

## ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ, ЗАТРАЧИВАЕМОЙ НА ПРЕОДОЛЕНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ, НА МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАНКОМ С ЧПУ

Докт. техн. наук СЮЙ ШУСИНЬ, докт. техн. наук, проф. ФИЛОНОВ И. П.

Цзилиньский университет, Чаньчунь, Китай,  
Белорусский национальный технический университет

При обработке на станках с ЧПУ «свободной» кривой при изменении радиуса кривизны и кручения [1] на протяжении некоторой дуги  $s_0$  (угловая скорость  $\bar{\omega}_\phi = \text{const}$ ) приходится менять значение скорости центра масс фрезы и значения составляющих угловой скорости  $\omega_\psi$  и  $\omega_\theta$ , связанных с угловыми координатами  $\psi$  и  $\theta$  (рис. 1).

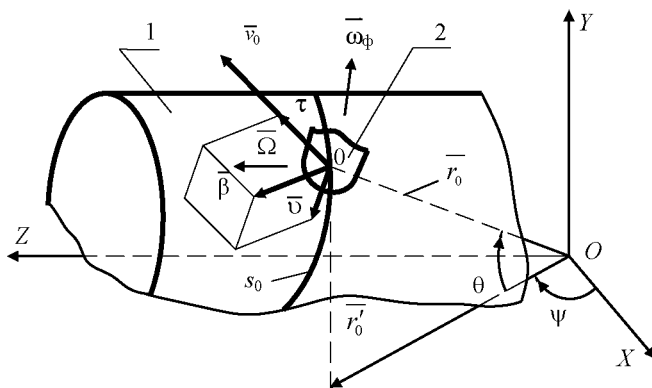


Рис. 1. Схема обработки: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – фреза;  $OXYZ$  – система координат, связанная со станком с ЧПУ;  $\bar{r}_0(r_0, \psi, \theta)$  – радиус центра масс фрезы

$$\left. \begin{aligned} |\bar{v}| &= \left| \frac{d\bar{r}}{dt} \right| = \sqrt{\dot{X}_0^2 + \dot{Y}_0^2 + \dot{Z}_0^2}; \\ \psi &= \arctg \frac{Y_0}{X_0}; \\ \theta &= \arctg \frac{Z_0}{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Так, при перемещении центра масс фрезы по произвольной траектории сопровождающий трехгранник (рис. 1)  $(\bar{\tau}, \bar{v}, \bar{\beta})$  перемещается вместе с ним с постоянной по модулю скоростью  $\tau$ , равной единице (путь  $s_0$  численно равен

времени  $t$ ), и вращается со скоростью, определяемой вектором Дарбу [2]:

$$\bar{\Omega} = K_0 \bar{\beta} + T_0 \bar{\tau}. \quad (2)$$

Использование таких параметров, как длины дуг  $s_0$ , кривизны  $K_0 = |d\bar{\tau}/ds_0|$ , характеризующейся отклонением кривой от прямой, и вектора кручения  $T_0 = |d\bar{\beta}/ds_0|$ , характеризующегося отклонением кривой от соприкасающейся плоскости, удобно с той точки зрения, что длина и углы не меняются при преобразовании координат. Две кривые с одинаковыми уравнениями  $K_0 = K_0(s_0)$  и  $T_0 = T_0(s_0)$  совпадают по форме и могут отличаться только положением в пространстве. Зависимость  $K_0$  и  $T_0$  от величин составляющих скоростей  $(\dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0)$  и ускорений  $(\ddot{X}_0, \ddot{Y}_0, \ddot{Z}_0)$  приведена в [1].

Если этого не предусмотреть, то самое малое изменение  $K_0$  и  $T_0$  приведет к съему припуска, выходящему за рамки недопустимого. Толщина срезанного слоя уменьшится или увеличится, что снижает качество обрабатываемой поверхности или может привести к поломке станка (инструмента). В настоящее время нет технических возможностей в выборе многочисленных параметров качества обработанной поверхности и износа фрезы в связи с изменением режимов работы приводного двигателя. Однако зависимость  $K_0$  и  $T_0$  может быть проведена экспериментально. В системе автоматического управления важно знать степень влияния мощности, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления резанию, на мощность приводного двигателя.

