

УДК 621.9.06-529

А.И. Лещенко, канд. техн. наук

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»

ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500

Lehenko_a_i@mail.ru

ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ СЛОЖНО-ПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КРИВИЗНЫ ЕЕ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ

Настоящая работа посвящена исследованию точности обработки на станках с ЧПУ сложно-профильных поверхностей параллельного переноса концевыми сферическими фрезами. Разработана расчетно-аналитическая модель определения значений смещения инструмента между проходами, обеспечивающая заданную высоту «гребешка» между ними, на всех участках обрабатываемой поверхности с топологией данного типа. Приведены функциональные зависимости определения геометрии элементов срезаемого слоя сферическими фрезами и даны рекомендации по созданию условий близких к равномерному фрезерованию.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, точность обработки, геометрия сложно-профильной поверхности.

В современном машиностроении существует широкая номенклатура деталей, геометрия которых включает сложно-профильные поверхности. К таким деталям относятся копиры, матрицы и пуансоны штампов, пресс-формы, модели для точного литья, лопатки турбин и пр. Для деталей этого типа характерной особенностью являются высокие требования по точности и шероховатости, и как следствие большая трудоемкость изготовления. Современным направлением в технологии машиностроения является фрезерование методом построения сложной поверхности сферическими фрезами на станках с ЧПУ, имеющих от 3 до 5 одновременно управляемых координат.

К сложно-профильным поверхностям можно отнести те поверхности, в точках которых отсутствует направление с нулевым значением индикатрисы кривизны, а уравнение самой индикатрисы отличается от уравнения окружности. Согласно этому определению окрестности точек сложно – профильной поверхности характеризуются значениями ее главных радиусов кривизны – максимального и минимального (гауссовой кривизной) или ориентацией ее главных секущих плоскостей, в которых лежат указанные радиусы.

В настоящее время существует широкий спектр универсальных систем автоматизированной подготовки управляющих программ – CAM систем ("ADEM", "T-FLEX NC" "CAMWorks", "SURFCAM Velocity" и др.), для которых исходными данными являются геометрические параметры твердотельной модели поверхности детали. Вместе с тем универсальность CAM систем, созданных для всего многообразия поверхностей деталей и схем формообразования служит причиной того, что инструментальный проектирования не учитывает в полной мере особенностей реального процесса резания. Например, на различных участках обработки изменяется максимальная толщина срезаемого слоя в зависимости от положения сечения эффективного диаметра фрезы по отношению к оси вращения фрезы, топологии обрабатываемой поверхности и направления вектора контурной подачи. Получили развитие вопросы обработки концевыми радиусными фрезами пространственно-сложных поверхностей при фрезеровании участков со ступенчатым припуском, вдоль образующей с постоянным углом наклона [1]. При этом процесс рассматривался только в направлении вектора подачи без учета влияния на параметры процесса резания, возможного изменения кривизны обрабатываемой поверхности. Поэтому возникает необходимость в расширении управляемых параметров при построении алгоритмов технологических схем формообразования.

Для систематизации известных способов формообразования поверхностей, исследования процессов их обработки инструментами различной формы, а так же проектирования самих инструментов необходима геометрическая классификация поверхностей деталей. Известны, многократные попытки классифицировать поверхности технических форм, сгруппировать разнообразные детали по определенным признакам в однотипные семейства для типизации технологических процессов их изготовления [2]. Вместе с тем можно утверждать, что в настоящее время нет научной классификации поверхностей технических форм, в полной мере удовлетворяющей потребностям теории формообразования поверхностей. Поэтому в данной работе ограничимся рассмотрением процесса формообразования линейчатых и нелинейчатых поверхностей параллельного переноса, образованных поступательным плоскопараллельным перемещением образующей – плоской кривой линии по другой плоской криволинейной направляющей, при этом образующая и направляющая лежат в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Можно сказать, что частным случаем поверхностей переноса являются

поверхности вращения, которые, как правило обрабатываются на станках токарно – карусельной группы. Поверхности этого типа широко применяются в деталях машин, а средства построения их моделей включают современные CAD системы.

