

УДК 621.914

С.С. Добротворский, Е.В. Басова

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛОСКОСТИ СДВИГА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ СО СФЕРИЧЕСКИМ КОНЦОМ

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт

Рассматривается геометрическая модель процесса фрезерования эвольвентной поверхности концевой фрезой со сферическим концом. Описаны геометрические параметры плоскости сдвига с учётом параметров режущего инструмента и процесса резания. Приведены перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, скорость резания, плоскость сдвига, концевая фреза со сферическим концом, эвольвентная поверхность.

Современное машиностроение характеризуется повышением требований к геометрическим параметрам качества изготовления поверхностей деталей. При этом необходимо обеспечить не только заданные требования качества поверхности, но и их стабильность, которая определяется стохастическими характеристиками параметров геометрии поверхности детали, задаваемыми законом их распределения. На сегодняшний день перед производителями остро стоит вопрос о соотношении качества и себестоимости продукции. Решить эту задачу можно путём применения высокоскоростной лезвийной обработки. Однако для достижения высокого качества поверхностей сложной конфигурации при высокоскоростной обработке необходимо глубокое понимание и изучение явлений, протекающих в процессе резания и формирования микроструктуры.

Исследованиями обеспечения качества поверхностного слоя методом высокоскоростной обработки занимаются учёные всего мира. основополагающими можно считать работы Г. Соломона, Г. Скопесека, Г. Шульца, Ю. Свободы, П. Хофмана и другие исследователей. Качество поверхностного слоя, а также методы его управления описаны в работах А.М. Сулиммы, В.А. Шулова, А.Ю. Албагичева, В.А. Моисеева и др. В.В. Батуев в своей работе [1] обратил внимание на чистовую обработку пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском концевыми фрезами со сферическим концом при нормальных скоростях резания. В связи с тем, что именно концевые фрезы со сферическим концом являются основным применяемым инструментом при высокоскоростной обработке сложных поверхностей [2], становятся актуальными исследования, направленные на решение проблемы технологического обеспечения геометрических параметров качества деталей с такими поверхностями.

При управлении процессом формирования качественной поверхности по температурному критерию (учитывая, что мгновенное температурное поле формируется с учётом ряда геометрических, технологических и теплофизических параметров области резания и непосредственно режущего инструмента) в условиях обработки на высоких скоростях концевыми фрезами со сферическим концом необходимо в первую очередь сформулировать адекватную модель зоны контакта инструмента и обрабатываемой поверхности.

Необходимо учитывать тот факт, что применяемое современное программное обеспечение для геометрического моделирования только проверяет корректность траекторий инструмента и обрабатываемой детали, что недостаточно для оптимизации параметров процесса резания. Для определения оптимальных параметров резания необходимо сформулировать геометрическое представление модели, которая могла бы отображать физику процесса, включая силы резания и другие параметры.

Разрабатывая геометрическую модель процесса резания концевой фрезой со сфериче-

ским концом, необходимо учитывать её главное отличие от резания торцевой фрезой – сложность точного описания геометрии среза и плоскости сдвига, так как точки вдоль режущей кромки образуют трохоидные кривые. Сам процесс резания инструментом такого типа обусловлен сложными зависимостями между параметрами механической обработки (подача на зуб, глубина и ширина резания) и технологическими параметрами (толщина стружки, эффективная площадь резания). Вторым немаловажным отличием использования в механической обработке концевых фрез со сферическим концом является скорость удаления материала (скорость резания), которая в разных точках рабочей поверхности режущей кромки будет различна: уменьшаться в направлении к вертикальной оси инструмента и, соответственно, увеличиваться по направлению к максимальному эффективному диаметру фрезы.

На рис. 1 представлена геометрическая модель концевой фрезы со сферическим концом.

