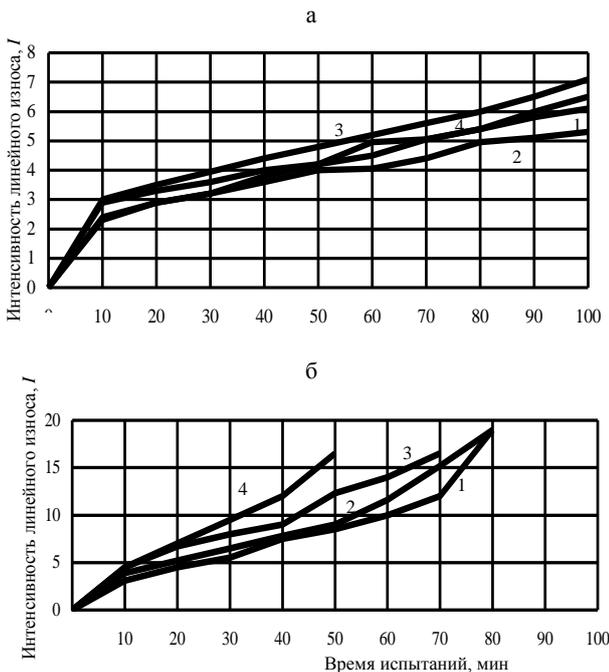


Рис. 7. Зависимость интенсивности линейного износа быстрорежущей Р6М5 от времени испытаний: а – нагрузка 50 МПа; б – 400 МПа; 1 – карбонитрированная сталь Р6М5 ( $T_{\text{нас}} = 450$  °С); 2 – то же (500 °С); 3 – то же (550 °С); 4 – термообработанная сталь Р6М5

### ВЫВОДЫ

1. Проведение процесса низкотемпературной карбонитрации инструментальной стали Р6М5 при температуре 450–550 °С в бесцианистых порошковых средах позволяет получить диффузионные слои, содержащие карбиды и карбонитриды с микротвердостью от 10050–11450 до 13400–15250 МПа и протяженностью зоны

повышенной твердости от 80 до 120 мкм. Максимальной микротвердостью обладают слои,

в которых преобладают мелкие карбиды и карбонитриды, имеющие шаровидную форму, что характерно для слоев, полученных при 550 °С.

2. Наилучшие результаты по износостойкости получены на образцах из стали Р6М5, карбонитрированных при температуре 450 °С. Определяющее влияние на износостойкость карбонитридных покрытий на стали Р6М5 оказывает химический и структурный состав покрытий: при увеличении температуры карбонитрации от 450 до 550 °С в диффузионном слое происходит перераспределение легирующих элементов стали – уменьшается количество вольфрама и молибдена, а также увеличивается толщина хрупкой поверхностной оксикаридной зоны слоя. Эта зона в процессе эксплуатации скалывается и, выполняя роль абразива, вносит дополнительное разрушающее воздействие.

3. Изучение влияния структурного состава диффузионных карбонитридных слоев на механические свойства стали Р6М5 показало отсутствие корреляции между количеством мелкодисперсных частиц в диффузионных слоях и их твердостью и износостойкостью.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Прокошкин, Д. А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация / Д. А. Прокошкин. – М.: Металлургия. Машиностроение, 1984. – 240 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. Кухарева, Н. Г. Структура и свойства диффузионных покрытий на быстрорежущих и нержавеющей сталях / Н. Г. Кухарева, Т. Бабуль, Я. Сенаторский // Металлообработка. – 2002. – № 1 (7). – С. 21–24.
4. Минкевич, А. Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1968. – № 10. – С. 11–16.

Поступила 20.01.2009