Для технологов важной задачей является установление связей между характеристиками

качества обрабатываемой заготовки и износом инструмента, связанным с высокой температурой и давлением на передней поверхности пластины, со слишком большой скоростью резания, налипанием пластичных и вязких материалов, прерывистостью резания и непостоянством подвода СОЖ, образованием нароста и другими причинами. Появившиеся датчики в последнее время дают возможность обнаруживать причину таких изменений и влиять на их ход в процессе резания посредством изменения мощности приводного электродвигателя.

Проблема состоит в том, что в системе автоматического управления станком с ЧПУ необходимо знать величину износа режущего инструмента и его влияние на мощность приводного электродвигателя (например, FMS, CIMS

и т. д.). В течение последних лет обсуждаются проблемы контроля [3–5]. Но существующие методы контроля ограничиваются только тем случаем, когда серьезное повреждение фрезы вызывают отключение приводного электродвигателя. Чувствительность датчиков была недостаточной, чтобы обнаружить повреждение, вызываемое отклонением заготовки в пределах заданного качества обработанной поверхности. С повышением точности заготовки и развитием крупных моделей для автомашин и крыльев турбин начинают пользоваться не сферообразной, а торцевой фрезой. Если в этом случае существуют тонкие «надиры» в поверхности фрезы, то качество поверхности обработанной заготовки намного снижается, не приводя к отключению самого приводного электродвигателя. Поэтому контроль за состоянием фрезы очень важен для станков с программным управлением, когда кривая, описываемая центром масс фрезы, отличается различной кривизной и кручением.

**Основа теории контроля посредством информации мощности приводного электродвигателя.** Схема баланса мощности сил резания представлена на рис. 2 [6–7].

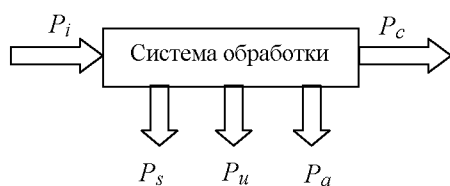


Рис. 2. Схема баланса мощности

На рисунке введены следующие обозначения:  $P_i$  – генеральная вводная мощность;  $P_s$  – запасная мощность по некоторому расширенному значению;  $P_u$  – израсходованная системой мощность в свободном состоянии;  $P_a$  – дополнительная расходная мощность;  $P_c$  – мощность резания.

$$P_i = P_s + P_u + P_a + P_c. \quad (3)$$

Когда состояние резания изменяется, мощность резания  $P_c$  тоже изменяется, следовательно, приводит к изменению вводной мощности  $P_i$ . Предположим, что состояние резания  $x_i(t)$  зависит от состояния повреждения резца и обработки детали. Все эти параметры принимаются за компоненты вектора и выражаются как  $x_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$ , т. е. мощность резания зависит от состояния резания.

Выражение (3) запишется в виде

$$P_i(t) = P_s + P_u + P_a + P_c[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]. \quad (4)$$

Предыдущая формула показывает, что существует определенная связь между вводной мощностью  $P_i(t)$  системы и состоянием повреждения резца, состоянием обработки детали и т. д. Вводная мощность двигателя постоянно-го тока выражается как

$$P_i = UI. \quad (5)$$

Здесь  $U$  – напряжение;  $I$  – вводная величина тока двигателя постоянного тока.

Трехфазная средняя мощность двигателя переменного тока имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{iA} &= U_A I_A \cos \varphi_A; \\ P_{iB} &= U_B I_B \cos \varphi_B; \\ P_{iC} &= U_C I_C \cos \varphi_C. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь  $U_A, U_B, U_C$  – трехфазная полезная величина переменного напряжения;  $I_A, I_B, I_C$  – то же вводного переменного тока;  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  – трехфазная величина угла коэффициента мощности.

Напряжение считается неизменным, поэтому посредством тока двигателя можно определить состояние обработки. С помощью дат-

чика сигнал тока переводят на сигнал напряжения, потом через систему A/D переводят сигнал напряжения на компьютер.

**Принцип метода анализа повреждения фрезы.** В системе контроля над дефектом фрезы существуют два метода анализа сигнала: метод в категории времени и метод в категории спектра. Метод в категории времени не выражает характеристику динамики процесса обработки, метод в категории спектра зависит от установившегося сигнала. Метод анализа волны является эффективным для неустановившегося сигнала незаметного для глаза повреждения фрезы. В последние годы успешно применяют технику анализа волны во многих областях. Как правило, пользуются характеристикой локализации времени-спектра, этот метод обладает способностью обрабатывать переменный сигнал с большой разрешающей способностью. Посредством этого метода не только можно анализировать облик сигнала, но и отображать тонкое содержание сигнала.