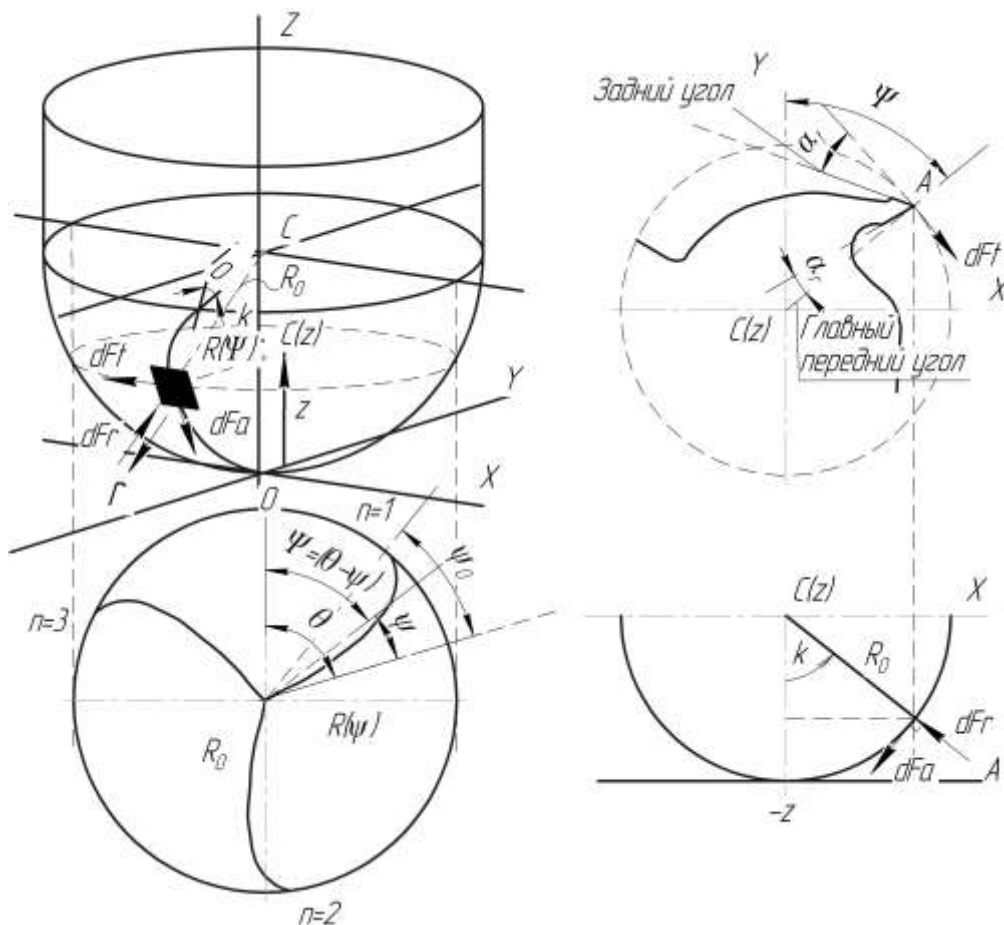


Рис. 1. Геометрическая модель концевой фрезы со сферическим концом:

i_0 – угол подъёма винтовой линии по поверхности сферической формы в точке пересечения канавки и хвостовика; R_0 – радиус фрезы; $R(\psi)$ – радиус инструмента в плоскости x - y в некой точке, определяемой ψ ; θ – угол поворота инструмента по часовой стрелке относительно оси Y ; ψ_0 – максимальный угол сдвига между вершиной инструмента ($z=0$) и самой высокой точки режущей кромки ($z=a$); k – угол в вертикальной плоскости между точкой на канавке и осью Z ; dFt, dFr, dFa – дифференциальные силы резания в тангенциальном, радиальном и осевом направлении зуба

Радиус сферической части фрезы в касательной плоскости x - y к точке на спиральной канавке, расположенной под углом ψ , может быть определён следующим образом [3]:

$$R(\psi) = R_0 \sqrt{1 - (\psi \cos^2 i_0 - 1)^2}. \quad (1)$$

Уравнение, описывающее положение точки канавки на высоте z , связанное с дуговой координатой ψ в глобальной системе координат, было описано в работе [3]:

$$\Psi_j(z) = \theta + (j-1) \cdot \phi_p - \frac{z}{R_0} \cdot \tan i_0, \quad (2)$$

где j – иммерсионный угол канавки, изменяющийся вдоль осевой подачи; $\phi_p = 2\pi/n$ – угол подъема винтовой линии режущего инструмента (n – число зубьев фрезы).

