

. Science and Technology” (7-11 June 1999, Sain-Petersburg, Russia), Vol. II, 1999.- P. 1119-1123. **22.** Berge S. Titanium risers for offshore oil and gas production-fatigue considerations. Ibid.- P. 1064-1071. **23.** Lunde L., Seiersten M. The use of titanium in offshore industry. Ibid.- P. 1058-1063. **24.** Schutz R.W., Baxter C.F., Boster P.L. Titanium alloy utilization in drilling and offshore production systems// Proc/ of the 10th World Conf. on Titanium “Ti-2003”(13-18 July 2003, CCH-Congress Center Hamburg, Germany). **25.** Рекламный проспект Верхнесалдинского металлургического производственного объединения, 2004. **26.** Melechow R., Tubielewicz K., Właszczuk W. Tytan i jego stopy. Gatunki, właściwości, zastosowanie, technologia obróbki, degradacja. Wyd. Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2004. – 388 s. **27.** Dziekowski M.Z. Titanium’s contribution to the world’s deepest offshore system. Proc. of the Sixth Intern. Conf. on Titanium (1988, Canes), 1988. Part 1.- P. 517-518. **28.** Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій/ В.І.Похмурський, Р.К.Мелехов, Г.М.Круцан, В.Г.Здановський.- К.: Наук. думка 1995.- 262 с. **29.** Василенко И.И., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Наук. думка 1977.- 265 с. **30.** Круцан А.М., Мелехов Р.К., Тубилевич К.: Коррозионное растрескивание корпусных сорбитно-твердеющих сталей и их сварных соединений. Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», Донецк 2000.

Сдано в редакцию 14.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Бухач А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЧИСТОВОГО ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Мельничук П.П., Выговский Г.Н., Громовой А.А.

(Житомирский государственный технологический университет, г.Житомир, Украина)

The paper is dedicated to development of scientific fundamentals of finishing face milling of flat surfaces by tools with super-hard materials, with the aim to provide stable indices of quality of machining by means of estimation of influence of main factors of geometric, kinematical, dynamical origin, and with the aim of control of parameters of quality of machined flat surfaces on the basis of structural–mathematic modeling of technological processing system and processes which take place in it.

Повышение качества обработки поверхностей вызывает необходимость использования новых прогрессивных инструментов, среди которых применяются торцовые фрезы косоугольного резания. Размеры таких инструментов имеют порядок, близкий к межопорному расстоянию шпинделя станка и характеризуются значительной массой, которая сопоставима с массой шпинделя станка. Для процессов механической обработки торцовыми фрезами косоугольного резания характерны малые значения толщины срезаемого слоя, высокие скорости резания и т.п. [1–3].

Торцовые фрезы косоугольного резания предназначены для чистовой обработки плоских поверхностей. При обработке достигается значение параметра шероховатости $Ra = 1,0$ мкм и меньше. Поэтому на качество обработанной поверхности влияют все, даже незначительные, погрешности геометрии и кинематики системы “станок – инструмент”. Важное значение приобретает учет динамических процессов, которые имеют место при обработке, и определение их влияния на качество обработанной поверхности.

Динамическая система станка и рабочие процессы обработки детали создают в своей совокупности сложный комплекс, который характеризуется наличием многоконтурных, циклических взаимосвязанных потоков информации. Для математического моделирования процесса обработки использованы структурные методы, которые реализуют применение графов связи для анализа механических систем. Разработанная методология структурного математического моделирования базируется на создании основной (базовой) структурной модели, которая учитывает все существенные причинно-следственные связи между элементами динамической системы станка и рабочими процессами, которые в ней протекают. Основная базовая структурная модель в комплексном виде охватывает все факторы, которые влияют на качество процесса чистовой лезвийной обработки и определяет, при возможности, локализацию действия факторов. В базовой модели устанавливаются основные связи между блоками, включая обратные связи (рис. 1).

Каждый блок базовой модели разрабатывается отдельно. При этом формируется структура блока, определяются его входы и выходы (рис. 2).

