

патки при глубинном профильном шлифовании // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – №8(50). – С. 38–44.

8. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научные технологии машиностроения. – 2016. – №5(59). – С. 17–24.

REFERENCES

1. Makarov, V.F. *Modern Methods of Heat-Resistant Steel and Alloys Efficient Abrasion*: manual. – S-Pb.: “Doe” Publishing House, 2013. – pp. 320.

2. Starkov, V.K. *Grinding with High-Porous Disks*. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 688.

3. Poletaev, V.A., Volkov, D.I. *Deep Grinding of Turbine Blades: Technologist’s Library*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 272.

4. Novoselov, Yu.K. *Surface Shaping Dynamics at Abrasion*. – Saratov: Saratov University Publishing House, 1972. – pp. 232.

5. Nikitin, S.P. Simulation of cutting process at grinding taking into account interaction of elastic and thermal systems // *Bulletin of USATU*. – 2009. – Vol.12. – No.4(33). – pp. 61-65.

6. Nikitin, S.P. Theoretical investigation of stability at grinding // *Bulletin of USATU*. – 2013. – Vol.17. – No.8(61). – pp. 38-44.

7. Makarov, V.F., Nikitin, S.P. Shaping condition impact upon quality of blade surface layer at deep profile grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.8(50). – pp. 38-44.

8. Makarov, V.F., Nikitin, S.P. Quality and productivity increase at deep profile grinding of turbine blades // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.5(59). – pp. 17-24.

Рецензент д.т.н. С.Г. Бишутин

УДК 621.914

DOI: 10.12737/article_5aacd85821ab73.82562382

А.М. Козлов, д.т.н., Г.Е. Малютин, к.т.н.
(ФГБОУ ВО Липецкий государственный технический университет
398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30)
E-mail: kam-48@yandex.ru

Управление процессом чистовой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ

На основе анализа сил резания, действующих в зоне контакта сферической фрезы с обрабатываемой поверхностью, предложены зависимости для определения технологических параметров. Использование полученных зависимостей позволяет повысить производительность объемного фрезерования зон, оставшихся необработанными после полустогового фрезерования без использования дополнительных адаптивных устройств.

Ключевые слова: объемное фрезерование; необработанные зоны; производительность.

А.М. Kozlov, D. Eng. G.E. Malyutin, Can. Eng.
(FSBEI HE Lipetsk State Technical University, 30, Moskovskaya Str., Lipetsk, Russia, 398055)

Complex surface finishing control on NC milling machines

On the basis of the analysis of cutting forces operating in the contact area of a ball mill with the surface under machining there are offered dependences for the technological parameters definition. The use of the dependences obtained allows increasing productivity of volumetric milling areas left unprocessed after semifinish milling without use of additional adaptive devices.

Keywords: volumetric milling; unprocessed areas; productivity.

Фрезерование на станках с ЧПУ характеризуется постоянным изменением траектории перемещения инструмента, что приводит к изменениям геометрии зоны резания, и как следствие, к непостоянству сил резания и погрешности обработки на разных участках обрабатываемых поверхностей. В наибольшей

степени это проявляется при обработке вогнутых поверхностей, форма которых описывается кривыми второго порядка.

Технологический процесс механической обработки подобных поверхностей, как и любой процесс механической обработки точных поверхностей, разделяется на несколько эта-

пов: предварительная (черновая), послойная обработка цилиндрическими фрезами; получистовая и чистовая обработка цилиндрическими фрезами или фрезами со сферическим торцом (радиусные фрезы).

Для сложных поверхностей (с сечением в форме окружности, эллипса, параболы, гиперболы) вблизи дна после черновых проходов формируются необработанные зоны [1 – 4], высота которых определяется по выражению [5]:

$$H = \frac{R_{\text{фр.}} \cdot \text{tg} \left(\arcsin \frac{R_{\text{фр.}}}{R_{\text{пов.}}} \right)}{2} + T, \quad (1)$$

где $R_{\text{фр.}}$ – радиус фрезы применяемой на предварительной операции; $R_{\text{пов.}}$ – радиус участка обрабатываемой поверхности; T – припуск на предварительной операции.

