УДК 621.01(06)

А.И. **Лещенко,** канд. техн. наук, доц.
Приазовский государственный технический университет, Украина
Тел/Факс: +38 (0629) 529924; E-mail: Leshenko_a_i@mail.ru

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБАТЫВАЕМЫХ СЛОЖНО -ПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация: *В статье рассматриваются вопросы получения расчетно-аналитических зависимостей для определения кинематических параметров резания, связанных с изменением топологических характеристик сложно – профильных поверхностей. С точки зрения теории поверхностей и схем ее обработки, обусловленных геометрией и траекторией перемещения инструмента, получены соотношение между длиной контакта лезвия фрезы с обрабатываемой поверхностью и ее влияния на высоту микронеровностей.*

Ключевые слова: *станки с ЧПУ, обработка сложно-профильных поверхностей.*

1. Введение

В современном машиностроении происходит постоянное повышение требований к качеству деталей машин, которое характеризуется такими факторами, как состоянием поверхностного слоя (его шероховатостью, параметрами напряжённо-деформированного состояния), точностью размеров отдельных поверхностей и их относительного расположения, определяющего точность геометрической формы детали. Наибольшую трудоемкость с точки зрения подготовки производства, обеспечения требуемой шероховатости ($Ra<0,63$) и точности формы, вызывает изготовление деталей со сложно-профильными поверхностями, такими как матрицы и пуансоны штампов, пресс-формы, модели для точного литья. На сегодняшний день, актуальность обработки деталей этого типа вызвана следующими обстоятельствами.

1. Современная экономическая ситуация в мире и на Украине заставляет искать внутренние резервы экономии - меньше заказывать дорогостоящей оснастки вне предприятий, а для ее производства переориентировать собственные производственные мощности и труд своих освобождающихся сотрудников. Для выполнения поставленной задачи должно быть с максимальной эффективностью использовано существующее на данном предприятии оборудование, например, реализована возможность построения технологии обработки сложно-профильных поверхностей на трех координатных станках с контурной системой управления.

2. Как правило, заказы вне предприятия сопровождаются довольно длительным согласованием технического задания на изготовление оснастки, что значительно увеличивает сроки подготовки производства и как следствие приводит к выходу на рынок, с готовой продукцией, позже конкурентов. Кроме этого, выполнение заказов сторонними организациями не дает возможность оперативно корректировать техническую документацию изделия, отслеживая изменения связанные с совершенствованием конструкции узлов.

Современным методом обработки сложно-профильных поверхностей является фрезерование концевыми радиусными фрезами на станках с ЧПУ, с автоматизированной подготовкой управляющих программ CAM системами, для которых исходными данными являются геометрические параметры поверхностей твердотельной модели детали [1].

Предприятия авиационной или автомобильной промышленности, используя мощный лабораторный комплекс, имеют возможность детально отладить технологию лезвийной обработки сложно – профильных поверхностей, даже если для этой цели понадобиться «загнать в брак» десяток заготовок, идентичность физико-механических характеристик которых, обеспечивает многократный входной контроль. На предприятиях тяжелого машиностроения, с единичным производством комплектующих узлов или оснастки, параметры подналадки фактически должны рассчитываться по результатам контрольных измерений выполненных на переходах программной операции, при этом возможность брака в процессе обработки дорогостоящей заготовки должно быть исключено в принципе. Основные вопросы создания технологии обработки сложно-профильных поверхностей крупногабаритных деталей рассмотрены автором в ряде публикаций. Рассмотрена последовательность расчета количественной оценки погрешности формообразования сложно-профильной поверхности на основе строгой формализации границ поля допуска, при этом обоснована возможность построения функционалов, позволяющих программными средствами снизить составляющую погрешности обработки связанную с ее топологическими характеристиками [2] [3]. Теоретически обосновано и подтверждено практическими результатами определение траектории перемещения инструмента, при которой обеспечивается требуемая точность и постоянство значения остаточного припуска (оребрения) при обработке поверхностей параллельного переноса, с созданием условий способствующих формированию процесса обработки близкого к процессу равномерного фрезерования [4].

Целью данной работы является исследование предельных значений микрогеометрических отклонений – шероховатости поверхности, в связи с изменением топологических характеристик обрабатываемой сложно-профильной поверхности, по ходу траектории перемещения инструмента.