Целью данной работы является исследование формообразования поверхностей параллельного переноса с целью определения траектории перемещения инструмента, при которой обеспечивается требуемая точность и постоянство значения остаточного припуска наряду, с созданием условий способствующих формированию процесса обработки близкого к процессу равномерного фрезерования.

В настоящее время вопросам анализа кривизны локальных участков сложно-профильных поверхностей посвящен ряд новых функционалов CAD систем. Например, пакет AutoCAD 2011 дополнен командами, позволяющими получить информацию о гладкости поверхности модели, значениях минимальной, максимальной и гауссовой кривизны. Данные параметры сложно-профильной поверхности являются основой решения наиболее сложной задачи, при разработке технологии чистовой обработки на станках с ЧПУ, а именно – оптимального выбора параметров инструмента и траектории его перемещений на переходах программной операции. В этом случае критериями оптимизации служит, прежде всего, точность формообразования, стойкость инструмента и сравнительная простота аналитического расчета технологических параметров подналадки на операцию. При этом припуск на доводку поверхности шлифованием должен быть минимальный, с наименьшим отклонением от номинального значения и как следствие минимальным объемом трудозатрат на ее доводку после фрезерования. Производительность обработки безусловна важно, однако с учетом того, что сложно-профильные поверхности, как правило, не обрабатываются серийно лезвийной обработкой, ее роль не имеет решающего значения.

Припуск на доводку сложно-профильной поверхности – допуск на оребрение, зависит от топологии поверхности и определяет шаг смещения между соседними проходами или строками, обеспечивающий допустимую высоту «гребешка» между ними для всей обрабатываемой поверхности детали. Алгоритмы расчета траектории инструмента при заданном оребрении анонсированы в разных САМ системах. Например, система SURFCAM при расчете управляющих программ для деталей со сравнительно простыми поверхностями дает удовлетворительные результаты по высоте «гребешка» между проходами. Однако при усложнении поверхностей и снижении допуска на «оребрение» возникают проблемы в процессе генерации программ. Следовательно, обосновано возникает необходимость более детального рассмотрения геометрических параметров локальной топологии сложно – профильной поверхности при решении задачи синтеза наивыгоднейшего [1] варианта технологии обработки детали.

Поверхность параллельного переноса (рисунок 1) получена движением параллельно плоскости ZX гладкой кривой $z=u(x)$ – образующей так, что точки ее граничного интервала скользят параллельно плоскости ZY по направляющей – дважды дифференцируемой кривой $z=v(y)$. Учитывая, что и точке начала координат образующая и направляющая пересекаются, и при этом $u(0)=v(0)=z_0$ уравнение поверхности параллельного $Fz(x, y)$ переноса имеет вид:

$$Fz(x, y) = u(x) + v(y) - z_0 \quad (1)$$

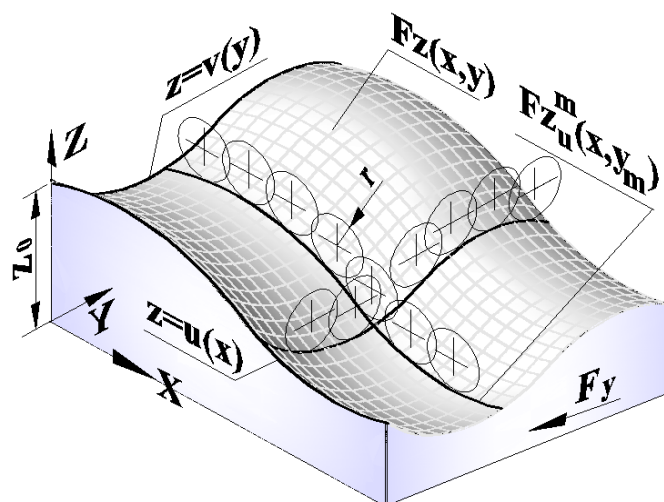


Рисунок 1 – Посторение поверхности параллельного переноса.