Окончательная обработка вогнутых поверхностей производится сферическими фрезами по траектории, проекция которой образует нормаль – без наклона оси инструмента (рис. 1, а) или с наклоном (рис. 1, б) к обрабатываемой поверхности.

Современные САМ системы (*Computer-aided manufacturing* – система, предназначенная для подготовки управляющих программ) существенно упростили процесс разработки управляющих программ, но при этом не учитываются процессы, происходящие при стружкообразовании. Это приводит к снижению параметров точности и качества обработанных поверхностей, а в некоторых случаях – к поломке дорогостоящего инструмента.

Для повышения эффективности объемного фрезерования на некоторых станках с ЧПУ применяют дополнительные адаптивные устройства, но так как данные устройства работают с некоторым запаздыванием, их применение ограничено. По этой причине, наиболее эффективным методом повышения производительности объемного фрезерования является покадровое управление режимами резания с искаженной траекторией движения инструмента, с компенсацией отжима инструмента от обрабатываемой поверхности.

Разработать управляющую программу для станка с ЧПУ с траекторией движения инструмента с учетом упругих деформаций, то есть отличающейся от траектории соответствующей номинальной поверхности в САМ системах можно двумя способами: изменением 3D модели; изменением параметров инструмента.

Учитывая величину допуска на отклонение формы обрабатываемой поверхности и вели-

чину смещения Δ на произвольном участке траектории, можно преобразовать модель обрабатываемой поверхности. Но данный способ не находит широкого применения, так как это требует дополнительных временных затрат по изменению модели. Кроме того, операции перестроения не всегда доступны, так как модель детали может не иметь дерева построения, например, импортировалась из другой системы, или в детали могут «вырождаться» отдельные поверхности.

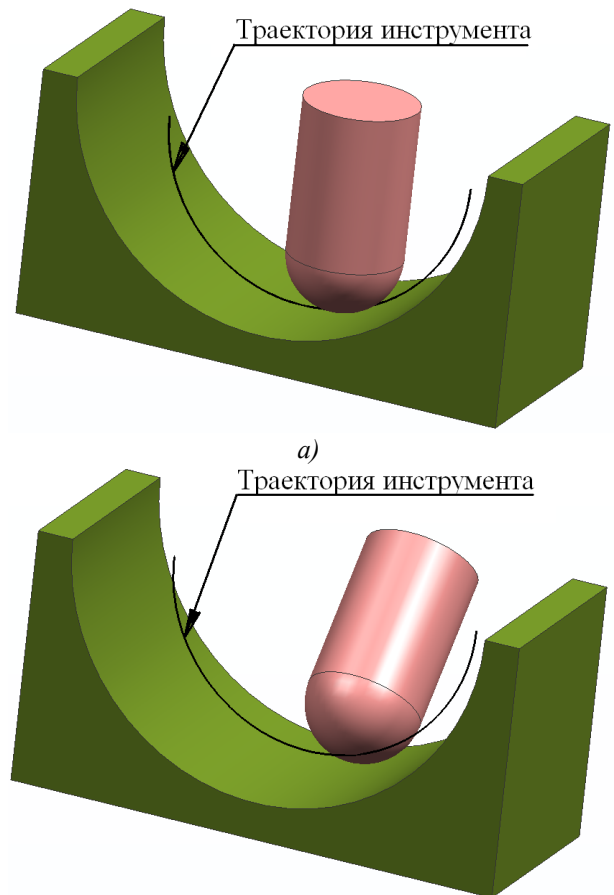


Рис. 1. Схема чистовой обработки:

а – без наклона оси инструмента к обрабатываемой поверхности; б – с наклоном

Разработка управляющих программ в САМ системах производится по 3D моделям, которые строятся по номинальным размерам. Но, как отмечалось ранее, возникающие при резании силы стремятся сместить режущую кромку инструмента от обрабатываемой поверхности, формируя поверхность, отличающуюся от номинальной. Учитывая, что вогнутые поверхности имеют допуск, направленный в деталь (система отверстий), то на практике, для гарантированного обеспечения точности обработки, управляющая программа формирует-ся инструментом с заниженными геометриче-

скими параметрами, а осевое смещение компенсируется «привязкой». Разработанная подобным образом управляющая программа при реализации формирует технологическую поверхность, которая расположена «в детали» ниже номинальной поверхности. Силы резания, отгибая инструмент, формируют фактическую поверхность, которая должна находиться в пределах допуска.

