

УДК 621.924:62-50

Ю.В. Петраков, профессор, д-р техн. наук,

В.В. Писаренко, аспирант

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

ур-86@yandex.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ХОЛОСТЫХ ДВИЖЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ 3D ПОВЕРХНОСТИ ПРОТЕЗА КОЛЕННОГО СУСТАВА ЧЕЛОВЕКА

Разработан алгоритм и прикладная программа проектирования холостых движений при шлифовании 3D поверхности протеза коленного сустава человека, обеспечивающая сшивание формообразующих траекторий по специальному гармоническому закону движения с минимизацией динамических нагрузок приводов станка с ЧПУ.

Ключевые слова: протез коленного сустава человека, шлифование, станок с ЧПУ.

Введение. За последние годы обработка 3D поверхностей ортопедических имплантатов вручную была постепенно вытеснена шлифовальными станками с ЧПУ. Развитие программного обеспечения постпроцессоров, применение CAD/CAM систем автоматизированного проектирования управляющих программ привело к значительному повышению производительности и появлению на рынке новых методов шлифования на станках с ЧПУ. Это в свою очередь привело к сокращению времени производственного цикла, благодаря чему производство индивидуальных имплантатов становится рентабельным и обеспечивает соответствующие для этого продукта нормы прибыли.

Взаимодействие 5-осевых шлифовальных станков с ЧПУ с программным обеспечением CAD/CAM стало эффективным методом удовлетворения спроса на рынке ортопедических имплантатов. Гибкость, производительность, автоматизация, интеграция, с ведущими системами CAD/CAM – это основные параметры, которые должны рассматриваться при поиске возможных решений.

Фирма ANCA предлагает шлифовальный станок с ЧПУ для шлифования ортопедических имплантатов – TX7+ (рисунок 1, а). Установленный на станине из полимербетона, что дает наилучшее гашение вибраций, станок обеспечивает безопасную эксплуатацию, жесткость, мощность и точность, необходимые для самых сложных операций. Станок TX7+ оснащен шпинделем на 37 кВт, 10000 об/мин, а также устройством правки у бабки шпинделя на 3000 об/мин. с возможностью жесткой установки вспомогательного устройства правки с быстросменными оправками HSK. Как дополнительная опция применяется магазин шлифовальных кругов емкостью до 21 пакета [1].

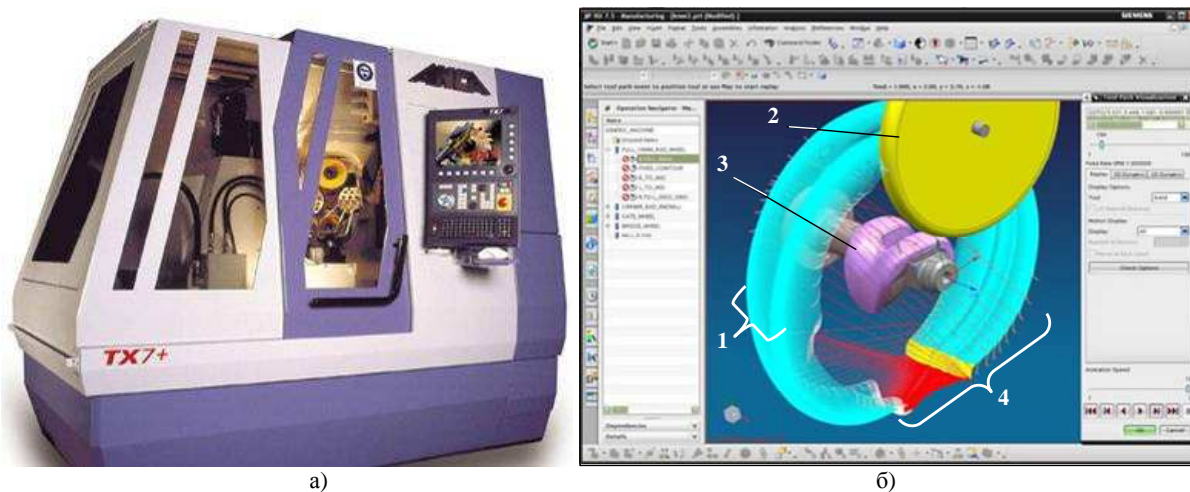


Рисунок 1 –Станок ANCA TX7+ (а), проектирование управляющей программы с помощью Siemens PLM NX (б)