Предположим  $x(t)$  – выводной сигнал, который получен через систему A/D (рис. 3).

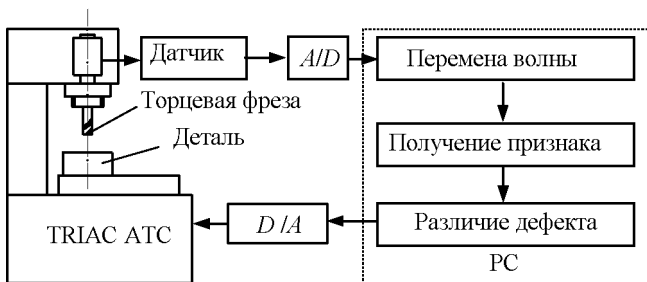


Рис. 3. Схема эксперимента

Перемена волны сигнала  $x(t)$  (Wavelet Transform) записывается как  $WT_x(a, \tau)$ , определяется следующим образом [8, 9]:

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^* \left( \frac{t - \tau}{a} \right) dt. \quad (7)$$

Здесь  $a$  – параметр масштаба,  $a \in R^+$ ;  $\tau$  – параметр выдержки,  $\tau \in R$ ;  $\psi_{a,\tau}^*(t)$  – фундаментальная волна  $\psi(t)$  при масштабе  $a$ , выдержке  $\tau$  (знак «\*» означает сопряжение).

Приведем перемену волны цифрового сигнала в двоичную систему. Предположим, что  $x(t) \in V_{J_1}$ ;  $V_{J_1}$  представляет собой замкнутое

подпространство  $L^2(R)$ , в котором существует разрешающая сила  $J_1$ . Тогда

$$\begin{aligned} x(t) &= A_{J_1} x(t) = \sum_{k \in Z} C_{J_1,k} \Phi_{J_1,k} x(t) = \\ &= A_{J_2} x(t) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} D_j x(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Phi$  – функция масштаба;

$$A_{J_2} x(t) = \sum_{k \in Z} C_{J_2,k} \Phi_{J_2,k}(t) \quad (9)$$

представляет собой состав частоты сигнала  $x$ , которая ниже  $2^{-J_2}$ ;

$$D_j x(t) = \sum_{k \in Z} D_{j,k} \Psi_{j,k}(t); \quad J_1 + 1 \leq j \leq J_2, \quad (10)$$

представляет собой состав частоты сигнала  $x$ , которая попадает в  $2^{-j} - 2^{-(j-1)}$ .

Здесь  $C_{J_1,k}$ ,  $C_{J_2,k}$  – коэффициенты проектирования сигнала  $x(t)$  на ортогональные в пространственном масштабе, в котором существуют разрешающие силы  $J_1, J_2$ ;  $D_{j,k}$  – коэффициент проектирования сигнала  $x(t)$  на ортогональные в пространстве волны, т. е. коэффициенты волны.

С помощью алгоритма можно разделить сигнал  $x(t)$  на состав низкой частоты  $A_{J_2} x(t)$ , которая ниже  $2^{-J_2}$ , и состав частоты  $D_j x(t)$ , которая попадает в  $2^{-j} - 2^{-(j-1)}$  ( $J_1 + 1 \leq j \leq J_2$ ).

Посредством перемены волны можно разделить сигнал на состав низкой частоты и составы рядов высоких частот, из различных полос частот получают признак дефекта. Следовательно, есть возможность эффективно анализировать признак дефекта повреждения фрезы незаметно для глаза по мощности приводного электродвигателя.

**Экспериментальный сигнал и его использование.** Эксперимент был проведен в Центре обработки (TRIAC АТС), сигнал тока двигателя получен от датчика, параметры датчика приведены в табл. 1. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Таблица 1

Параметры датчика

Тип	Номиналь-	Предел изме-	Линейность	Вывод	Напря-	Напряже-	Точ-
					жение	ние изо-	ность

	ный ток	рения			ЭП	ляции	
КТ2А/Р	2 А	0-3 А	0,1 %	0-100 мА	±15 В	3 кВ	1 %

В детали заранее была зафиксирована ось диаметром  $d = 2$  мм для того, чтобы имитировать незаметное для глаза повреждение фрезы. Материал оси 20CrMnMo (прошедшей цементацию) обеспечит высокую твердость на поверхности оси  $\text{HRN} - 15 = 89$ , а также одновременно доброкачественную вязкость в середине оси. Когда существует слишком малый контакт между фрезой и осью, при резании режущие лезвия проскальзывают из-за эластичной деформации и не воздействуют на резание заготовки, но слишком большой контакт приводит к стуку. После многих испытаний длина контакта в 0,2 мм считается годной (рис. 4).