Подобный способ управления точностью обработки при объемном фрезеровании вогнутых поверхностей из-за отсутствия расчетной методики производится методом пробных проходов. В этой связи возникает необходимость в аналитическом определении параметров компенсации.

Будем считать, что фактическая образуемая поверхность находится на расстоянии отклонения формы от номинальной поверхности. Тогда

$$D_{\text{фак.}} = D_{\text{тех.}} + 2 \cdot \Delta N + \frac{\Delta T}{2} \Rightarrow$$

$$D_{\text{тех.}} = D_{\text{фак.}} - 2 \cdot \Delta N - \frac{\Delta T}{2}, \quad (2)$$

где $D_{\text{фак}}$ – фактически используемый диаметр инструмента; $D_{\text{тех}}$ – диаметр инструмента используемый при проектировании программы в САМ системе; ΔT – допуск.

Следовательно, чтобы определить величину коррекции инструмента, необходимо знать величину упругих перемещений на произвольном участке обрабатываемой поверхности в зависимости от геометрии зоны резания, и привести ее значение к постоянной величине.

Изменение упругих перемещений зависит от изменения сил, которые зависят от параметров резания, таких как геометрия зоны контакта режущей кромки инструмента с обрабатываемой поверхностью, подачи и скорости. Изменение одного параметра можно компенсировать другим, например, увеличение

глубины резания компенсировать уменьшением подачи.

Аналитические зависимости изменения силы резания от геометрии зоны контакта, подачи и скорости были предложены в работах [1, 2], и определяются по выражениям:

$$dP_z^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} \frac{a}{\sin \beta_1} \cos \beta R_{\text{фр.}} d\varphi +$$

$$+ 0,252 \mu \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} I_3 R_{\text{фр.}} d\varphi \quad ; \quad (3)$$

$$dP_x^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \cos \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi +$$

$$+ 0,252 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} I_3 \cos \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi \quad ; \quad (4)$$

$$dP_y^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \sin \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi +$$

$$+ 0,252 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} I_3 \sin \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi \quad , \quad (5)$$

где z – количество зубьев фрезы; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; a – толщина срезаемого слоя; β_1 – угол наклона плоскости сдвига стружки; β – угол между линией среза и направлением равнодействующей силы R_p ; μ – коэффициент трения; φ – угол профиля фрезы; $R_{\text{фр}}$ – радиус фрезы, мм; l_3 – величина износа зуба, мм; φ_b – угол между осью фрезы и верхней точкой пересечения лезвия с заготовкой; φ_n – угол между осью фрезы и нижней точкой пересечения лезвия с заготовкой.

Учитывая, что при скоростях резания от $v = 1000$ м/мин до $v = 0,1$ м/мин и подаче в диапазоне от $S = 0,001$ мм/зуб до $S = 0,2$ мм/зуб, числовые значения следующих выражений:

$$\sin \beta_1 = \sin \left(\arctg \left(\frac{\cos \gamma_\phi}{\left(\sin \left(\sqrt{65,79 \cdot S_{\text{зуб}}^{2,0654}} \right) \cdot (K_{a \max} - 1) + 1 \right) - \sin \gamma_\phi} \right) \right); \quad (6)$$

$$\cos \beta = \cos \left(\frac{50 - \arctg \left(\frac{\cos \gamma_\phi}{\left(\sin \left(\sqrt{65,79 \cdot S_{\text{зуб}}^{2,0654}} \right) \cdot (K_{a \max} - 1) + 1 \right) - \sin \gamma_\phi} \right)}{0,8} \right); \quad (7)$$