Для автоматизации подготовки управляющих программ станков ЧПУ широко используют интегрированные CAD/CAM-системы, а при программировании обработки рабочей 3D поверхности эндопротеза вообще нельзя обойтись без них. Siemens UGS PLM Software занимает одно из ведущих положений в отрасли CAD/CAM систем. С помощью этой мощной системы предлагается метод проектирования управляющей программы для шлифования протезов коленных суставов человека на станке с ЧПУ. В окне визуализации (рисунок 1, б) показаны траектории формообразующего движения (линии 1) шлифовального круга 2 при обработке 3D поверхности детали 3.

Проведенный анализ показывает, что проектирование формообразующих траекторий обеспечивает воспроизведение сложной 3D поверхности шлифовальным кругом, инструментальная поверхность которого имеет форму тора. Однако, такая стратегия обработки предусматривает и движения без резания для перехода на соседнюю формообразующую траекторию (линии 4 на рисунке1, а). Траектории холостых движений проектируются по прямым линиям, что в месте сопряжения с формообразующей траекторией обязательно спровоцирует удар, или даже остановку процесса [2].

Целью данной статьи является представление разработанной на кафедре технологии машиностроения НТУУ «КПИ» стратегии проектирования траекторий холостых движений, обеспечивающих максимальную плавность процесса формообразования по критерию минимизации динамических нагрузок.

Теоретическая часть. Поставленная задача в общем виде может быть сформулирована следующим образом: найти оптимальный (по критерию минимума ускорений) закон движения, который сшивает два участка формообразующей траектории с конечными условиями – положение R_H , скорость \dot{R}_H и ускорение \ddot{R}_H в начале холостого хода и положение R_K , скорость \dot{R}_K и ускорение \ddot{R}_K в конце холостого хода.

Для обеспечения плавности движения холостого хода принят гармонический закон изменения ускорения $\ddot{R}(\alpha)$ (в полярной системе координат):

$$\ddot{R}(\alpha) = A \cos(k\alpha + \varphi), \tag{1}$$

где A – амплитуда, k – коэффициент, φ – фаза.

Последовательным интегрированием зависимости (1) определяются зависимости скорости:

$$\dot{R}(\alpha) = \int A \cos(k\alpha + \varphi) d\alpha = \frac{A}{k} (\cos \varphi \sin k\alpha + \sin \varphi \cos k\alpha) + C \tag{2}$$

и перемещения:

$$R(\alpha) = \int \left(\frac{A}{k} (\cos \varphi \sin k\alpha + \sin \varphi \cos k\alpha) + C \right) d\alpha = \frac{A}{k^2} (\sin \varphi \sin k\alpha - \cos \varphi \cos k\alpha) + C\alpha + C_1, \tag{3}$$

где C и C_1 – постоянные интегрирования.

В полученном уравнении движения на холостом ходу пять неизвестных: амплитуда A , коэффициент k , фаза φ , а также постоянные интегрирования C и C_1 , которые могут быть определены по начальным и конечным условиям. Однако уравнение (3) для определения коэффициента k является трансцендентным и аналитически не может быть решено.

Поэтому для решения задачи был предложен численный метод и специальная процедура, которая основана на использовании итерационного алгоритма. Вначале по аналитическим зависимостям вычисляются все неизвестные, кроме коэффициента, который предполагается определять численным методом.