Выходом структурной математической модели являются рассчитанные случайные параметры движения чистового ножа. Они используются для расчета параметров профиля обработанной поверхности.

Экспериментальные измерения статической жесткости вертикально-фрезерных станков ГФ2171С6 и 6Г13Г выполнялись при двухсторонней дискретной нагрузке через динамометр с фиксированными значениями перемещений.



Рис. 1. Блок-схема базовой структурной модели

Для установления сил резания и крутящих моментов при фрезеровании использовался специальный динамометр, оснащенный тензорезисторами. Для регистрации результатов спроектирован и использован аппаратно-регистрирующий комплекс, который включал аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ.

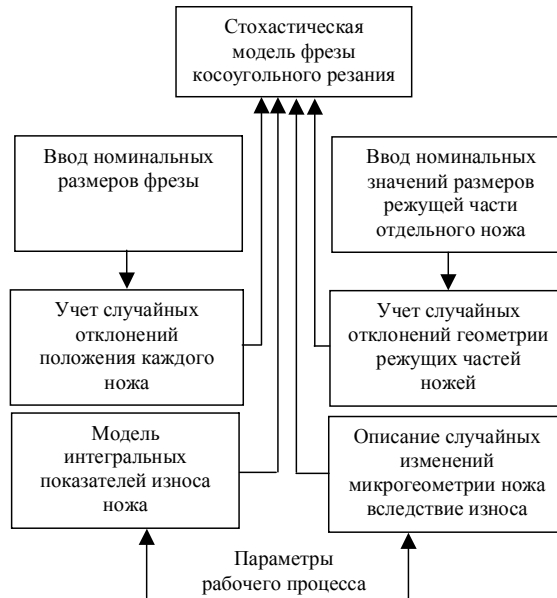


Рис. 2. Структура блока стохастической модели фрезы

Для установления тепловых режимов работы ножей торцовых фрез, оснащенных сверхтвёрдыми материалами (СТМ), и сравнения их с теплоустойкостью для гексанита-Р и эльбора-Р выполнен двухмерный анализ:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{q_i}{c_i \rho_i},$$

где T – температура; V_x – скорость резания; ρ_i – плотность материала; q_i – мощность теплового потока; a_i – теплопроводность среды.

Для исследования изнашивания инструмента использована фотосъемка фотоаппаратом с высокой разрешающей способностью.

Структурное математическое моделирование конструкций и рабочих процессов выполнено с использованием пакетов MATLAB и MathCAD.

В качестве базовой торцовой фрезы с ножами косоугольной геометрии использована конструкция, показанная на рис. 3.

На торцовой фрезе размещено пять групп ножей, которые объединены в пять участков логарифмических спиралей. Положение отверстия для каждого ножа определялось с точностью до 0,001 мм.

Полученные данные использованы для оценки фактических значений полярных радиусов:

$$\rho(\varphi) = \rho_{0k} \cdot a_k \frac{\varphi - \varphi_0}{2\pi},$$

где ρ и φ – полярные координаты отдельного ножа.

Фактическое положение ножа определяется погрешностями изготовления и условиями его закрепления клиновым механизмом.

По результатам экспериментальных измерений созданная математическая модель процесса изнашивания поверхности ножа.

Математическая модель формирует векторный выход в виде максимальной ширины фасок изнашивания ножей, которые образуют логарифмическую спираль.