находятся в пределах $\sin \beta_1 = (0,54 \dots 0,58)$, $\cos \beta = (0,94 \dots 0,96)$, и интегральная форма неприемлема при применении на станках с ЧПУ, выражения (3) – (5) примут вид [6]:

$$dP_z^\Sigma = 0,252 \sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_b - \varphi_n) \left(15,87 S_{\text{зуб}} \sqrt{\frac{t}{2 R_{\text{фр.}}}} + I_3 \operatorname{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right); \quad (8)$$

$$dP_x^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \cos \varphi \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right); \quad (9)$$

$$dP_y^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \sin \varphi \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right), \quad (10)$$

где K – коэффициент усадки стружки.

Для чистовой обработки сферическими фрезами [6, 7]:

$$K = \sin \left(\sqrt[3]{65,79 \cdot S_{\text{зуб.}}^{2,0654}} \right) \cdot (K_{a \text{ max}} - 1) + 1, \quad (11)$$

где v – скорость резания, м/мин; $S_{\text{зуб.}}$ – подача инструмента, мм/зуб; $K_{a \text{ max}}$ – максимальный коэффициент усадки стружки, определенный экспериментально.

Ранее было указано, что меняющиеся силы резания приводят к изменению упругих перемещений инструмента, которые определяются по выражениям [2, 3, 4]:

$$\Delta N = \frac{\Delta X \frac{\partial Z}{\partial X} + \Delta Y \frac{\partial Z}{\partial Y} + \Delta Z}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right)^2 + 1}}, \quad (12)$$

где ΔX , ΔY , ΔZ – величины упругих перемещений по соответствующим осям;

$\frac{\partial Z}{\partial X}$, $\frac{\partial Z}{\partial Y}$ – частные производные функции $Z = \Phi(X, Y)$ по аргументам X и Y (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности).

Величины упругих перемещений определяются по выражениям:

Так как величина осевого упругого перемещения инструмента равна нулю, а

$$J_{\text{пр}} = J_X = J_Y = \frac{\pi D^4}{64} \approx 0,05 D^4 = 0,8 R_{\text{фр.}}^4 \Rightarrow J_{\text{фр.}} = J_X = J_Y = \frac{2,4 E R_{\text{фр.}}^4}{l^3}, \quad (16)$$

то выражение (12) примет вид:

$$\Delta N = \frac{\left((P_Z^\Sigma \sin \psi - P_Y^\Sigma \cos \psi) \frac{\partial Z}{\partial X} + (P_Z^\Sigma \cos \psi + P_Y^\Sigma \sin \psi) \frac{\partial Z}{\partial Y} \right) \frac{l^3}{2,4 E R_{\text{фр.}}^4}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right)^2 + 1}}. \quad (17)$$

Подставляя в полученное уравнение формулы (8) – (10) получим:

$$\begin{aligned} \Delta N_{C1} = & \left((0,252 \sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \left(15,87 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \right) \sin \psi - \\ & - 0,252 \sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \cos \psi \frac{\partial Z}{\partial X} + \\ & + (0,252 \sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \left(15,87 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \cos \psi + \end{aligned}$$

$$\Delta X = \frac{P_{\text{поп.}}^X}{J_X}; \quad \Delta Y = \frac{P_{\text{пр.}}^Y}{J_Y}; \quad \Delta Z = \frac{P_{\text{ос.}}^Z}{J_Z}, \quad (13)$$

где $P_{\text{поп.}}^x$, $P_{\text{пр.}}^y$, $P_{\text{ос.}}^z$ – проекции результирующей силы резания на координатные оси станка.

$$P_{\text{поп.}}^x = P_Z^\Sigma \cdot \sin \psi - P_Y^\Sigma \cdot \cos \psi;$$

$$P_{\text{пр.}}^y = P_Z^\Sigma \cdot \cos \psi + P_Y^\Sigma \cdot \sin \psi; \quad P_{\text{ос.}}^z = P_X^\Sigma, \quad (14)$$

где J_X , J_Y , J_Z – жесткость технологической системы по осям.

