УДК 621.01(06)

А.И. Лещенко
Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина
Факс: +38 (0629) 529924; E-mail: Leshenko_a_i@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЛОЖНО-ПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

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, уточнены понятия выпуклости и вогнутости поверхности, исследована полученная высота микронеровностей при обработке концевыми радиусными фрезами.
Ключевые слова: *станки с ЧПУ, фрезерование сложно - профильных поверхностей.*

1. Введение

В современном машиностроении происходит постоянное повышение требований к качеству деталей машин, которое определяется такими факторами, как состоянием поверхностного слоя (шероховатость, напряжённо-деформированное состояние), точностью размеров, геометрической формы и относительного расположения поверхностей. Особую актуальность понятие «точности формы» приобретает для деталей со сложными, фасонными рабочими поверхностями. Для деталей этого типа характерной особенностью являются высокие требования по точности, шероховатости (Ra<0,63) и, как следствие, большая трудоемкость изготовления. Наиболее широко в машиностроении представлены фасонные поверхности вращения или поверхности с замкнутой криволинейной направляющей и прямолинейной образующей. К таким деталям относятся профильные валки, копиры и кулачки командаппаратов. Фасонные поверхности незамкнутого контура с криволинейной образующей и прямолинейной направляющей представлены различного рода пазами, профилем зубьев инструмента и пр. Возможно задание фасонной поверхности прямолинейной образующей и криволинейной направляющей. Для создания технологии обработки поверхностей этого типа, как правило, необходимо решение прямой или обратной задачи формообразования, путем проектирование специального инструмента или расчета траектории для стандартного инструмента [1]. Однако наибольшую сложность в изготовлении представляют пространственные, сложно – профильные поверхности деталей. К таким деталям относятся лопатки и сопла турбин, модели для точного литья, матрицы и пуансоны штампов, пресс-формы, последние востребованные практически на каждом производстве.

К сложно-профильным поверхностям можно отнести те поверхности, в точках которых искривленность поверхности характеризует индикатриса кривизны [2] - плоская кривая не ниже второго порядка, отличная от окружности. Согласно этому определению окрестности точек сложно – профильной поверхности характеризуются значениями ее главных радиусов кривизны – максимального и минимального (гауссовой кривизной) и ориентацией ее главных секущих плоскостей, в которых лежат указанные радиусы. Иногда поверхности этого типа называют поверхностями двойной кривизны или асферическими поверхностями.

Современным методом обработки сложно-профильных поверхностей является фрезерование концевыми радиусными фрезами на станках с ЧПУ, с автоматизированной подготовкой управляющих программ CAM системами ("ADEM", "T-FLEX NC" "CAMWorks", "SURFCAM Velocity" и др.), для которых исходными данными являются твердотельная модель поверхности детали. Вместе с тем опыт применения CAD/CAM систем показал, что инструментарий проектирования технологических операций сориентирован на идеальные условия обработки резанием, без учета возмущающих воздействий существующих в реальном производстве. Можно сказать, что универсальность CAM систем, созданных для всего многообразия поверхностей деталей и схем формообразования служит причиной того, что инструментарий проектирования не учитывает в полной мере особенностей реального процесса резания. Например, на различных участках обработки сложно-профильной поверхности изменяется толщина срезаемого слоя по периметру дуги угла контакта, в зависимости от положения сечения эффективного диаметра фрезы по отношению к оси вращения фрезы и направлению вектора контурной подачи. Поэтому для обработки поверхностей с постоянным углом наклона оси фрезы относительно данной поверхности, каталоги фирмы Kennametal (Германия) приводят формулы для расчета корректирующих коэффициентов скорости резания. Получили развитие вопросы обработки концевыми радиусными фрезами пространственно-сложных поверхностей при фрезеровании участков со ступенчатым припуском, вдоль образующей с постоянным углом наклона [3]. При этом процесс рассматривался только в направлении вектора подачи без учета влияния на параметры процесса резания, возможного изменения полной или средней кривизны обрабатываемой поверхности. Поэтому возникает необходимость в расширении управляемых параметров при построении алгоритмов [4], [5] технологических схем формообразования.