В координатной системе XYZ рассмотрим схему расчета замкнутых интервалов между проходами $[x_1, x_2] [x_2, x_3] \dots [x_{i-1}, x_i]$ при построчном фрезеровании концевыми сферическими фрезами сложной – профильной поверхности параллельного переноса $Fz(x, y)$. Определим условие обработки. Предварительно, с припуском на чистовую обработку Δt , сформирована поверхность подобная заданной на чертеже детали. В процессе чистового фрезерования ось фрезы радиуса r остается параллельной оси Z (перемещается заготовка с осевой подачей F_y), а вектор контурной подачи F в текущей точке траектории направлен по касательной к направляющей $z = v(y)$. В (рисунок 2) произвольной плоскости $Y = y_m$, перпендикулярной плоскости XY , определим исходную точку расчета (x_1, y_m) .

Координаты точек (X_n, Y_n) на расстоянии L в направлении нормали к образующей, с уравнением вида (1):

$$Fz_u^m(x, y_m) = u(x) + v(y_m) - z_0, \quad (2)$$

определяются функционально:

$$X_n(x, y_m, L) = x - \frac{L \cdot \frac{d}{dx} Fz_u^m(x, y_m)}{\sqrt{\left(\frac{d}{dx} Fz_u^m(x, y_m)\right)^2 + 1}}, \quad Z_n(x, y_m, L) = Fz_u^m(x, y_m) - \frac{L}{\sqrt{\left(\frac{d}{dx} Fz_u^m(x, y_m)\right)^2 + 1}}. \quad (3)$$

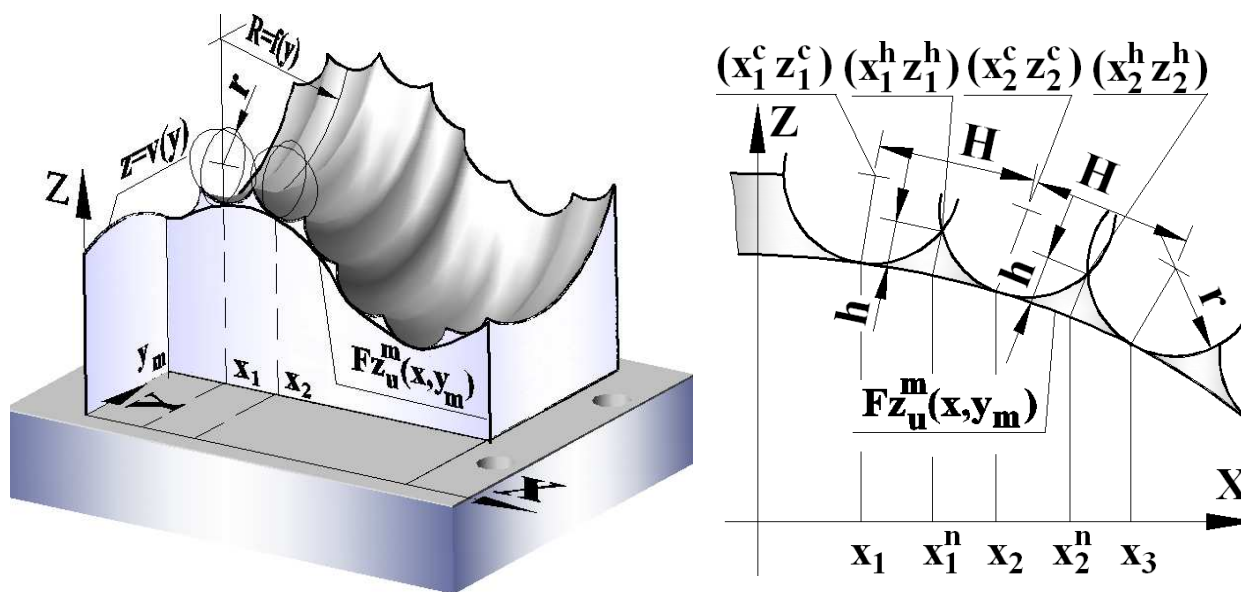


Рисунок 2 – Схема определения граничных точек интервалов при постоянной высоте оребрения h