При механической обработке концевыми фрезами основная доля упругих деформаций приходится на инструмент, по этой причине в дальнейшем будем учитывать только жесткость фрезы. Расчет производится по выражению:

$$J_{\text{фр.}} = \frac{3 E J_{\text{пр.}}}{l^3}, \quad (15)$$

где E – модуль упругости первого рода; l – вылет инструмента; $J_{\text{пр.}}$ – приведенный момент инерции.

$$+ 0,252 \sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_e - \varphi_n) \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \sin \psi \frac{\partial Z}{\partial Y} \times$$

$$\times \frac{l^3}{2,4ER_{\text{фр.}}^4} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}} \quad (18)$$

где E – модуль упругости первого рода; l – вылет инструмента, мм; $R_{\text{тр.}}$ – радиус траектории движения инструмента, мм [8].

Выражение (18) показывает, что наибольшее значение погрешности размера динамической настройки формируется при обработке ранее необработанной зоны (вблизи дна) на первом проходе. Следовательно, выбор величины коррекции на размер инструмента необходимо проводить для данного участка, а изменение величины погрешности на других участках можно компенсировать изменением режимов резания.

Точность механической обработки зависит от погрешности динамической настройки, и

чтобы обеспечить стабильность точности на всей обрабатываемой поверхности необходимо выполнить условие:

$$\Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_3 = \Delta N_i = \text{const} \quad (19)$$

Регулирование погрешности динамической настройки при обработке на станках с ЧПУ наиболее эффективно осуществить управлением подачей, значение которой определяется из выражения (18):

$$S_{\text{зуб.}} = \frac{4,76 ER_{\text{фр.}}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha + 1}}{\sigma_i (\varphi_e - \varphi_n) l^3 \cos \alpha} - I_3 \text{tg} (80 + \lambda) + 9I_3$$

$$\left(15,87 \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + 30I_3 \sin \left(\frac{V}{2,23} \right) \right) \quad (20)$$

Прописать расчет подачи по выражению (20) в управляющую программу достаточно сложно, поэтому в операторе САМ системы, подача устанавливается по наиболее загруженному участку, то есть для обработки «дна» – (ранее необработанной зоны), при обработке паза (первый проход).

Для остальных участков подача регулируется корректором:

$$S_i = S_3 K; \quad (21)$$

где S_i – подача на произвольном участке; S_3 – заданная подача; K – параметр коррекции.

Параметр коррекции K при первом проходе (обработка паза) выводится из выражений (21).

Параметр коррекции для произвольной точки при обработке «стенки»:

$$K_i = \frac{S_{\text{зуб.}T6}}{S_{\text{зуб.}i}} = \frac{\sigma_i \left(\arcsin \sqrt{\frac{(H_{\text{ок.}T6} - (R_{\text{тр.}T6} - R_{\text{тр.}T6}))(2R_{\text{фр.}} - H_{\text{ок.}T6} - (R_{\text{тр.}T6} - R_{\text{тр.}T6}))}{R_{\text{фр.}}}} \right) l^3}{\left(15,87 \sqrt{\frac{T_{T6}}{2R_{\text{фр.}}}} + 30I_3 \sin \left(\frac{V_{T6}}{2,23} \right) \right)}$$

$$\frac{4,76ER_{\text{фр.}}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha_{T6} + 1}}{\sigma_i ((AR_{\text{тр.}}^{0,8} + B) l^3 \cos \alpha_i)} - I_3 \text{tg}(80 + \lambda) + 9I_3$$

$$\left(15,87 \sqrt{\frac{T_i}{2R_{\text{фр.}}}} + 30I_3 \sin \left(\frac{V_i}{2,23} \right) \right)$$

$$K_i \approx 0,18NR_{\text{фр.}}^{-1,3} \text{Ln}(R_{\text{тр.}} + R_{\text{фр.}}) \quad (22)$$

Для ранее необработанной зоны (дно):

$$K_{i+1} \approx (0,006N + 4)R_{\text{фр.}}^{-1,3} \text{Ln}(R_{\text{тр.}} + R_{\text{фр.}}). \quad (23)$$

Из выражений (22), (23) следует, что коэффициент регулирования подачи с уменьшением радиуса траектории будет уменьшаться, но при этом необходимо знать значение радиуса и момент, когда инструмент приблизится к необработанному участку.