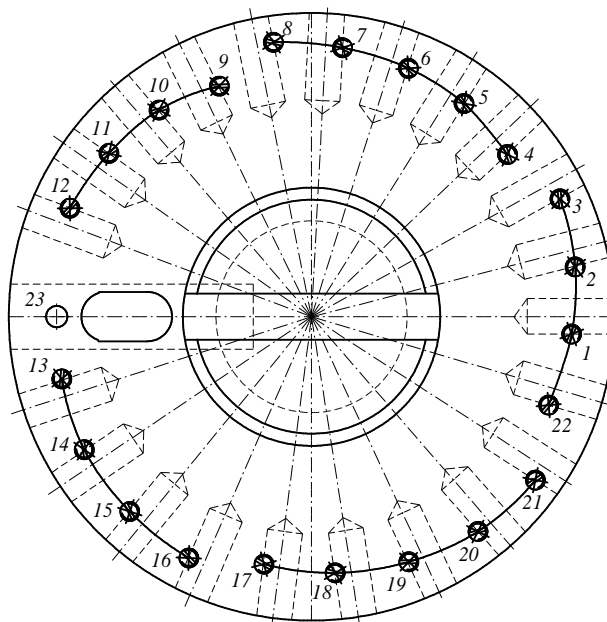


Рис. 3. Торцовая ступенчатая чистовая фреза косоугольной геометрии

ния фрезы, связанные с геометрической точностью узла крепления инструмента.

Получены контрольные результаты вычислений радиальных, угловых и осевых координат каждого ножа инструмента в системе цилиндрических координат.

Авторами определены статические деформации при изгибе шпинделя под действием сил резания. Опоры в виде подшипников качения образуют статически неопределенную систему шпинделя (рис. 4).

В общем виде перемещения опор и угловые деформации соответственно:

$$\delta = C_{\delta} f(R) \quad \text{и} \quad \theta = C_{\theta} \varphi(R),$$

где R – радиальная нагрузка на подшипник; f – некоторая нелинейная функция, которая определяет радиальную деформацию δ от радиальной нагрузки R на опоры; C_{δ} , C_{θ} – коэффициенты, которые зависят от конструктивных параметров опоры; φ – нелинейная функция, которая определяет зависимость угловой деформации θ от крутящего момента M в опоре.

Сформированы условия совместимости деформаций шпинделя с учетом случайных изменений его параметров и нелинейных характеристик жесткости подшипников. Определены суммарные поперечные и угловые перемещения сечений шпинделя в точках A , B и C с использованием принципа суперпозиции действия сил.

Для нахождения силовых факторов использована стохастическая нелинейная система уравнений:

$$\begin{cases} a_{11}M_{yA} + a_{12}P_{xB} + a_{13}M_{yB} + a_{14}M_{yC} = e_{11}P_x + e_{12}M_y + R_{xB} \\ a_{21}M_{yA} + a_{22}P_{xB} + a_{23}M_{yB} + a_{24}M_{yC} = e_{21}P_x + e_{22}M_y + R_{\theta A} \\ a_{31}M_{yA} + a_{32}P_{xB} + a_{33}M_{yB} + a_{34}M_{yC} = e_{31}P_x + e_{32}M_y + R_{\theta B} \\ a_{41}M_{yA} + a_{42}P_{xB} + a_{43}M_{yB} + a_{44}M_{yC} = e_{41}P_x + e_{42}M_y + R_{\theta C} \end{cases}$$

Геометрический анализ системы “шпиндель – инструмент” выполнен с учетом случайных изменений ее параметров. Установлено, что более всего на точность обращения шпинделя влияет передняя опора шпинделя (радиальный конический двухрядный подшипник).

Разработанная математическая модель учитывает случайный характер процесса биения. В результате многочисленных исследований выполнена идентификация ее параметров. Показано, что модель с уточненными параметрами адекватна реальному процессу, и результаты моделирования отвечают экспериментальным данным.

Установлены поперечно-угловые и вертикальные перемеще-

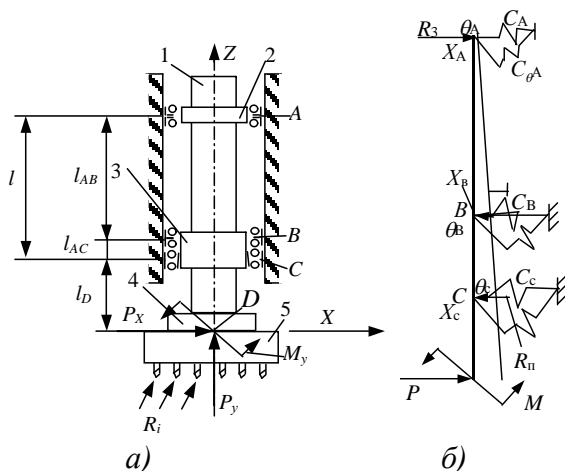


Рис. 4. Схемы шпинделя:

а – принципиальная; б – расчетная

Значение коэффициентов, которые входят в систему уравнений, представлены в виде суммы детерминированной и случайной составляющих.