С точки зрения технологии машиностроения, к сложно-профильным поверхностям можно отнести те поверхности, для которых процесс лезвийной обработки сопровождается непрерывной трансформацией динамических и кинематических параметров резания, связанных как с геометрией и траекторией перемещения инструмента, так и с топологией обрабатываемой поверхности.

Целью данной работы является получение расчетно-аналитических зависимостей для определения кинематических параметров резания, связанных с изменением топологических характеристик сложно – профильной поверхности.

2. Основное содержание и результаты работы

Технологический процесс лезвийной обработки пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ состоит из операций предварительного и окончательного фрезерования. На переходах операции предварительного фрезерования производится последовательное приближение обрабатываемой поверхности к геометрической конфигурации сложно – профильной поверхности, при этом очень важно обеспечить равномерное распределение размеров припуска для последующей операции. Окончательное фрезерование (получистовое, чистовое) стремятся выполнять с практически постоянной глубиной резания t не оказывающей значительное влияние на колебание силы резания. Наибольшее применение при обработке сложно – профильных поверхностей нашли фрезы со сферической рабочей частью радиуса r.

С точки зрения условий формообразования дадим топологическую характеристику предварительно сформированной гладкой, дважды дифференцируемой в заданном интервале, сложно - профильной поверхности. Выделим в произвольной точке поверхности (x_i, y_i) две плоскости: главную плоскость P_F, в которой лежит вектор подачи F и перпендикулярную ей плоскость P_S (рис. 1). Согласно теории поверхностей

[2] в данных плоскостях можно построить соприкасающиеся окружности R_F R_S, радиусы которых будут равны радиусам кривизны поверхности в данной точке, по выделенным направлениям. Будем считать поверхность вогнутой, если центр фрезы радиуса r находится со стороны центра соприкасающейся окружности R_F, в плоскости которой лежит вектор подачи F и выпуклой, если центр фрезы в процессе обработки расположен с противоположной стороны. Если кривизны поверхности равны $k_F = 1/R_F$, $k_S = 1/R_S$, то точки поверхности классифицируются в зависимости от знака их произведения - гауссовой кривизны:

$k_a(x_a, y_a) = R_F \cdot R_S > 0$, $k_b(x_b, y_b) = R_F \cdot R_S > 0$ - геометрически это означает, что в эллиптических точках (x_a, y_a), (x_b, y_b) (рис.1, а, б) все нормальные сечения имеют радиусы кривизны одного знака, а окрестности поверхности имеет сходство с эллипсоидом. Вместе с тем, траектория фрезы радиуса r в направлении подачи F соответствует выпуклому участку поверхности в точке (x_a, y_a) (рис.1, а) и вогнутому в точке (x_b, y_b) (рис.1, б);

$k_c(x_c, y_c) = R_F \cdot R_S < 0$, $k_d(x_d, y_d) = R_F \cdot R_S < 0$ - геометрически это означает, что в точках гиперболического типа (x_c, y_c), (x_d, y_d) (рис.1, с, д) нормальные сечения имеют радиусы кривизны разного знака, а окрестности поверхности имеет седлообразный вид. Траектория фрезы радиуса r в направлении подачи F соответствует вогнутому участку поверхности в точке (x_c, y_c) (рис.1, с) и выпуклому в точке (x_d, y_d) (рис.1, д);