Траектория управляющей программы обработки состоит из набора точек, по которым проходит инструмент, тогда через предыдущую, текущую и последующую точки можно провести окружность радиусом R (рис. 2) [9, 10]:

$$R_{\text{мп}} = \frac{ABC}{4S}; \quad (24)$$

где A – расстояние от предыдущей до текущей точки; B – расстояние от текущей до последующей точки; A, B – рассчитываются пост-процессором командой «*mot motion distance*»; C – расстояние между предыдущей и последующей точками, определяется по выражению:

$$C = \frac{A2 + B2}{\sin\left(\arctg \frac{A2 + B2}{A1 + B1}\right)}, \quad (25)$$

где $A1$ и $B1$ – проекции расстояний A, B на плоскость YZ ; $A2$ и $B2$ – проекции расстояний A, B на плоскость XY :

$$A1 = A \cos a^\circ, B1 = B \cos a^\circ, A2 = A \sin a^\circ, B2 = B \sin a^\circ. \quad (26)$$

Площадь треугольника

$$S_{\Delta} = \frac{AB \sin c^\circ}{2} \Rightarrow \quad (27)$$

$$\Rightarrow R_{\text{мп}} = \frac{C}{2 \sin c^\circ} = \frac{C}{2 \sin(180 + b^\circ - a^\circ)}$$

$$\text{т.к. } c^\circ = (180 + b^\circ + a^\circ), \quad (28)$$

где a°, b° – углы перемещения инструмента, рассчитываются САМ системой:

$$a^\circ = \arcsin \frac{A1}{A}, b^\circ = \arcsin \frac{B1}{B}; \quad (29)$$

где $A1$ – расстояние между предыдущей и текущей точкой по оси Z (рассчитывает САМ система).

При движении инструмента по заданной траектории нормаль вектора направления движения и ось инструмента образуют угол, который система САМ может высчитать по выражению:

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{(z2 - z1)}{L_n}, \quad (30)$$

где L_n – длина перемещения, рассчитывается САМ системой (в САМ системе Unigraphics – оператор *mot motion distance*).

По построению угол, при котором инструмент приблизится к ранее необработанной зоне, рассчитывается по выражению:

$$\alpha_2 = 90 - \arcsin \frac{(R_{\text{мп}} - H_1)}{R_{\text{тр}}}, \quad (31)$$

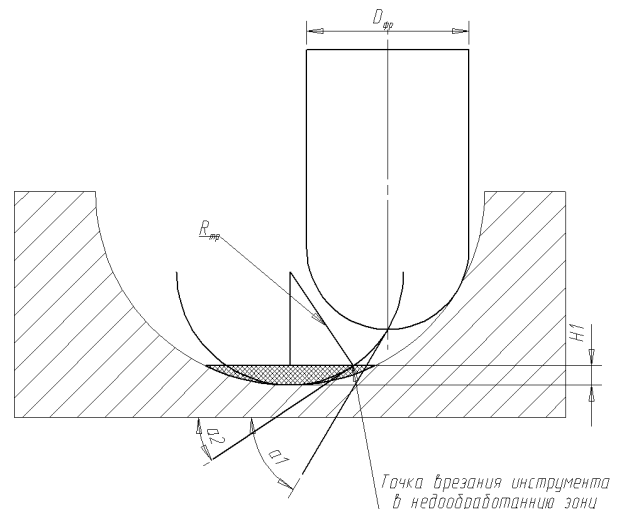
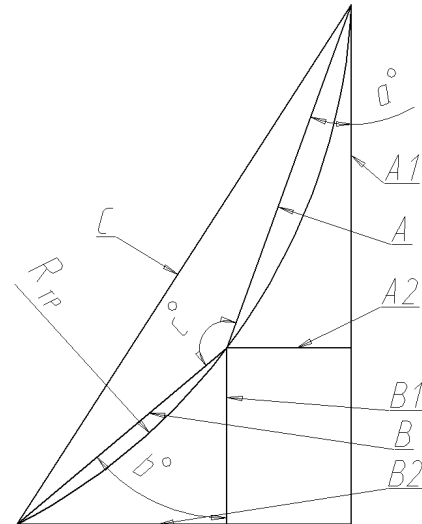