Для оценки площади контакта заготовки и инструмента предварительно необходимо смоделировать геометрическое представление о плоскости сдвига при обработке концевой фрезой со сферическим концом.

На основании концепции зарубежных учёных [4, 5] о геометрических моделях плоскостей сдвига при обработке фрезами со сферическим концом в горизонтальном и вертикальном направлении, представленных в работе [6], авторами разработана модель прогнозирования плоскости сдвига при обработке сложной поверхности на примере обработки эвольвентной поверхности.

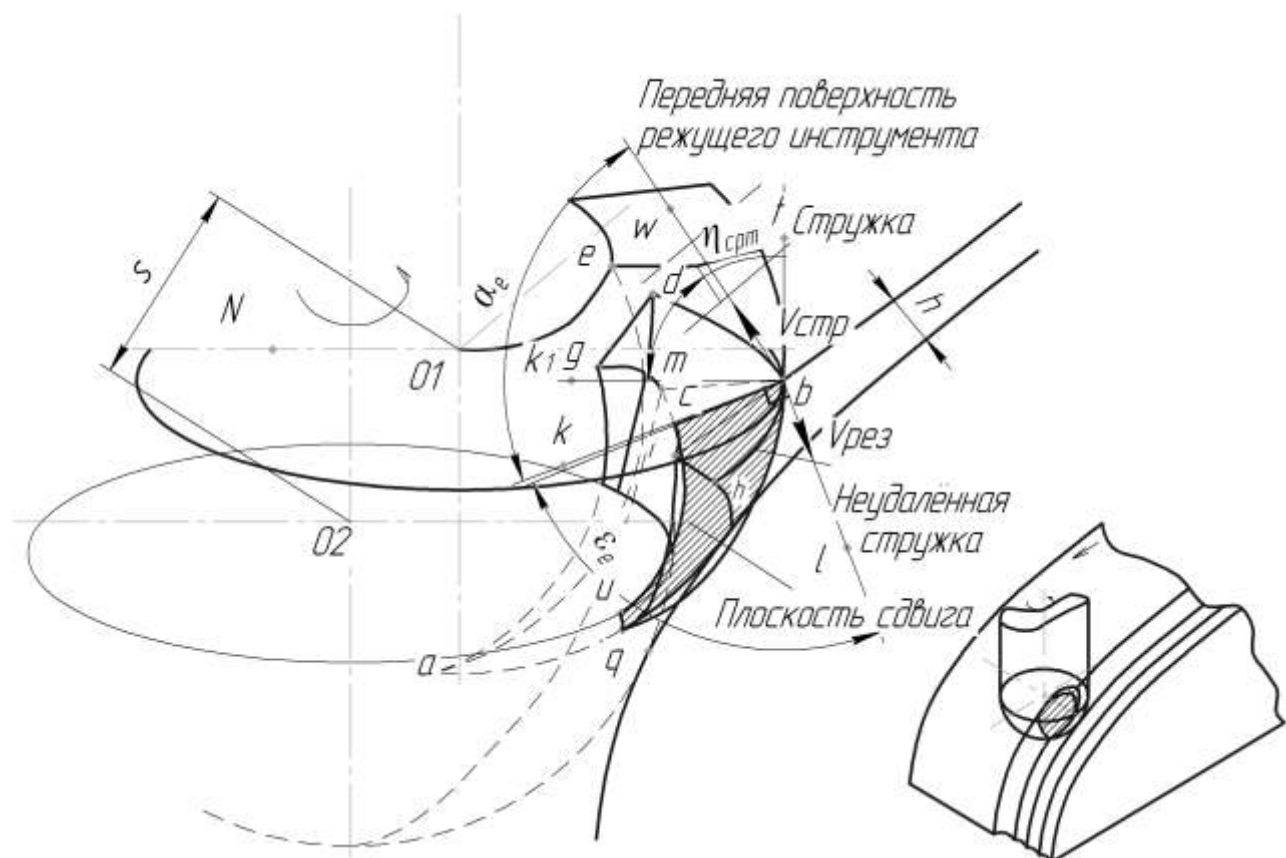


Рис. 2. 3D-модель перемещения концевой фрезы со сферическим концом по эвольвентной поверхности вверх