Для расчета граничных точек интервала $x_1, x_2, x_3 \dots x_i$, формирующих расстояние между проходами, при которых в плоскости $Y = y_m$ сохраняется постоянная высота оребрения h , составляем систему четырех уравнений, руководствуясь следующими принципами:

– в точке $(x_1, y_m, Fz_u^m(x_1, y_m))$ окружность радиуса r касается образующей $Fz_u^m(x, y_m)$, проходит через точку пересечения с окружностью соседнего интервала $(x_1^h, y_m, Fz_u^m(x_1^h, y_m))$, ее центр лежит в точке с координатами: $x_1^C = X_n(x_1, y_m, r)$, $z_1^C = Z_n(x_1, y_m, r)$ (3);

– в точке $(x_2, y_m, Fz_u^m(x_2, y_m))$ окружность радиуса r касается образующей $Fz_u^m(x, y_m)$, проходит через точку пересечения с окружностью соседнего интервала $(x_1^h, y_m, Fz_u^m(x_1^h, y_m))$, ее центр лежит в точке с координатами: $x_2^C = Xn(x_2, y_m, r)$, $z_2^C = Zn(x_2, y_m, r)$ (3);

– нормаль к образующей $Fz_u^m(x, y_m)$ в точке $(x_1^n, y_m, Fz_u^m(x_1^n, y_m))$ проходит через точку пересечения окружностей (x_1^h, y_m, z_1^h) радиусом r ;

– расстояние в направлении нормали к образующей $Fz_u^m(x, y_m)$ от точки $(x_1^n, y_m, Fz_u^m(x_1^n, y_m))$ до точки пересечения окружностей (x_1^h, y_m, z_1^h) равно допуску на оребрение h .

Систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными: x_1^n , x_1^h , z_1^h и искомым x_2

$$\begin{cases} (x_1^h - Xn(x_1, y_m, r))^2 + (z_1^h - Zn(x_1, y_m, r))^2 - r^2 = 0 \\ (x_2^h - Xn(x_2, y_m, r))^2 + (z_1^h - Zn(x_2, y_m, r))^2 - r^2 = 0 \\ \frac{x_1^n - x_1^h}{\frac{d}{dx_1^n} Fz_u^m(x_1^n, y_m)} + (Fz_u^m(x_1^n, y_m) - z_1^h)^2 = 0 \\ (x_1^n - x_1^h)^2 + (Fz_u^m(x_1^n, y_m) - z_1^h)^2 - h^2 = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

можно решить аналитически или методом итераций, с приближенным прогнозированием значения координаты x_1^n :

$$x_1^n = x_i + 2 \cdot \sqrt{r^2 - (h - r)^2} \cdot \cos \left(\arctg \left(\frac{d}{dx_1} Fz_u^m(x_i, y_m) \right) \right). \quad (5)$$

Ширина интервалов $[x_1, x_2] [x_2, x_3] \dots [x_{i-1}, x_i]$ или расстояние между проходами по хорде образующей $H(x_i, x_{i+1})$ определяется функциональной зависимостью (6):

$$H(x_i, x_{i+1}) = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (Fz_u^m(x_i, y_m) - Fz_u^m(x_{i+1}, y_m))^2} = f \left(r, \frac{\frac{d}{dx_1} Fz_u^m(x_i, y_m)}{\frac{d}{dx_2} Fz_u^m(x_{i+1}, y_m)}, \frac{d^2}{dx_1^2} Fz_u^m(x_{i,i+1}, y_m) \right)$$

Ширина интервалов не зависит от текущей координаты y_m , а только влияет на значения координат граничных точек по оси Z . Значение $H(x_i, x_{i+1})$ возрастает с увеличением радиуса фрезы r и уменьшением соотношения первых производных в граничных точках интервала. Уменьшению H способствуют увеличение кривизны траектории перемещения инструмента – направляющей поверхности $z = u(x)$ и ее вогнутость, т. е. отрицательное значение ее первой производной.