Для вычисления фазы используется зависимость (1) с конечными условиями:

$$\begin{cases} \text{при } \alpha = 0 & \ddot{R}(\alpha) = \ddot{R}_H \\ \text{при } \alpha = \alpha_K & \ddot{R}(\alpha) = \ddot{R}_K \end{cases}, \tag{4}$$

где α_K - полярный угол холостого хода.

Из первого условия системы (4) определяется зависимость для амплитуды:

$$A = \frac{\ddot{R}_H}{\cos \varphi}. \tag{5}$$

После подстановки в систему (4) уравнения (1), зависимости (5) и ее решения можно получить зависимость фазы φ от коэффициента k :

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\ddot{R}_H \cos(k\alpha_K) - \ddot{R}_K}{\ddot{R}_H \sin(k\alpha_K)} \right). \tag{6}$$

Постоянные интегрирования C и C_1 вычисляются по формулам, полученным из уравнения (2) при начальных условиях (когда $\alpha = 0$, то $\dot{R}(\alpha) = \dot{R}_H$):

$$C = \dot{R}_H - \frac{A}{k} \sin \varphi \tag{7}$$

и из уравнения (3) при начальных условиях (когда $\alpha = 0$, то $R(\alpha) = R_H$) с использованием формулы (7):

$$C_1 = R_H + \frac{A}{k^2} \cos \varphi. \tag{8}$$

Алгоритм последовательно выполняет вычисления по зависимостям (5) – (8) и рассчитывает траекторию холостого хода $R(\alpha)$ по зависимости (3) при изменении коэффициента $k:=k+0.001$ до выполнения условия:

$$|R_{\Phi}(\alpha_K) - R(\alpha_K)| < \varepsilon, \quad (9)$$

где $R_{\Phi}(\alpha_K)$ – величина перемещения в начале следующего прохода по формообразующей траектории; ε – малая, наперед заданная, величина.

Для обеспечения быстрой сходимости алгоритма и устранения многозначности величины коэффициента k в алгоритме было также использовано второе условие:

$$R(\alpha_K) - R(\alpha_K - \delta) > 0, \quad (10)$$

где δ – шаг расчетов массивов траектории холостого движения.

Разработанные численные процедуры были встроены в прикладную программу проектирования траекторий формообразующих движений, интерфейс которой показан на рисунок 2.

Слева на интерфейсе расположены окна для ввода исходных данных процесса формообразования, форма поверхности протеза задается дискретным массивом координат в Декартовой системе. Заданная высота гребешка (R_z) определяет количество проходов по всей рабочей поверхности протеза [3]. Справа расположено анимационное окно движений детали 1 и шлифовального круга 2 при формообразовании. Внизу интерфейса расположен виртуальный осциллограф на который выводятся графики перемещения (линия 3 – по левой шкале), скорости и ускорения (линии 4 и 5 соответственно – по правой шкале). Размерности величин по правой шкале: для скорости – мм/с, для ускорения – мм/с².