На рис. 2 и рис. 3 представлены трехмерные геометрические модели процесса резания (при встречном фрезеровании) эвольвентной поверхности. Образование стружки происходит в процессе сдвига в плоскости сдвига (геометрическая область abc) завитой режущей кромкой. Скорость резания $V_{рез}$ является касательной к контактной точке недеформированной стружки и режущей кромки фрезы со сферическим концом. Минимальная и максимальная эффективная скорость резания (скорость граничных точек рабочей режущей кромки) может быть определена следующим образом [7]:

$$V_{eff.\max} = \frac{2\pi \cdot N \cdot R \cdot \sin\left(\theta + \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)\right)}{1000}, \quad (3)$$

$$V_{eff.\min} = \frac{2\pi \cdot N \cdot R \cdot \sin\left(\theta - \arcsin\left(\frac{f_z}{R}\right)\right)}{1000}, \quad (4)$$

где R – радиус сферической части фрезы; θ – угол наклона обрабатываемой поверхности относительно горизонтальной плоскости (рис. 4); h – глубина резания (величина припуска); f_z – подача на зуб; N – скорость вращения шпинделя.

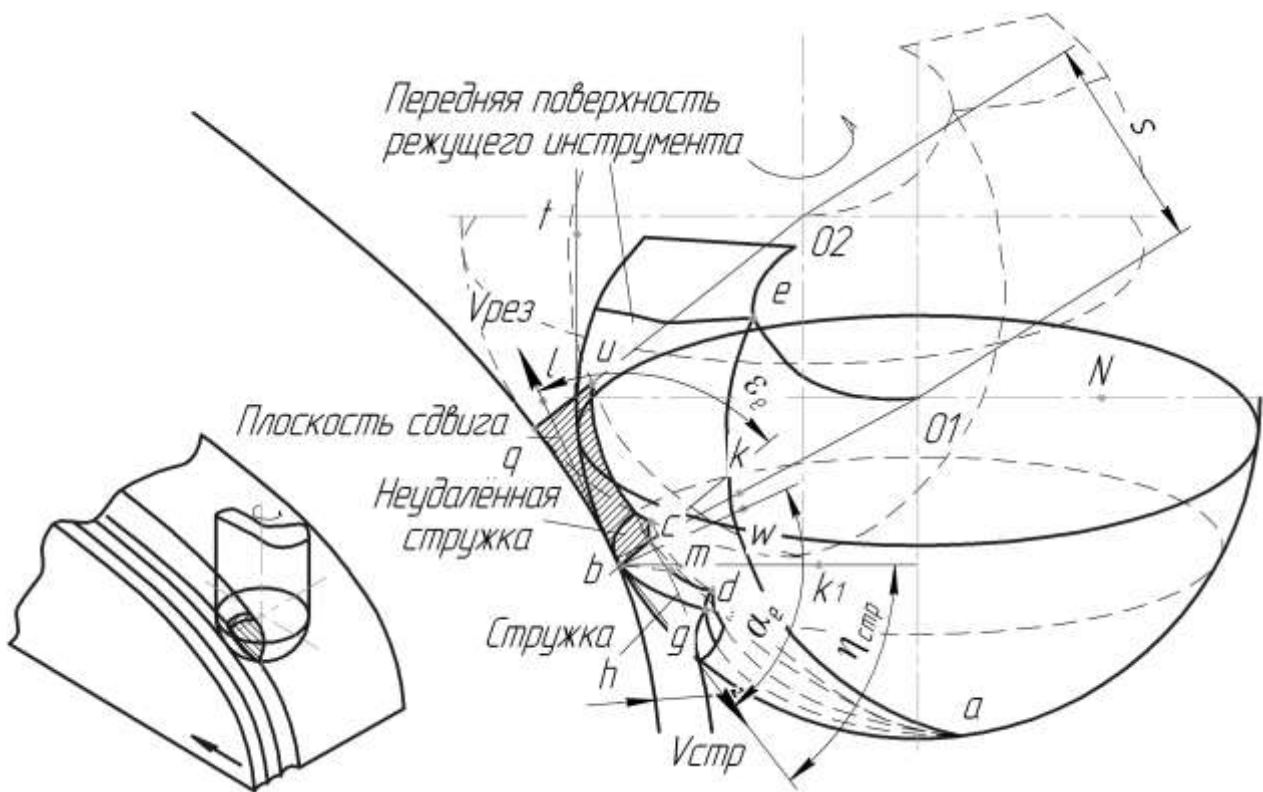


Рис. 3. 3D модель перемещения концевой фрезы со сферическим концом по эвольвентной поверхности вниз