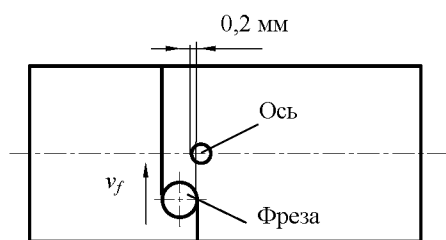


Рис. 4. Схема резания

Материал детали – А3, частота – 1 кГц; частота вращения шпинделя – 500 об/мин, скорость подачи – 150 мм/мин, глубина резания – 0,5 мм, диаметр фрезы  $d = 10$  мм (соответственно два и три зуба). Сигнал электрического тока двигателя незаметного для глаза повреждения фрезы и результат перемены волны представлены на рис. 5. Выбирают волну  $s$ , зафиксированную на рис. 5 как исходный сигнал,  $a5$  – как плавную часть переменной волны,  $d5$  – как тонкую часть переменной волны.

Результат анализа волны повреждения фрезы показывает, что в тонких частях у волны нет характерного изменения, но в плавных частях  $a5$  (у места повреждения фрезы) существует заметное западание волны, причем при сравнении с исходными сигналами переходность западания волны сокращается. Следовательно, в пространстве времени-спектра представляют достаточно точную поверхностную поврежденность фрезы.

С этой целью непрерывно обрабатывается исходный сигнал в категории времени и получается другой сигнал, который полностью отражает признаки дефекта. Вообще часто применяют классический фильтр, но с изменением параметра резания необходимо непрерывно регулировать коэффициент фильтра. Перемена волны является хорошим методом для решения этой проблемы. Среднеквадратичную величину определяют по формуле

$$v_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{n}} \quad (11)$$

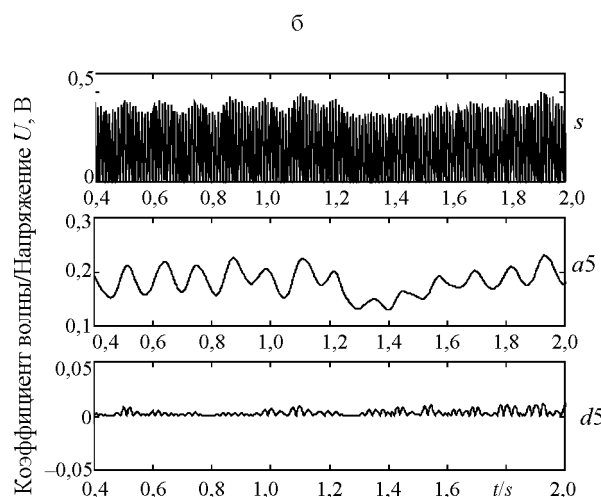
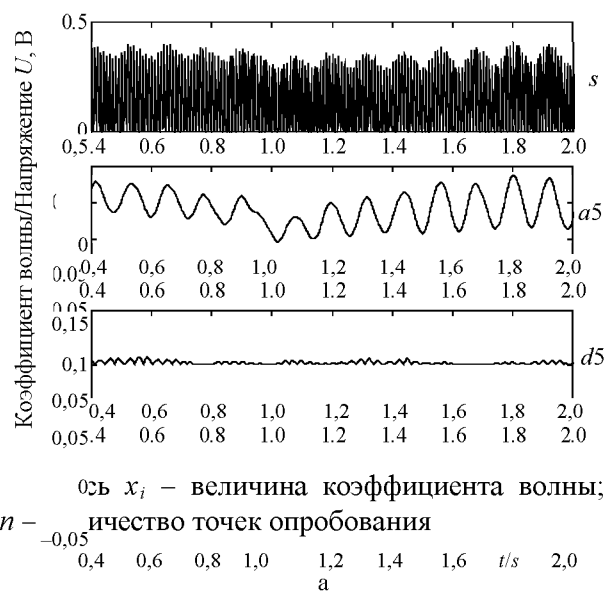