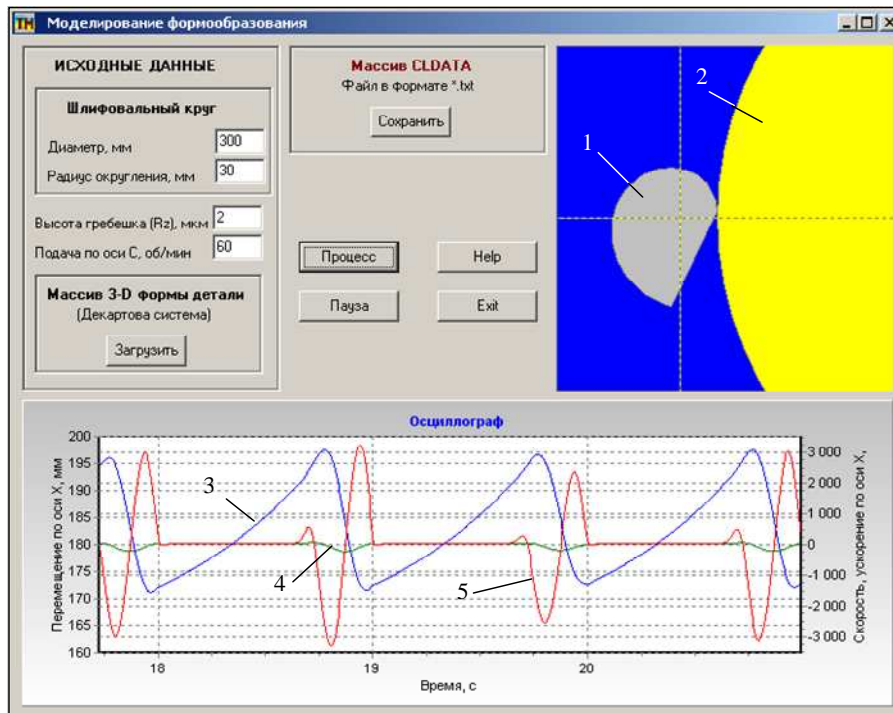


Рисунок 2 – Интерфейс прикладной программы

При моделировании процесса производные от перемещения рассчитываются численным методом с использованием формул численного дифференцирования с применением интерполяционного многочлена Лагранжа:

$$\dot{R}_i = \frac{1}{2\delta t} (-3R_i + 4R_{i+1} - R_{i+2}),$$

$$\ddot{R}_i = \frac{1}{(\delta t)^2} (R_i - 2R_{i+1} + R_{i+2}),$$

где δt – шаг по времени, i – номер узла.

Как показывает анализ полученных результатов, сшивание траектории формообразующего движения с траекторией холостого хода происходит без разрывов второй производной (линия 5 на рисунке 2), что гарантирует безударную работу приводов станка с ЧПУ.

Результаты проектирования, которые представляют промежуточный файл управления CLDATA для формирования управляющей программы станка с ЧПУ в G-кодах, можно сохранить в виде файла в формате *.txt (смотри рисунок 2).

Для визуализации полученных результатов была разработана специальная программа, интерфейс которой показан на рисунке 3.

Слева расположены кнопки управления, с помощью которых можно загрузить полученный при моделировании формообразования в первой прикладной программе файл CLDATA и файл данных числовых массивов 3D поверхности протеза в Декартовой системе координат. В графическом окне интерфейса (рисунок 3) отображаются: 1 – 3D поверхность протеза, 2 – шлифовальный круг, 3 – траектории формообразующих движений и 4 – траектории холостых движений в обращенной схеме.