Система четырех уравнений с четырьмя неизвестными является нелинейной системой алгебраических уравнений со случайными коэффициентами. Для решения этой системы разработана специальная методика, которая базируется на применении системы визуального математического моделирования SIMULINK математического пакета MathCAD 6.0.

Изложенная выше методика реализована в структурной математической

модели, которая осуществляет поэтапное решение нелинейной системы алгебраических уравнений со случайными коэффициентами, которые описывают статически неопределенную упруго-деформированную систему шпинделя.

Для подтверждения адекватности модели и достоверности результатов моделирования проведены специальные экспериментальные исследования. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований подтвердило их адекватность. Точность расчетов находится в пределах 3...6 %.

В работе установлена зависимость относительного положения инструмента и заготовки при торцовом фрезеровании плоских поверхностей. Учтены деформации упругих систем шпинделя и стола станка. Уравнение динамического равновесия привода составлено с применением уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{\partial \Pi}{\partial y} - \frac{\partial R}{\partial y} + Q,$$

где T – кинетическая энергия; Π – потенциальная энергия системы; R – диссипативная функция Релея; $Q = -P_x$.

Установлено, что перемещения шпинделя в вертикальном направлении затухают за 1,0...1,5 мс. Частота колебаний приблизительно равна 1200 Гц. Крутильные колебания шпинделя характеризуются значительно большей продолжительностью и затухают на протяжении 6...8 мс. Частота крутильных колебаний приблизительно равна 560 Гц.

Авторами теоретически установлены и экспериментально определены значения сил резания при обработке ступенчатыми косоугольными фрезами с СТМ плоских поверхностей деталей из закаленных сталей (45, 40X, 9XC, X18H10T, ШХ15) и чугунов (НВ до 600), установлена рациональная геометрия ножей фрезы – углы λ , α и γ – для исследования режимов.

Выполнено математическое моделирование с применением пакета MATLAB силовых характеристик процесса резания с учетом случайных глубин резания, которое зависит от соотношения статических и динамических деформаций шпинделя, стола и подачи при случайном радиальном положении ножа.

Статическая сила резания:

$$P_e = K \left[t \cdot \frac{Z}{Z_H} \right]^m \cdot \left[\Delta S \cdot \frac{R}{R_H} \right]^n,$$

где Z и R – соответственно вертикальное и радиальное положения ножа фрезы.

В первом приближении изменение силы резания в динамике определяется дифференциальным уравнением:

$$T_p \frac{dP_\partial}{dt} + P_\partial = K_p \cdot \alpha(t),$$

где P_∂ – динамическая составляющая силы резания; T_p – постоянная времени процесса резания; K_p – коэффициент передачи процесса резания; $\alpha(t)$ – изменение площади срезаемого слоя.

Номинальные значения проекций сил резания отвечают экспериментальным данным (расхождения не больше 7 %).

Моделированием установлено, что потоки образованного при резании тепла распределяются между стружкой, ножом фрезы и обрабатываемой деталью в соотношении 14 %, 16 % и 70 %. Этот результат расчетов вызван высокой теплопроводностью СТМ, рациональной геометрией ножей и т.п.

Общая математическая модель процесса механической обработки поверхности на фрезерном станке, оснащенный торцовой фрезой косоугольного резания, сформирована в виде структуры, которая включает как отдельные блоки, так и все раньше рассмотренные математические модели отдельных подсистем станка и рабочих процессов. Основой модели есть структурная математическая модель, которая рассчитывает форму обработанной поверхности, полученной обработкой фрезой, которая включает лишь один режущий нож. Входом модели является вектор, который объединяет три проекции главного вектора сил резания P_x , P_y , P_z , которые действуют на шпиндель, и три составляющие главного момента M_x , M_y , M_z .