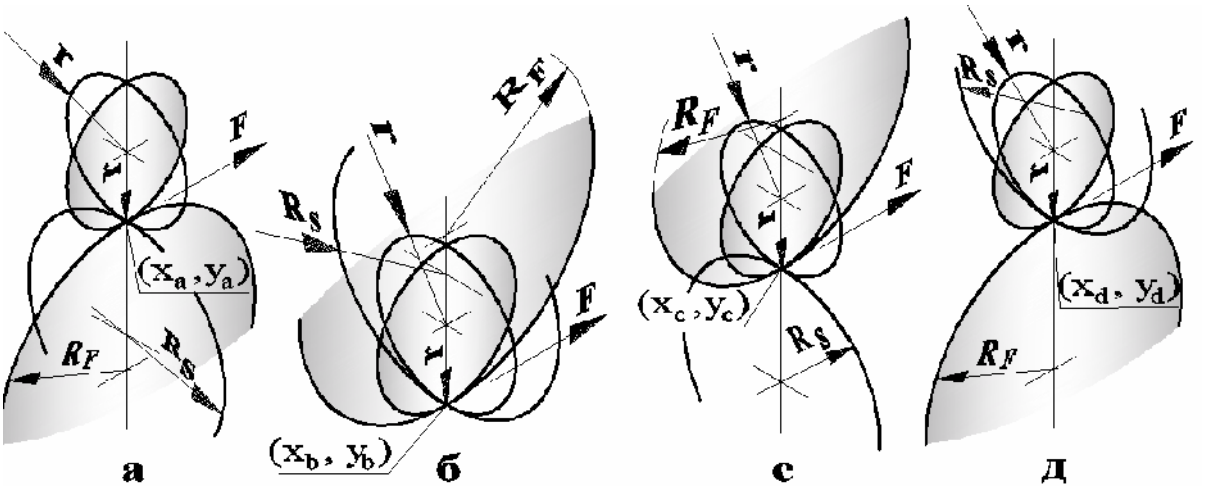

Рис. 1. Классификация локальных участков сложно – профильной поверхности: эллиптического (а, б) и гиперболического типов (с, д), в процессе обработки - выпуклые (а, д) и вогнутые (б, с) поверхности

Для аналитического исследования кинематических характеристик формообразования сложно-профильных поверхностей концевыми радиусными фрезами на станках с ЧПУ выделим область зоны резания m (рис. 3), сформированную каркасной моделью поверхности с радиусами кривизны R_F, R_S и сферой радиуса r. Рассмотрим характер изменение параметров чистовой обработки, с постоянной глубиной резания *t*, фрезой

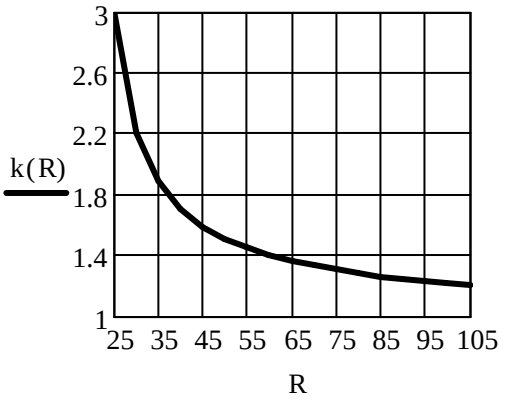

Рис. 2. График соотношения углов φ_F^p, φ_F^v профиля активной части режущей кромки фрезы

радиуса r, для которой критичной зоной режущей кромки является центр фрезы, где скорость резания близка к нулю. Для обеспечения предельно минимального значения скорости резания обработка производится с наклоном оси фрезы на угол ω. Направление эквидистантного перемещения центра фрезы O определяет вектор подачи F с угловым параметром β в плоскости P_F. Значение вектора контурной подачи изменяется вдоль угла профиля активной части режущей кромки φ_F, величина которого зависит от глубины резания *t*, радиуса фрезы r и радиуса кривизны поверхности R в текущей точке. При изменении значения радиуса кривизны R в пределах R_S.....R_F, углы профиля активной части режущей кромки для выпуклых φ_F^p и вогнутых φ_F^v поверхностей соответственно равны:

$$\varphi_F^v(R) = \pi - \arccos\left[\frac{r^2 + (R-r)^2 - (R-t)^2}{2\cdot(R-r)}\right] \quad \varphi_F^p(R) = \arccos\left[\frac{r^2 + (R+r)^2 - (R+t)^2}{2\cdot(R+r)}\right], \quad (1)$$

а их соотношение

$$k(R) = \frac{\varphi_F^v(R)}{\varphi_F^p(R)} \quad (2)$$

характеризуется обратно пропорциональной зависимостью от радиуса кривизны *R* (рис. 2).