Свойство построения поверхности параллельного переноса позволяют сделать вывод, что значения высоты оребрения h и ширины интервалов H , рассчитанные в произвольном сечении перпендикулярном направлению подачи F , сохраняют свое значение для всей поверхности с указанными свойствами.

При фрезеровании сложно-профильных поверхностей сферическими фрезами с постоянной подачей глубина резания, измеренная в плоскости перпендикулярном оси вращения фрезы и угол контакта зубьев фрезы, остаются постоянными. Изменяются площадь поверхности резания, ширина фрезерования и скорость резания в сечениях перпендикулярных оси фрезы.

Срезаемая стружка, формируется лезвием сферической фрезы радиуса r и имеет в плоскости осевого сечения серповидную форму с переменной толщиной по углу профиля ϕ^i и текущему углу контакта ψ^i фрезы. Заготовка, с припуском на чистовую обработку Δt – по условию одинаковым на всей обрабатываемой поверхности, фрезеруется с подачей S_z на зуб. При этом прослеживается переменная ширина фрезерования вследствие изменяющейся кривизны сложно-профильной поверхности.

С целью определения, для текущей точки поверхности (рисунок 3) (x_k, y_k, z_k) , значений координат точек $P_{FC}(x^P, y^P, z^P)$ линии пересечения поверхности детали $Fz(x, y)$ и сферической фрезы радиуса r , с центром фрезы в точке $Xc_k = Xn(x_k, y_k, r - \Delta t)$; $Zc_k = Zn(x_k, y_k, r - \Delta t)$ (3), составим систему уравнений:

$$\begin{cases} (x^P - Xn(x_k, y_k, r - \Delta t))^2 + (z^P - Zn(x_k, y_k, r - \Delta t))^2 + (y^P - y_k)^2 = r^2 \\ Fz(x^P, y^P) = z^P \end{cases} \quad (6)$$

Данную систему можно решить аналитически, при явном задании уравнений образующей и направляющей или методом итераций по ниже приведенному алгоритму.

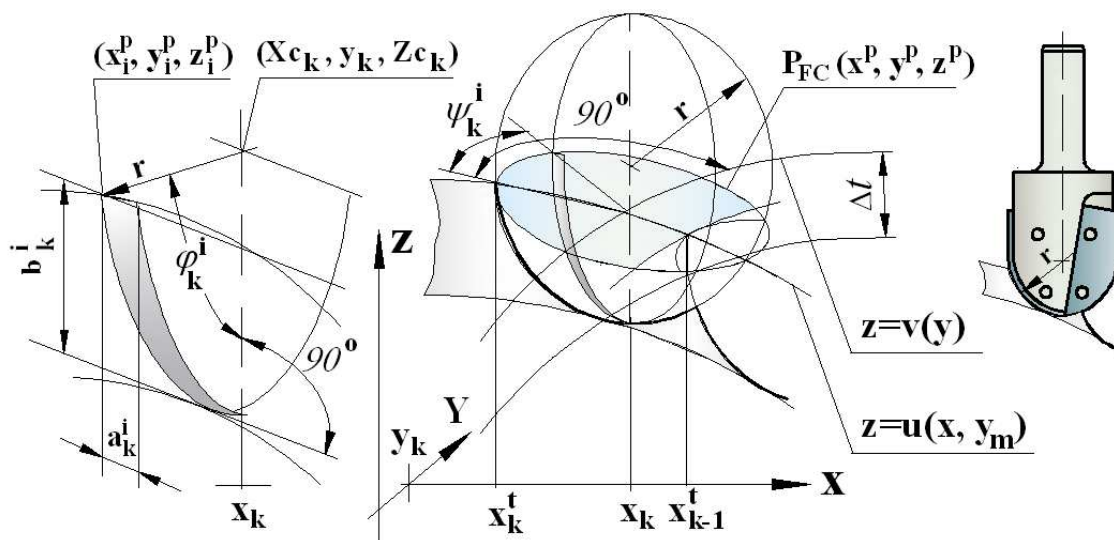


Рисунок 3 – Схема формирования сечения среза при обработке поверхности параллельного переноса с образующей $z = u(x)$ и направляющей $z = v(y)$ сферической фрезой радиуса r