2. Основное содержание и результаты работы

Современным направлением в технологии машиностроения является фрезерование на станках с ЧПУ, методом построчного огибания, сложно-профильных поверхностей концевыми сферическими фрезами радиуса *r*. [5]. В данной работе ограничимся рассмотрением процесса формообразования предварительно сформированной (рис. 1), гладкой, дважды дифференцируемой в заданном интервале, сложно - профильной поверхности:

$$Z = f(x, y). \tag{1}$$

Для проведения исследований возникает необходимость построения теоретической базы на основе строгой формализации параметров процесса фрезерования сложно – профильных поверхностей. При эквидистантном расчете траектории перемещения инструмента вектор подачи *F* соотносится к центру фрезы О радиуса *r*, ось которой наклонена на угол ω.

Если рассматривать процесс формообразования методом чистового фрезерования с малой контурной подачей *F*, то с некоторым допущением, геометрические соотношения в системе «фреза - поверхность» можно проследить на части сферы радиуса *r*, границы которой в i-ой точке траектории (рис. 2) определяет топология поверхности ис-

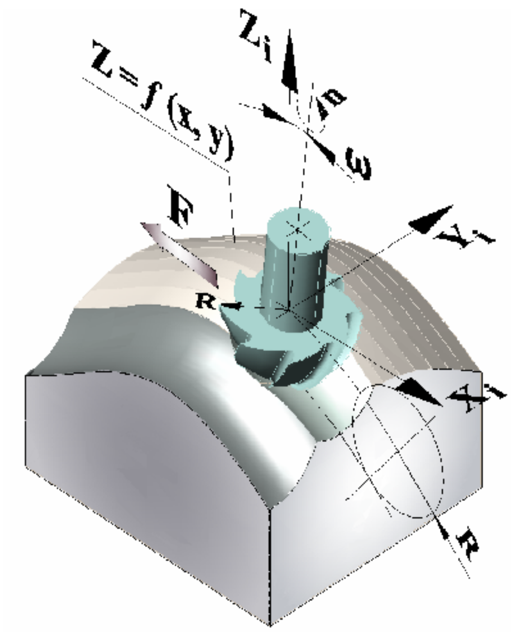


Рис. 1. Схема фрезерования сложно – профильной поверхности

ходя из текущих ширины фрезерования a_e^i, глубины резания a_P^i и толщины срезаемого слоя b^i.

Тогда эффективной режущей кромкой в i_той точке траектории можно считать пространственную кривую, образованную пересечением сферической части фрезы радиуса R и поверхности приближенной на предыдущих переходах к поверхности с номинальной геометрией $Z = f(x, y)$.

Эффективная режущая кромка и в целом элемент срезаемого слоя q, за каждый оборот фрезы в металле, определяют углы контакта в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Расстояние между проходами, при построчном фрезеровании, всегда меньше диаметра фрезы, поэтому углы контакта всегда меньше 180^0 и зависят от кривизны участка обрабатываемой поверхности.

Выделим два угла контакта, для которых сформулируем следующие определения:

• радиальный угол контакта ψ_r^i - центральный угол лежащий в плоскости перпендикулярной оси фрезы, устанавливает границы входа и выхода зубьев фрезы. Хорда, стягивающая радиальный угол контакта ψ_r^i определяет текущую ширину фрезерования a_e^i;

• осевой угол контакта ψ_v^i - центральный угол лежащий в плоскости проходящей через ось фрезы, устанавливает границы контакта режущей кромки зубьев фрезы с заготовкой в осевой плоскости. ψ_v^i - зависит от радиуса R фрезы и текущей глубины резания a_p^i.

В системе трансформаций зоны резания, осевой ψ_v^i и радиальный ψ_r^i углы контакта, фактически являются зенитным и азимутальным углами, сферической системы координат.