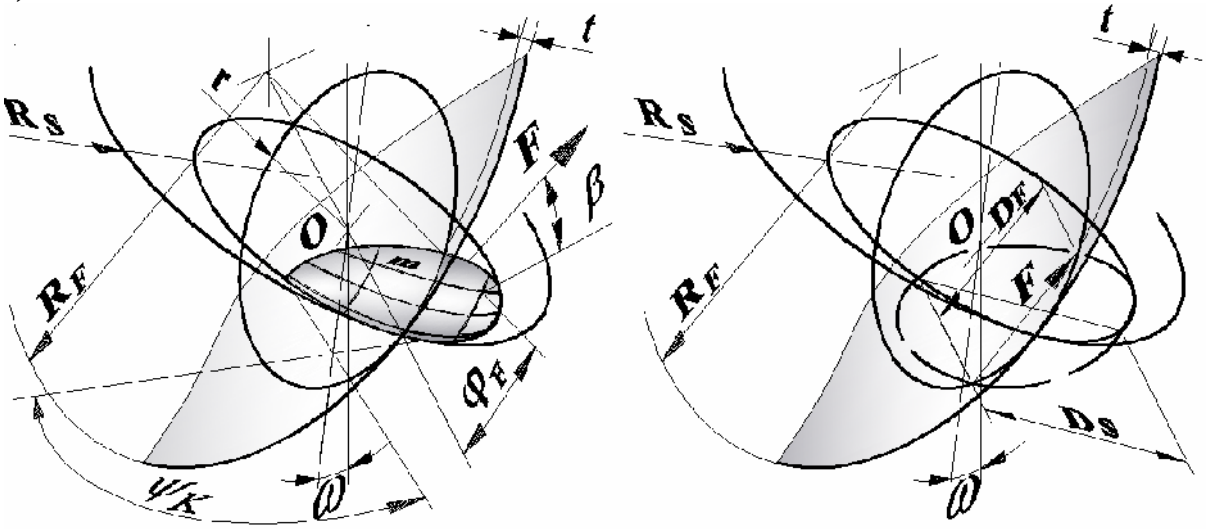

Рис. 3. Геометрическое представление зоны резания при обработке сложно – профильных поверхностей с радиусами кривизны в главных сечениях R_F R_S

При фрезеровании сферическими фрезами сложно – профильной поверхности эффективный диаметр резания трансформируется в пространственную кривую, проектирующуюся на плоскость в виде эллипса с полуосями D_F, D_S, размеры которых определяет граничные значения скорости резания. В направлении подачи полуось D_F «стягивает» угол контакта ψ_K, который измеряется в плоскости перпендикулярной к оси фрезы и определяет длину дуги перемещения зуба фрезы в металле заготовки за каждый ее оборот. При изменении радиуса кривизны R и углового параметра вектора подачи β в плоскости P_F, углы контакта для выпуклых ψ_K^p и вогнутых ψ_K^v поверхностей определяют следующие функциональные зависимости двух переменных:

$$\psi_K^p(R,\beta) = 2\cdot\arccos\left[\frac{\left[r^2+(R+r)^2-(R+t)^2\right]\cdot\sin(\beta+\omega)}{\sqrt{4\cdot r^2\cdot(R+r)^2-\left[r^2+(R+r)^2-(R+t)^2\right]^2\cdot\cos^2(\beta+\omega)}}\right], \quad (3)$$

$$\psi_K^v(R,\beta) = 2\cdot\arccos\left[\frac{\left[(R-t)^2-(R-r)^2-r^2\right]\cdot\sin(\beta+\omega)}{\sqrt{4\cdot r^2\cdot(R-r)^2-\left[(R-r)^2-(R-t)^2+r^2\right]^2\cdot\cos^2(\beta+\omega)}}\right].$$

Для радиуса фрезы $r = 28$ мм, при изменении радиуса кривизны поверхности R = 40….120 мм и $\beta = 0.....\pi/2$, построены графики $\psi_K^p(R,\beta)$, $\psi_K^v(R,\beta)$ (рис. 4, а, б). Эффективные диаметры, для выпуклых и вогнутых поверхностей в направлении ширины фрезерования (перпендикулярно вектору подачи F) соответственно равны:

$$D_F^p = 2\cdot r\cdot\sin(\psi_K^p),\ D_F^p = 2\cdot r\cdot\sin(\psi_K^v). \quad (4)$$