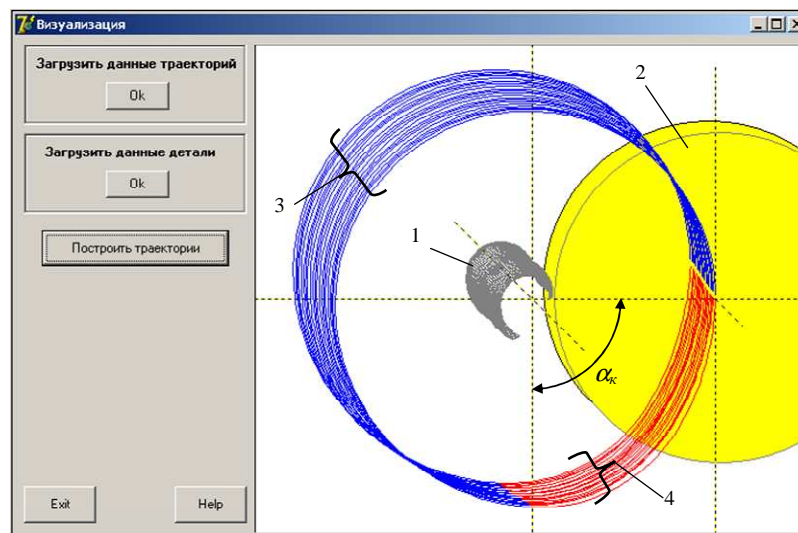


Рисунок 3 – Траектории формообразования и холостых движений

Сравнение траекторий холостых ходов (рисунок 3 – полярный угол α_K) с траекториями, которые спроектированы с помощью САМ системы *Siemens PLM NX* (смотри рисунок 1, а), не смотря на некоторое различие в форме протеза показывает, что разработанный алгоритм, в отличие от используемого в известной САМ системе, полностью удовлетворяет условиям минимизации динамических нагрузок на приводы шлифовального станка с ЧПУ.

Для практической проверки полученных результатов, основываясь на экспериментальных данных определения режима бездефектного шлифования [4], на операции шлифования (рисунок 4, а) был изготовлен экспериментальный образец (рисунок 4, б). Материал заготовки - титановый сплав марки Grade 5 ALI ASTM F67-89, а предварительная обработка фрезерованием выполнялось на фрезерном станке с ЧПУ модели Schaublin 60.



а)



б)

Рисунок 4 – Шлифование рабочей поверхности протеза (а), изготовленная экспериментальная деталь (б)

При выполнении операции шлифования 3D поверхности протеза наблюдением за перемещениями суппортов станка и показаниями потребляемой приводами мощности на стойке ЧПУ было полностью подтверждено решение поставленной задачи.

Выводы

1. Разработанная математическая модель траекторий холостых движений, численная процедура и алгоритм ее решения при шлифовании 3D поверхности протеза коленного сустава человека обеспечивает максимально плавное сопряжение траекторий формообразующих движений по критерию минимума ускорений, что гарантирует безударную работу приводов станка с ЧПУ и способствует повышению производительности.

2. Предложенная методика может быть использована при проектировании траекторий движения и при других видах многопроходной обработки сложных поверхностей.

Бibliографический список использованной литературы

1. ANCA Medical Brochure [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.anca.com.
2. Петраков Ю.В. Урахування динамічних характеристик формоутворюючих рухів при проектуванні програми управління для верстатів з ЧПУ / Ю.В. Петраков // Вісник Житомирського технологічного університету. — Житомир, 2007. — Вип. 5. — Т. 2. — С. 142–150.
3. Петраков Ю.В. Визначення режиму фрезерування 3D поверхонь для забезпечення якості / Ю.В. Петраков, В.В. Писаренко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. — Краматорськ, 2012. — Вип. 30. — С. 150–157.
4. Петраков Ю.В. Визначення бездефектного режиму шліфування титанових сплавів / Ю.В. Петраков, В.В. Писаренко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць. — Житомир, 2011. — № 10. — С. 285–297.

Поступила в редакцію 19.03.2013 г.

Петраков Ю.В., Писаренко В.В. Проектування траєкторій холостих рухів при шліфуванні 3D поверхні протезу колінного суглоба людини

Розроблено алгоритм та прикладна програма проектування холостих рухів при шліфуванні 3D поверхні протезу колінного суглоба людини, які забезпечують зшивання формоутворюючих траєкторій за спеціальним гармонічним законом руху з мінімізацією динамічних навантажень приводів верстата з ЧПК.

Ключові слова: протез колінного суглоба людини, шліфування, верстат з ЧПК.

Petrakov Yu.V., Pysarenko V.V. Design of trajectories of motions at 3D surface grinding of knee-joint prosthetic of man

An algorithm and application program of design of single motions is developed at grinding of 3D surface of knee-joint prosthetic appliance of man, providing sewing together of shape-generating trajectories on the special harmonic law of motion with minimization of the dynamic loadings of drives of machine-tool with CNC.

Keywords: knee-joint prosthetic of man, grinding, machine-tool with CNC.