Поместим в текущую точку $\mathrm{O}(\mathrm{x}_0^{\mathrm{i}}, \mathrm{y}_0^{\mathrm{i}}, \mathrm{z}_0^{\mathrm{i}})$ эквидистантной траектории центра фрезы, начало сферической системы координат. Тогда уравнение сферы радиуса r (2) и уравнение номинальной поверхности (1) в сферической системе координат (3), имеют вид:

$$R(\psi_{\mathrm{v}},\ \psi_{\mathrm{r}}) = \begin{cases} r \cdot \sin(\psi_{\mathrm{v}}) \cdot \cos(\psi_{\mathrm{r}}) \\ r \cdot \sin(\psi_{\mathrm{v}}) \cdot \sin(\psi_{\mathrm{r}}) \\ r \cdot \cos(\psi_{\mathrm{v}}) \end{cases}, \qquad (2)$$

$$Z(\psi_v, \psi_r) = f\left[\left(r \cdot \sin(\psi_v) \cdot \cos(\psi_r) + x_0^i\right),\ \left(r \cdot \sin(\psi_v) \cdot \sin(\psi_r) + y_0^i\right)\right] - z_0^i - r \cdot \cos(\psi_v). \quad (3)$$

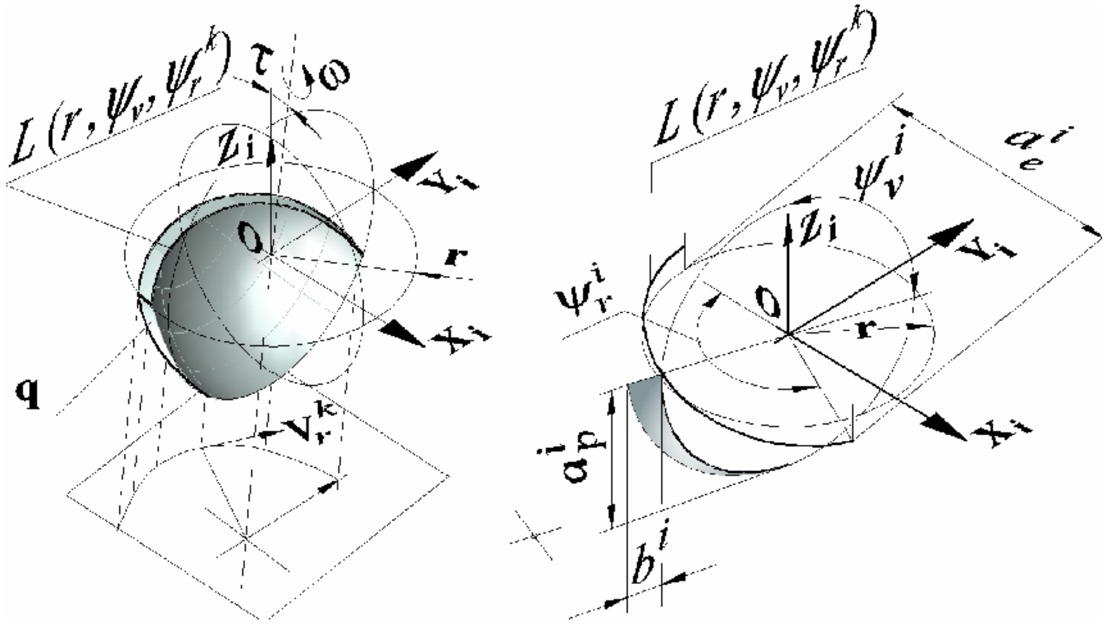


Рис. 2. Геометрическое представление зоны резания при обработке сложно – профильных поверхностей концевыми сферическими фрезами радиуса *r*: углы контакта – радиальный ψ_r^i и осевой ψ_v^i; ширина фрезерования a_e^i и глубины резания a_p^i; линия $L(\psi_v, \psi_r^k, r)$ пересечения сферы радиуса *r* с номинальной поверхности поверхностью заданной уравнением $Z = f(x, y)$

Уравнение линии L пересечения сферы радиуса *r* с номинальной поверхности поверхностью $Z = f(x, y)$ можно получить в параметрическом виде, как функцию радиального угла контакта ψ_r от угла контакта в осевой плоскости ψ_v. Для этого в замкнутом интервале $0 \le \psi_r \le \pi$ задаем малодискретное $\Delta\psi_r$ изменение $\psi_r^{k+1} = \psi_r^k + \Delta\psi_r$ радиального угла контакта. Численное решение уравнения (3), (средствами пакета MathCAD $(\mathrm{root}(Z(\psi_v, \psi_r^k), \psi_v, 0,$ или способом построением сечений, с приближением методом Ньютона-Рафсона), даст дискретный ряд точек линии $L(\psi_v, \psi_r^k)$ пересечения сферы с заданной поверхностью.