В системе уравнений (6) граничные значения изменения x^P в плоскости $Y = y_k$ можно получить при определении координат точек пересечения окружности $Xn(x_k, y_k, r)$ с образующей, $Fz_u^k(x_k, y_k)$ однако, учитывая расчетные параметры интервала предыдущего прохода поисковые итерации необходимо выбирать из интервала $[x_k^t \leq x^P \leq x_{k-1}^t]$. Задаваясь малодискретной последовательностью значений из выбранного интервала можно получить функциональное решение системы (7) в виде табулированной зависимости $y^P(x^P)$. Точки линии пересечения $P_{FC}(x^P, y^P(x^P), Fz(x^P, y^P(x^P)))$ можно отнести к точкам условного эффективного диаметра фрезы по аналогии с определением принятым для фрезерования поверхности постоянной кривизны.

Текущие значения угла контакта ψ_k^i и толщины среза a_k^i определяют следующие зависимости:

$$\psi_k^i(x_k^P, y_k^P) = \arctg\left(\frac{y_k - y_k^P}{Xc_k - x_k^P}\right); \quad a_k^i = s_z \cdot \sin(\psi_k^i). \quad (7)$$

В текущей точке условного диаметра фрезы P_{FC} , с углом контакта ψ_k^i , угол профиля толщины среза ϕ_k^i , т. е. центральный угол, охватывающий дугу срезаемого слоя равен:

$$\phi_k^i(x_k^P, y_k^P, z_k^P) = \arctg\left(\frac{\sqrt{(Xc_k - x_k^P)^2 + (y_k - y_k^P)^2}}{Zc_k - z_k^P}\right) \quad (8)$$

Длина активных участков режущих лезвий, зависящая от текущей ширины фрезерования b_k^i , измеренной параллельно оси фрезы относительно плоскости проходящей через точку $(x_k, y_k, z_k - \Delta t)$, равна:

$$b_k^i(x_i^P, y_i^P, z_i^P) = r - r \cdot \cos(\phi_k^i) = r - r \cdot \cos(\phi_k^i(x_i^P, y_i^P, z_i^P)) \quad (9)$$

Скорость резания в исследуемых точках условного диаметра фрезы, при угловой частоте вращения фрезы ω , равна:

$$V_{рез}^i(x_i^P, y_i^P, z_i^P) = \omega \cdot r \cdot \cos(\phi_k^i(x_i^P, y_i^P, z_i^P)) \quad (10)$$

В перечень основных параметров процесса фрезерования входят толщина a_k^i и ширина срезаемого слоя b_k^i , оказывающие доминирующее влияние на окружную силу резания, а также скорость резания $V_{рез}^i$ – переменная, как по дуге угла контакта, так и по длине режущей кромки фрезы, уменьшаясь к точке центра, где скорость резания близка к нулю. С целью вывести эту точку из зоны резания ось фрезы наклоняют в направлении движения подачи или в направлении, перпендикулярном этому перемещению на угол $10^0 \div 12^0$. В этом случае приведенный расчетный алгоритм в целом сохраняется, но дополняется тригонометрическими коэффициентами в формулах для определения координат центра фрезы (3).