Входами общей структурной модели есть угол поворота шпинделя и общий вектор силовых факторов. Выходом модели является вектор силовых факторов, которые вызваны ножами данной спирали, и координаты положения чистового ножа. Модель имеет четыре блока, которые вычисляют составные нагрузки на шпиндель со стороны других ножей спирали. В модели существуют сумматоры, которые вычисляют разность координат соседних ножей по горизонтали и вертикали. Из разности координат определяют глубину срезаемого слоя и подачу на зуб для каждого отдельного ножа фрезы.

Процедура математического моделирования осуществлена по специальному плану, который моделирует процесс обработки заготовки в реальном масштабе времени.

Результаты математического моделирования в виде текущих значений координат чистового ножа дали возможность выполнить моделирование формы обработанной поверхности.

Из сравнения расчетных и экспериментальных данных вытекает их значительное количественное и качественное сходство. Периоды рассчитанных с помощью математической модели волн отличаются от экспериментально определенных в 1,06 раза. Размах волн отличается в 1,18 раза. Это подтверждает адекватность модели и возможность ее использования для исследования процесса обработки.

Получены результаты исследования шероховатости обработанной поверхности при торцовом косоугольном фрезеровании инструментом, оснащенным СТМ, с целью выявления основных факторов (режимов, геометрии), влияющих на конечную шероховатость. Установлены зависимости шероховатости от изменения в широком диапазоне

подачи на зуб S_z (0,05...0,75 мм/зуб), радиуса задней поверхности ножа r (6...18 мм), скорости резания V (2,5...8,0 м/с), глубины резания t (0,125...0,500 мм), угла наклона режущей кромки $\lambda = -30^\circ, -35^\circ, -40^\circ$. Установлены приближенные к оптимальным значения режимов резания и геометрии инструмента для получения минимальных значений Ra .

Теоретические расчеты Ra , результаты моделирования шероховатости и экспериментальные результаты отличаются не более 5 %.

На основании структурного математического моделирования чистовой обработки плоских поверхностей разработан ряд торцовых фрез, оснащенных СТМ. Результаты работы внедрены на ОАО "Беверс" (г. Бердичев) и ОАО "Верстатуниверсалмаш" (г. Житомир).

Список литературы: 1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с. 2. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении под ред. проф. Грабченко А.И. Харьков ХГПУ, 1999. – 554 с. 3. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Силы и мощность при обработке металлов торцовыми фрезами из СТМ// Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 1. – С. 47–50.

Сдано в редакцию 21.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.

К ВОПРОСУ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Михайлова Е.А., Михайлов В.А. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

In this work the questions of drawing of special covers on internal surfaces of items of mechanical engineering are indicated. The conditions are defined and the features of drawing of covers on internal cylindrical surfaces of items are probed. The classification of kinematic structure of movements of an item is presented at drawing cover from condition of raise of performance of process. The diagrammatic layout of the device for drawing cover is designed.

В настоящее время для повышения качества изделий машиностроения широко используются различные виды покрытий [1, 2, 3]. Покрытия позволяют существенно повысить технико-экономические показатели изделий при их эксплуатации [2]. Для нанесения покрытий используются различные методы и способы производства покрытий. При этом применяется множество видов, типов и вариантов покрытий. Наиболее перспективными являются вакуумные ионно-плазменные покрытия [1, 2]. Они позволяют значительно повысить качество изделий машиностроения и процесс эксплуатации машин. При этом данный метод позволяет вести управление процессом нанесения покрытий, что дает возможность расширения его технологических возможностей. Вместе с тем, существует большая проблема нанесения покрытий на внутренние цилиндрические поверхности изделий машиностроения при одновременном повышении производительности процесса [4, 5, 6]. Поэтому исследование этих вопросов является актуальной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.