Рис. 2. Схема расчета параметров траектории

При соблюдении условия

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 90 - \arcsin \frac{(R_{\text{тр}} - H_1)}{R_{\text{тр}}}, \quad (32)$$

инструмент приблизится к ранее необработанной зоне.

Предлагаемая методика управления режимами обработки использовалась при разработке транслятора траектории инструмента (постпроцессор) для системы ЧПУ SINUME-

RIK 840D, при этом часть расчетов при разработке управляющей программы выполняет постпроцессор. Однако функции постпроцессоров имеют ограничения. Например, при расчете радиуса траектории инструмента необходимо знать координаты предыдущей, текущей и последующей точки, две первые точки задаются в постпроцессоре командами

«tom prev pos» и «tom pos» соответственно, но команды описания последующей точки не существует, по этой причине, часть математических вычислений производит система ЧПУ станка.

Рассмотрим пример управляющей программы (табл. 1) для обработки параболической траектории.

1. Сравнения управляющих программ

Управляющая программа с постоянной подачей	Управляющая программа с коррекцией подачи
N310 G54 S1000 M3	N40 G54 S1000 M3
N320 G0 X15. Y0.0 Z-4.365	N50 R101=0.123 R102=5. R103=.25 R105=1000
N330 G1 X14.25 Z-7.21 F6	N80 R1=15.622 R2=16.225 R3=4.365 R4=15.
N340 X13.5 Z-9.801	N90 R5=2.942 R6=75.23 R7=2.845 R8=.75
N350 X12. Z-14.477	N100 R51=14.25 R52=0.0 R53=-7.21
	N101 L400
N610 X-13.5 Z-9.797	N960 R5=5.631 R6=74.552 R7=5.428 R8=1.5
N620 X-15. Z-4.369	N970 R51=-15. R52=0.0 R53=-4.369 L400
N621 G0 Z200	N980 R1=5.631 R2=74.552 R3=5.428 R4=1.5
N670 M5	N1060 G0 Z200
N710 M2	N1070 X0 Y0
	N1080 M5
	N1090 M2

Подпрограмма

```
R9=R3+R7 R10=R4+R8 R11=ATAN2(R10,R9) R12=90-R6-R11 R13=SIN(R12) R14=(R1/(2*R13))
R15=R102/(R14+R102) R16=ASIN(R15) R17=TAN(R16) R18=((R102*R17)/2)+R103
R19=(R14-R18)/(R14) R20=ABS(90-ASIN(R19))
IF R6<R20 GOTOF MA2
R21= R105*sin(R6) R22=(0.18*R21)*(R101)*(LN(R14+R102)) R23=5 R24=R22*R23
N6 G1 X=R51 Y=R52 Z=R53 F=R24 GOTOF MA3
MA2: R21= R105*sin(R6) R22=(0.006*R21)*(R101)*(LN(R14+R102)) R23=5. R24=R22*R23
N7 G1 X=R51 Y=R52 Z=R53 F=R24
N8 MA3: M17
```

где N – нумерация кадров; G54 – ноль детали; S1000 M3 – вращение шпинделя по часовой стрелке; G0 – ускоренное линейное перемещение; G1 – линейное перемещение на подаче F; X, Y, Z – координаты точек траектории по осям; M5 – останов шпинделя; M2- конец УП;

$$R101=R_{\text{фр}}^{-1,3} = 5^{-1,3} = 0,123;$$

R102 – радиус применяемого инструмента;