$$L(\psi_v, \psi_r^k) = \begin{cases} r \cdot \sin(\mathrm{root}(Z(\psi_v, \psi_r^k), \psi_v, 0, & \cdot \quad \psi_r \\ r \cdot \sin(\mathrm{root}(Z(\psi_v, \psi_r^k), \psi_v, 0, & \cdot \quad \psi_r \\ r \cdot \cos(\mathrm{root}(Z(\psi_v, \psi_r^k), \psi_v, 0, & \end{cases} = \begin{cases} \psi_v, \psi_r^k \\ \psi_v, \psi_r^k \\ \psi_v, \psi_r^k \end{cases}. \quad (4)$$

При обработке фрезами со сферическим концом или с круглыми пластинами, реальная скорость резания отличается от рассчитанной по номинальному диаметру фрезы. При угловой скорости вращения фрезы *n*, ось которой наклонена на угол ω, модуль вектора скорости вдоль линии $L(\psi_{v,}\psi_r^k)$ изменяется согласно следующей зависимости:

$$V(\psi_{v,}\psi_r^k) = \frac{r}{\cos(} \cdot \sqrt{X(\psi_{v,}\psi_r^k)^2 + X(\psi_{v,}\psi_r^k)^2}\ . \qquad (5)$$

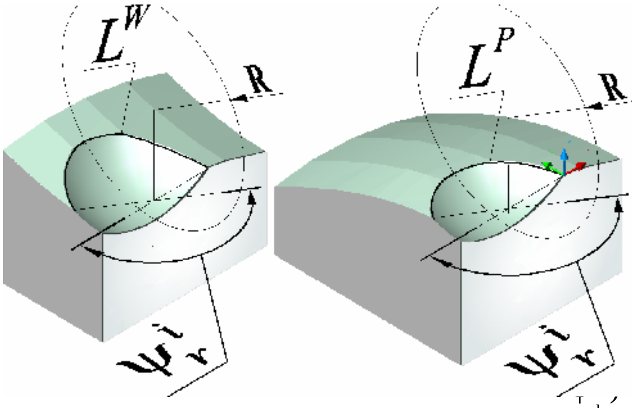


Рис. 3. Связь периметра линии $L(\psi_{v,}\psi_r^k)$ с кривизной поверхности

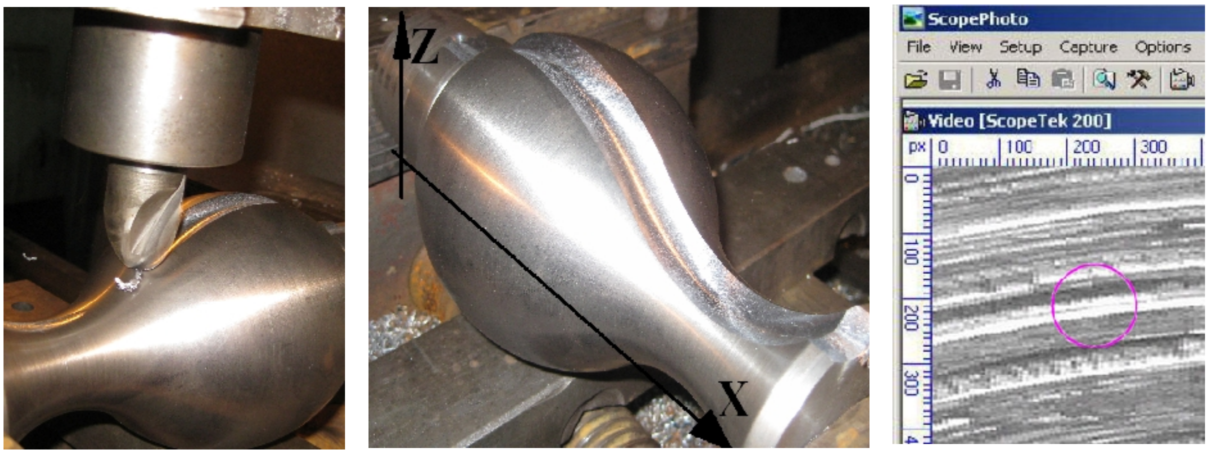
Обработка пространственно-сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами на станках с ЧПУ связана с непрерывным изменением геометрических параметров зоны резания – элементов срезаемого слоя, его границ в радиальной и осевой плоскостях. В частности длина активной части зубьев фрезы, а следовательно и силы резания, неразрывно связаны с кривизной линии $L(\psi_{v,}\psi_r^k)$, периметр которой изменяется в зависимости от топологии обрабатываемого участка поверхности. При этом, при одинаковых углах контакта ψ_r длина линии контакта L^P для выпуклой поверхности отличается от длины дуги L^W соответствующей вогнутой поверхности (рис. 3). Если учитывать, что длина пространственной линии определяется как предел, к которому стремиться вписанная ломанная, когда длина ее звеньев стремиться к нулю, то ее дифференциал равен:

$$dL(\psi_{v,}\psi_r) = \sqrt{dr^2 + r^2 d\psi_{v,}^2 + r^2 \sin(d\psi_r^2)}\ . \qquad (6)$$

При заданном уравнении поверхности и учитывая, что линия лежит на сфере (2), проинтегрировав дифференциал линии $dL(\psi_{v,}\psi_r)$, получим ее длину $L^{PW}(\psi_{v,}\psi_r)$.

Микрогеометрические отклонения определяют шероховатость поверхности, под которой понимают совокупность микронеровностей образующий рельеф сложно – поверхности. Проследим изменение шероховатости на цилиндрической заготовке с синусоидальной образующей (рис. 4, б). Для этой цели на поверхности заготовки, сферической фрезой, с постоянной номинальной скоростью резания и подачей, фрезеруются пазы радиуса *r=10 мм* (рис. 4, а). Траектория перемещения центра фрезы программируется, как эквидистанта образующей заготовки.

Оценка величины шероховатости криволинейной поверхности является достаточно сложной задачей. Потому детальное изображение микронеровностей (рис. 4, в) фрезерованной поверхности получаем на микроскопе с цифровой камерой - окуляром DCM35 (размеры пикселя: 8 мкм × 8 мкм). Обработку изображения производим программой ScopePhoto, для чего откалибровав масштаб, с одинаковой глубиной слоя сканирования, получаем диагональные размеры микронеровностей на поверхности раз



а) б) в)

Рис. 4. Экспериментальное фрезерование сложно-профильной поверхности и измерение параметров микронеровностей. а – фрезерование сферической фрезой паза радиуса *r* ; б – паз радиуса *r*, обработанный в координатной системе детали ZX; в – измерение параметров микронеровностей с помощью цифрового микроскопа

личной кривизны, вдоль оси X (рис. 4, в). Полученный дискретный ряд значений параметров микронеров-ностей $P^k(x)$ вдоль оси X отображаем на графике (рис. 5).

Расчет в *j=12* точках измерений, усредненного относительного уклонения периметра дуги контакта $L^{PW}(\psi_{\text{v}},\psi_{\text{г}})$ и параметра микронеровностей $P^k(x)$ показал, что их отношение, с коэффициент пропорциональности *q*, не превышает значение:

$$\frac{P^k(x^{\text{j}})\cdot q}{L^{PW}(\psi_{\text{v}}^{\text{j}},\ \psi_{\text{г}}^{\text{j}})} = \chi^{\text{j}} < 18.5\%,$$

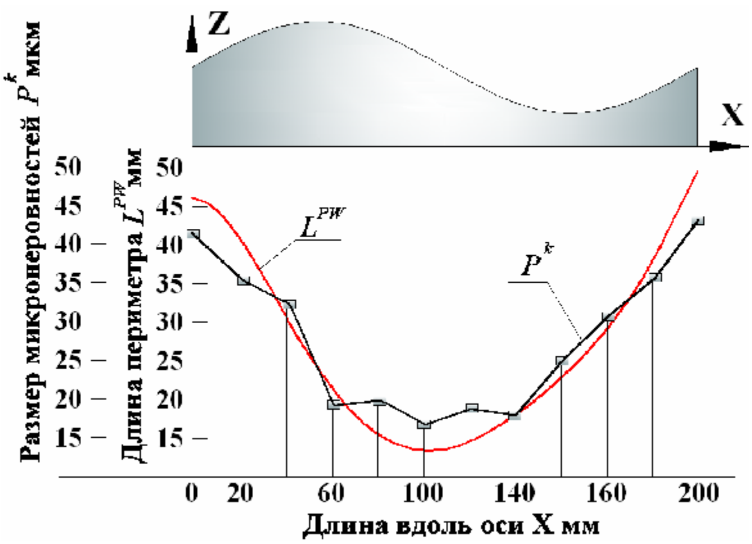


Рис. 5. Для поверхности с синусоидальной образующей графики изменения вдоль оси X периметра дуги контакта $L^{PW}(\psi_{\text{v}},\psi_{\text{г}})$ и параметра микронеровностей $P^k(x)$