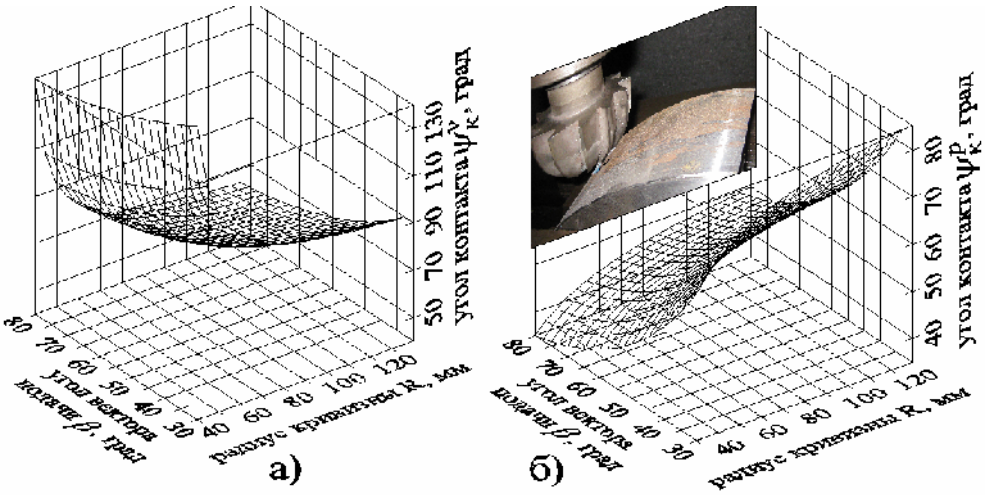

Рис. 4. Графики изменения углов контакта ψ_K^v (а), ψ_K^p (б) для выпуклых (рис. 1, а, д) и вогнутых (рис. 1, б, с) поверхностей

Изменение толщины срезаемого слоя в пределах угла контакта оказывает значительное влияние на шероховатость обработанной поверхности. С целью определения влияния кривизны обрабатываемых поверхностей на высоту микронеровностей, проведено экспериментальное фрезерование образцов заготовок в соответствии с типами классифицированных поверхностей (рис. 1). Заготовки фрезеровались с постоянными частотой вращения фрезы и подачей F, при этом их геометрия обуславливала переменность сечения среза, как на дуге контакта (3), так и по длине активной части режущей кромки (1) фрезы.

Наименьшая шероховатость (рис. 5, в) (Ra = 2,2...3,2) была получена для вогнутой поверхности эллиптического типа, несколько большая шероховатость характерна вогнутой поверхности гиперболического типа (Ra = 3,2...4,0). Больше шероховатость (Ra = 4.0...6,3) наблюдалась у выпуклых поверхностей (рис. 5, с) при этом характер ее изменения с возрастанием угла контакта ψ_K^p иной, чем для вогнутых поверхностей.