На сегодняшний день наблюдается постоянный прогресс САМ-технологий, совершенствуется современный инструментальный создания различных стратегий обработки. Одновременно сохраняет свою актуальность, следующая задача: разделить обрабатываемые поверхности на локальные участки и с помощью различных схем программирования траектории перемещения инструмента, достигнуть приемлемой точности обработки поверхности при удовлетворительной стойкости инструмента. В контексте решения этой задачи следует отметить, что геометрия поверхности параллельного переноса не изменится, если направляющую кривую сделать образующей, т. е. все выше приведенные расчеты можно провести по двум направлениям, а затем сравнить условия резания – ширину срезаемого слоя (9) и скорость резания (10). Аналитически установлено, что колебание значений элементов геометрии среза возрастает на участках с отрицательной гауссовой кривизной [2]. Следует отметить, что при обработке сложно-профильных поверхностей – поверхностей с переменной кривизной, неизбежно различие условий резания в процессе формообразования и как следствие, возникновение погрешностей обработки. Снизить возникающие отклонения можно путем построения подпрограммы коррекций на локальных участках траектории основанных на изменении подачи с целью поддержания постоянного значения площади среза.

Современные системы ЧПУ, с постоянно растущими технологическими возможностями станков, позволяют варьировать режимы резания на локальных участках обрабатываемой поверхности. В этом случае идеализированные схемами обработки, взятые за основу при разработке УП с помощью CAD/CAM систем, являются сдерживающим фактором в повышении производительности механосборочного производства. Это происходит из-за недостаточной изученности динамических процессов в зоне резания, особенно при объемном фрезеровании, вследствие отсутствия формализованного описания возможных колебаний параметров процесса резания в зависимости от топологии обрабатываемой поверхности. Поэтому, в этой области имеются большие неиспользованные резервы, реализация которых требует радикального совершенствования технологии с целью более полного использования потенциальных возможностей многокоординатных станков с ЧПУ современных конструкций. Соответствует этому требованию и делает актуальным исследование обработки отдельных видов топологических участков поверхностей деталей (например, поверхностей параллельного переноса) с целью построения библиотек параметризованных программных модулей для систем ЧПУ, с последующим их включением их в основную технологическую программу обработки на станках с программным управлением.

Библиографический список использованной литературы

1. Батуев В.В. Расчет толщины срезаемого слоя при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / В.В. Батуев // Известия Челябинского научного центра. — Челябинск: Челябинский науч. центр, 2006. — Вып. 3 (33). — С. 29.
2. Лещенко А.И. Достижение требуемой точности сложно-профильных поверхностей путем параметризации программной коррекции погрешностей обработки на станках с ЧПУ / А.И. Лещенко //

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. — Маріуполь: ПДТУ, 2011. — Вип. 23. — С. 112–116.

Поступила в редакцію 12.03.2012 г.

Лешенко О.І. Точність обробки складно-профільних поверхонь паралельного перенесення в залежності від кривизни її різних ділянок

Робота присвячена дослідженню точності обробки на верстатах з ЧПУ складно-профільних поверхонь паралельного перенесення кінцевими сферичними фрезами. Розроблена розрахунково-аналітична модель визначення значень зміщення інструменту між проходами, що забезпечує задану висоту «гребінця» між ними, на всіх ділянках оброблюваної поверхні з топологією даного типу. Приведені функціональні залежності визначення геометрії елементів шару зрізу сферичними фрезами і надані рекомендації по створенню умов близьких до рівномірного фрезерування.

Ключові слова: верстати з ЧПУ, точність обробки, геометрія складно-профільної поверхні.

Leshenko A.I. Exactness of treatment of difficulty-type surfaces of parallel transfer in dependence on curvature of its different areas

The real work is devoted research of exactness of treatment on machine-tools with CNC difficulty-type surfaces of parallel transfer end spherical milling cutters. The calculation-analytical model of determination of values of displacement of instrument is developed between passage-ways, providing the decision height of remain of material of purveyance between them, on all of areas of the processed surface with the topology of this type. Functional dependences of determination of geometry of elements of the cut away layer are resulted by spherical milling cutters and appointed recommendation on creation of terms near to the even milling.

Keywords: machine-tools with CNC, exactness of treatment, geometry of difficulty-type surface.