Рис. 5. Исходный сигнал и его перемена волны:  $n = 500$  об/мин;  $v_f = 150$  мм/мин; а –  $h = 0,5$  мм,  $d = 10$  мм (два зуба); б –  $h = 0,5$  мм,  $d = 10$  мм (три зуба)

Для уменьшения количества вычислений в полосе частот дефекта заносят те величины коэффициента волны в (11), которые соответствуют 200 точкам в категории времени, одновременно во избежание крайнего влияния бракуют те величины коэффициентов волны, которые соответствуют передним 100 точкам и задним 100 точкам. Принимают величину  $v_0$  нормального резания за стандартную величину, определяют наибольшую и наименьшую величины порога для контроля дефекта:

$$\left. \begin{aligned} v_H &= v_0(1 + \varepsilon); \\ v_L &= v_0(1 - \varepsilon). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь  $\varepsilon$  как коэффициент установления величины порога по экспериментальному результату  $\varepsilon = 0,5 - 0,7$  считается годным. Блок-схема управления представлена на рис. 6.

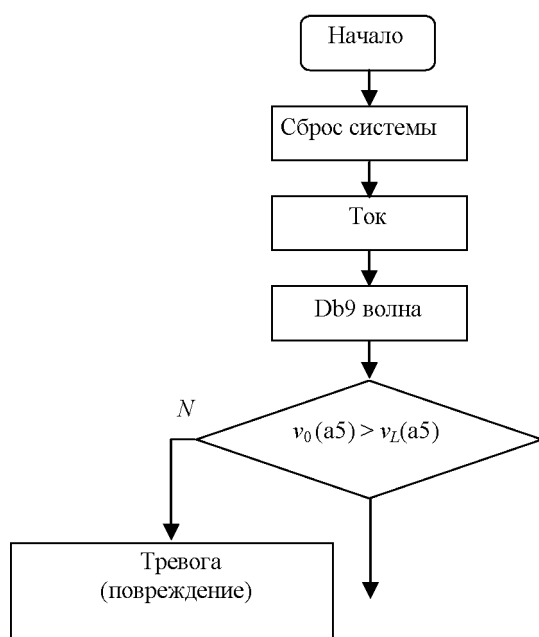


Рис. 6. Блок-схема управления

**Распространение дефекта фрезы на лезвийный инструмент.** Когда возникнет незаметное для глаза повреждение в фрезе, в полосе частот  $a5$  характер волны заметно западает (рис. 5), установление величины порога является самым простым методом контроля над дефектом. Поэтому установление величины порога западания станет важным звеном, связывающим с надежным показателем системы контроля износа фрезы.

Из результата эксперимента можно удобно определить величину порога, соответствующую такому условию. В практике применяются самые различные резцы, материал и конфигурация инструмента, существуют разные возможные сочетания режимов резания. Это приносит большие затруднения в установлении величины порога. Массовые технологические эксперименты для определения величин порогов различных инструментов, соответствующих разнообразным сочетаниям условий резания, позволят создать банк данных. Использование этого метода заключается в больших затратах. Наиболее приемлемый метод решения: построить определенную математическую модель, автоматически установить величину порога с изменением условия обработки. При использовании этого метода количество работ уменьшается, затраты снижаются.

## ВЫВОДЫ

1. Ранее применявшиеся дефекты фрезы ограничивались тонкой частью переменной волны сигнала электродвигателя. В данной статье показано, что плавная часть составит наиболее полезную информацию для практики машиностроения.

2. Впервые была выдвинута гипотеза об использовании способности самонастраивающегося отфильтровывания переменной волны для того, чтобы автоматически устанавливать величину порога в полосе частот дефекта. Это восполняет недостаток непрерывного регулирования коэффициента фильтра с изменением режимов резания, следовательно, обеспечивает высокую надежность.

3. Экспериментальное исследование повреждения фрезы на станках с ЧПУ показывает, что не во всех полосах частот признак дефекта является явным, это дает возможность преимущественного использования способности регулируемого фильтра переменной волны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Филонов, И. П. Механика процессов обкатки / И. П. Филонов; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск: Наука и техника, 1985. – 328 с.

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 Camebax фирмы Cameca. Количественный стереологический