Такое уклонение χ^{j} теоретической $L^{PW}(\psi_{\text{v}},\psi_{\text{г}})$ и экспериментальной $P^k(x)$ функций может служить косвенным подтверждением связи кривизны (средней или гауссовой) обрабатываемой поверхности и ее шероховатости.

3. Заключение.

Для анализа условий фрезерования, брать за основу общие понятия о вогнутости или выпуклости поверхности, не-достаточно Настоящими исследованиями установлено, что периметр дуги контакта зависит от кривизны поверхности в плоскости контурной подачи и кривизны в перпендикулярной ей плоскости. Экспериментально установлено, что наименьшая шероховатость достигается в том случае, если радиус кривизны в направлении вектора подачи стремиться к бесконечности, а радиус кривизны в перпендикулярной плоскости уменьшается, также как и периметр дуги контакта $L^{PW}(\psi_{v,}\psi_{r})$ (рис. 5).

Обрабатываемая поверхность может быть искривлена различным образом, однако для регулярных поверхностей, степень ее искривленности имеет универсальную характеристику – гауссову кривизну. Именно ее значение на локальных участках траектории перемещения фрезы можно взять за основу, для регулирования значения подачи, при изменяющейся топологии обрабатываемой поверхности. Такой подход формирует основу решения задач по созданию функционалов для УЧПУ станков, позволяющих, путем изменения их формальных параметров, т. е. программными средствами, снизить систематическую составляющую погрешности обработки.

Список литературы:

1. International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2004. – Vol. 44, № 2/3.

2. Лещенко А. И. Формирование качественных показателей сложно - профильных поверхностей при обработке на станках с ЧПУ. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк: ДонНТУ, 2012. - Вип. 1,2 (44). – С. 135 - 141.

3. Лещенко А. И. Особенности трансформации режимных параметров обработки сложно-профильных поверхностей, связанных с ее топологией. Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ „ХПИ”, 2012. - Вип. 81. – С. 183 - 188.

4. Лещенко А. И. Точность обработки сложно-профильных поверхностей параллельного переноса в зависимости от кривизны ее различных участков. Вісник СевНТУ: Зб. наук. праць. - Севастополь, 2012. - Вип. 129. – С. 126-132.

5. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография. / С.П. Радзевич. – К.: Растан, 2001. – 592 с.

A. Leshenko

KINEMATIC PARAMETERS CUTTING RELATED CHANGE TOPOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HANDLE COMPLEX-SHAPED SURFACES

In the article the questions of receipt of calculation-analytical dependences are examined for determination of kinematics parameters of cutting, topology descriptions related to the change difficultly - type surfaces. From point of theory of surfaces and charts of its treatment, conditioned geometry and trajectory of moving of instrument, got betweenness by length of contact of blade of milling cutter with the processed surface and its influence on the height of mikrosurfaces.

Keywords: *machine-tools with NC, treatment of difficultly-type surfaces*

О.І. Лещенко

КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ РІЗАННЯ, ПОВ’ЯЗАНІ З ЗМІНОЮ ТОПОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРОБЛЮВАНИХ СКЛАДНО-ПРОФІЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

У статті розглядаються питання отримання розрахунково-аналітичних залежностей для визначення кінематичних параметрів різання, пов’язаних із зміною топологічних характеристик складно - профільних поверхонь. З погляду теорії поверхонь і схем її обробки, обумовлених геометрією і траєкторією переміщення інструменту, отримані співвідношення між довжиною контакту леза фрези з оброблюваною поверхнею і її впливу на висоту мікронерівностей

Ключові слова: *верстати з ЧПУ, обробка складно-профільних поверхонь*

Надійшла до редколегії 19.06.2013 р.