Стружка вытекает из передней поверхности режущего инструмента со скоростью схода стружки $V_{стр}$ и углом $\eta_{стр}$ относительно линии bk_1 на передней поверхности режущего инструмента tbk_1 . Линия bk_1 параллельна горизонтальной оси ON . В плоскости kbl угол между параллельным направлением плоскости сдвига и касательной из точки контакта b (направление скорости $V_{рез}$) определяется как эффективный угол сдвига ϵ_e . В плоскости wbl рабочий передний угол α_e (угол kbw , рис 3 и рис. 4) может быть определён как угол между передней поверхностью режущего инструмента и направлением линии bk , которая, в свою очередь, вертикально направлена к скорости резания $V_{рез}$.

В таком процессе резания толщина неудалённой стружки (сечение aih) срезается винтовой режущей кромкой (кривая ab), тем самым образуя эффективную зону трения (область amb) передней поверхности режущего инструмента и накапливающейся завивающейся стружки (сечение adg). Следует отметить, что режущая кромка распространяется от точ-

ки a и до высшей точки b , а не от центральной точки, расположенной на оси режущего инструмента и периферии режущей кромки.

Используя геометрию (рис. 2, рис. 3) и геометрию режущего инструмента (рис. 1), представим плоскости сдвига (рис. 4), формирующиеся в процессе высокоскоростного фрезерования концевой фрезой со сферическим концом.

На рис. 4, a плоскость сдвига представлена заштрихованной областью, которая разделена на две части $\Pi_{1,bb}$ и $\Pi_{2,bb}$ в соответствии с направлением схода стружки относительно проецируемой плоскости (угол $\eta_{c.c}$). Взаимоотношение параметров передней поверхности режущего инструмента определим следующим уравнением:

$$\eta_{c.c} = \tan^{-1} \cdot \left(\frac{(\tan \eta_{c.т} - \sin \alpha_r \cdot \tan i) \cdot \cos i}{\sin \alpha_r} \right), \quad (5)$$

где α_r – главный передний угол, i – угол наклона режущей кромки (рис. 1).

В соответствии с обозначениями (рис. 4, a) определим площадь плоскости сдвига при резании эвольвентной поверхности:

$$\Pi = \Pi_{1,bb} + \Pi_{2,bb} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} f_1(\varphi) ds + \int_{\varphi_0}^{\varphi_2} f_2(\varphi) ds. \quad (6)$$