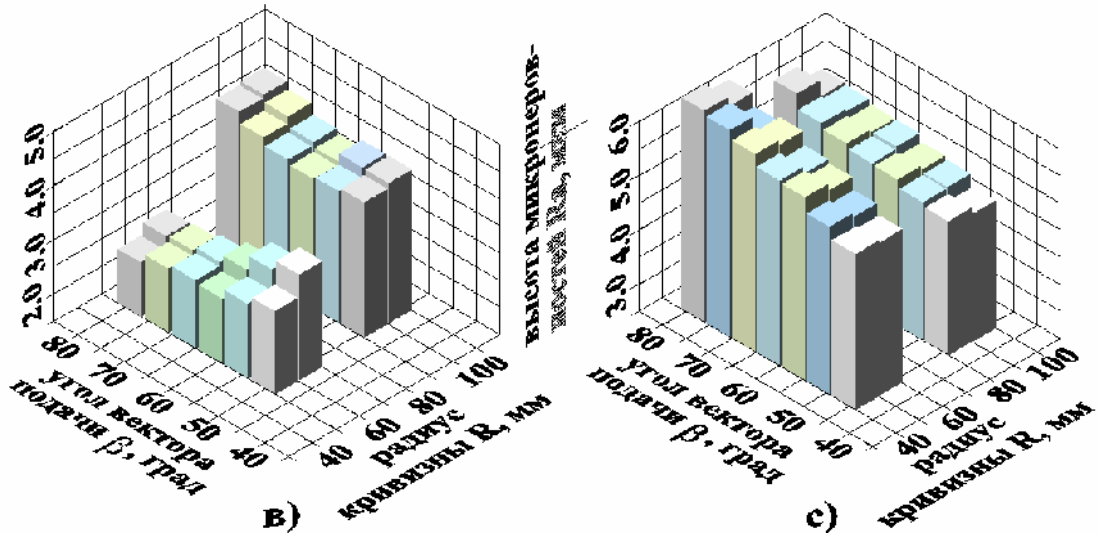

Рис. 5. Графики изменения высоты микронеровностей для выпуклых (в) (рис. 1, а, д) и вогнутых (с) (рис. 1, б, с) поверхностей

3.Заключение

Достижение требуемой точности и шероховатости обработки сложно - профильных поверхностей неразрывно связано с анализом ее топологических характеристик, базирующихся на теории поверхностей. Несмотря на то, что, как правило, схема распределения припуска относительно оси концевой радиусной фрезы остается симметричной, в процессе контурной обработки реальная скорость резания в разных точках рабочей поверхности ее режущей кромки будет различна. Поэтому недостаточно при определении скорости резания брать за основу только номинальный диаметр фрезы и постоянную глубину резания – необходимо проследить изменение эффективного диаметра в сечениях перпендикулярных оси фрезы. Полученные зависимости позволяют рассчитать предельные значения эффективного диаметра (3) через угол контакта (2). Соотношение (2) углов φ_F^p, φ_F^{y} профиля активной части режущей кромки фрезы показывает более предпочтительные условия обработке вогнутых участков поверхности.

При обработке фасонной поверхности ее шероховатость зависит от знака и радиуса кривизны - выпуклости или вогнутости. Можно предположить, что в процессе

стружкообразования при обработке фасонной поверхности действует условие, сформулированное С. И. Губкиным - «в случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях, каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления», вследствие которого для выпуклых поверхностей больше вероятность разрушения с отрывом, зато напряженное состояние вогнутых поверхностей ближе к всестороннему сжатию, которое повышает пластичность и уменьшает вероятность сколов.

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. Результаты проведенных исследований условий обработки, в зависимости от топографических характеристик поверхности, могут послужить основой для создания функционалов для УЧПУ станков, позволяющих программными средствами повысить качество поверхности.

Список литературы:

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

2. Математика, ее содержание, методы и значения. т. №2. / Ред. А. Д. Александрова и др. – Изд-во АН СССР, - 1956. – 393 с.

3. В. В. Батуев. Расчет толщины срезаемого слоя при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск. / В. В. Батуев. Челябинск, Известия Челябинского научного центра, вып. 3 (33), 2006. – С. 29-40.

4. Лещенко А. И. Обеспечение параметров точности и шероховатости формообразующих поверхностей валков сортового проката при обработке на станках с ЧПУ. / А. И. Лещенко //Автореферат дисс. канд. тех. наук. – Мариуполь: ПГТУ, 2011

5. 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.

Надійшла до редколегії 29.05.2012 р.

О. І. Лещенко

ФОРМУВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ СКЛАДНО - ПРОФІЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ОБРОБЦІ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ

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, уточнені поняття опуклості і угнутості поверхні, досліджена висота її мікронерівностей.

Ключові слова: *верстати з ЧПУ, обробка складнопрофільних поверхонь.*

A. I . Leshenko

FORMING OF HIGH-QUALITY INDEXES IS DIFFICULT TYPE SURFACES AT TREATMENT ON MACHINE-TOOLS WITH NC

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, the concepts of bulge and concavity of surface are specified, the got height of roughness is investigational.

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