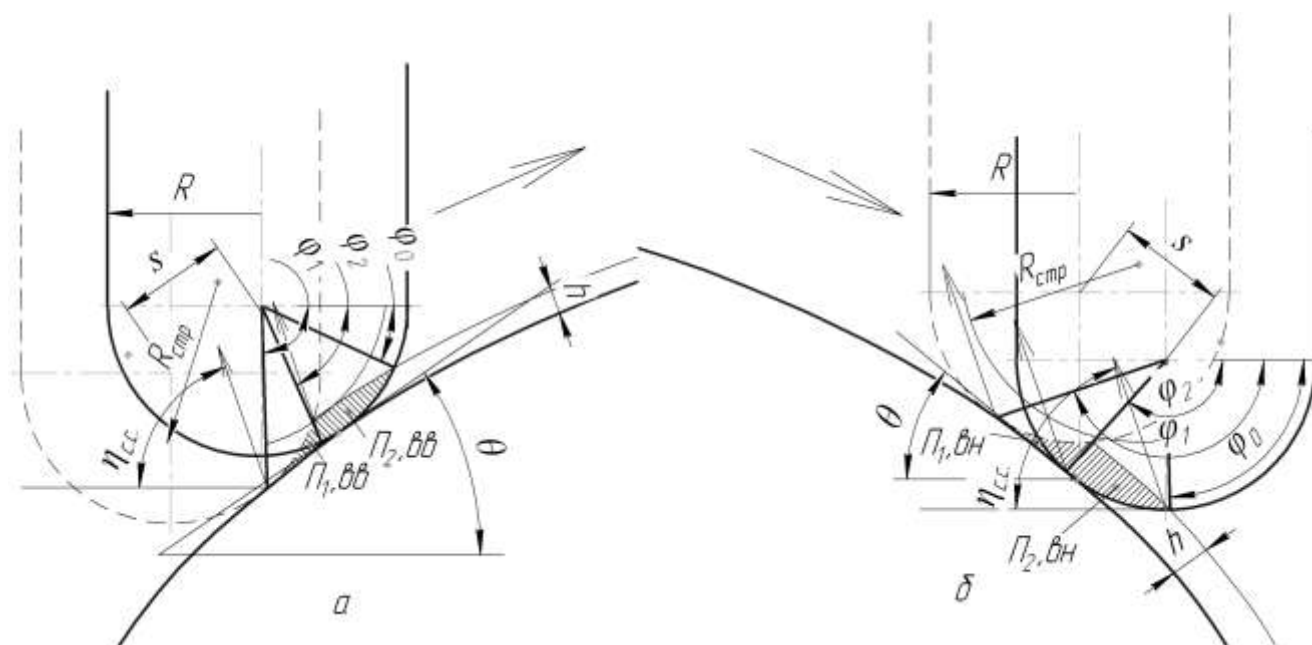


Рис. 4. Геометрическое представление площади плоскости сдвига при высокоскоростной обработке концевыми фрезами со сферическим концом

В соответствии с обозначениями (рис. 4, b) определим площадь плоскость сдвига, соответствующую рис. 3:

$$\Pi = \Pi_{1,бн} + \Pi_{2,бн} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} g_1(\varphi) ds + \int_{\varphi_0}^{\varphi_2} g_2(\varphi) ds. \quad (7)$$

Результатом данного исследования является определение связи и взаимоотношений геометрии углов и режимов резания с плоскостью сдвига и площадью эффективного трения, что в перспективе позволит определить область эффективного трения передней поверхности режущего инструмента и срезаемого материала и сформулировать модели сил резания при

процессе высокоскоростного фрезерования сложнопрофильных поверхностей концевыми фрезами со сферическим концом с учётом энергетических составляющих: энергии сдвига в единицу времени и энергии трения в единицу времени.

Библиографический список

1. **Батуев, В.В.** Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Батуев Виктор Викторович; Юж.-Урал. гос. ун-т. – Ч., 2007. – 21 с.
2. Technical Handbook // информ.-аналит. журн. – Е. : ОТС–Технологии, 2010. – 145 с.
3. **Lee, Peter Pak Wing** Mechanics and dynamics of ballend milling / Peter Pak Wing Lee. – C: The university of british Columbia. 1995. – 163 p.
4. **Usui, E.** Analytical prediction of three dimensional cutting process. Part 2. Chip formation and cutting force with conventional single-point tool [Text] / E. Usui, A. Hirota // Trans. ASME, J. Eng. 1978. – Ind. 100. – P. 229–235.
5. **Usui, E.** Analytical prediction of three dimensional cutting process. Part 1: basic cutting model and energy approach [Text] / E. Usui, A. Hirota, M. Masuko // Trans. ASME, J. Eng. 1978. – Ind. 100. P. 222–228.
6. **Tsai, C.L.** Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis [Text] / C.L. Tsai, Y.S. Liao // journal of materials processing technology. 2008. № 205. – P. 24-33.
7. **Daymi, A.** Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V [Text] / A. Daymi, M. Boujelbene, J.M. Linares, and etc. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2009. Vol. 35 (1). P. 79–86.

*Дата поступления
в редакцию 04.05.2011*

S.S. Dobrotvorskyy, E.V. Basova

GEOMETRIC PARAMETERS OF SHEAR PLANE IN HIGH SPEED MACHINING INVOLUTE SURFACE BY BALL-END-MILL CUTTER

We propose a geometric model of the milling process involutes' surface by ball-end-mill cutter. The geometric parameters of the shear plane within the parameters of the cutting tool and cutting process was described. The prospects for further research were given.

Key words: high-speed milling, cutting speed, shear plane, ball-end-mill cutter, involutes' surface.