R103 – заданный припуск предварительной обработки;

R105 – обороты шпинделя, мин⁻¹;

R1=\$mom_mot_dis – определяется параметр A (рис. 4);

R2=((asin(\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2)/\$mom_mot_dis))) – определяется угол α° (рис. 4);

R3=\$mom_mot_dis*(sin((asin(\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2)/\$mom_mot_dis)))) – определяется параметр A1 (рис. 4);

R4=\$mom_mot_dis*(sin((asin(\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2)/\$mom_mot_dis)))) – определяется параметр A2 (рис. 4);

R5=\$mom_mot_dis – определяется параметр B (рис. 4);

R6=((asin(\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2)/\$mom_mot_dis))) – определяется угол β° (рис. 4);

R7=\$mom_mot_dis*(sin((asin(\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2)/\$mom_mot_dis)))) – определяется параметр B1 (рис. 4);

R8=\$mom_mot_dis*(sin((asin(\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2)/\$mom_mot_dis)))) – определяется параметр B2 (рис. 4);

R9=R3+R7 – суммирование параметров A1 и B1;

R10=R4+R8 – суммирование параметров A2 и B2;

R11=ATAN2(R10,R9) – определяется угол между сторонами C и A1;

R12, R13, R14, R15, R16, R17 – составляющие выражения (25);

R18=((R102*R17)/2)+R103 – определяется значение выражения (1);

R19=(R14-R18)/(R14) – определяется радиус траектории, выражение (25)

R20=ABS(90-ASIN(R19)) – определяется значение выражения (32);

R21 – определение скорости резания на произвольном участке;

R22 – определение коэффициента коррекции подачи;

R23 – заданная подача обработки, определяется по «дну»;

R24 – расчетная подача на произвольном участке контура;

R51, R52, R53 – координаты точки по осям X Y Z;

L400 – вызов подпрограммы №400;

M17 – конец подпрограммы.

Управляющая программа работает следующим образом:

- 1) Постпроцессор определяет параметры R1 – R8, R51 – R53;
- 2) Вызывается подпрограмма L400;
- 3) Система ЧПУ станка рассчитывает параметры R9 – R20;
- 4) IF R6 < R20 GOTOF MA2 – сравнение параметров, если угол R6 меньше угла R20, то перейти на кадр с маркером MA2, где определяется подача для участка «дно» и перемещение производится на пониженном режиме, если нет, то следующий кадр определяет подачу на участке «стенка», перемещение производится на повышенном режиме, командой GOTOF MA2 производится переход к кадру M17.

Проверка работоспособности разработанного программного обеспечения производилась на трехосевом вертикально-фрезерном станке 6Б52Ф3 с системой ЧПУ SINUMERIK 802 и на 3D кинематической модели фрезерного станка с системой ЧПУ SINUMERIK 840D. На рис. 3 показана позиция инструмента при обработке вогнутой поверхности на постоянных режимах резания, время одного прохода составило $T = 12$ мин.

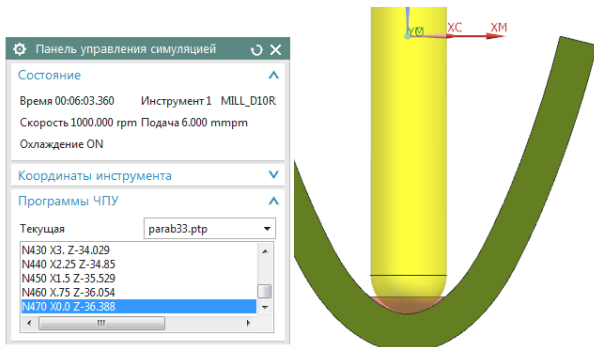


Рис. 3. Обработка с постоянной подачей

На рис. 4 показаны позиции инструмента при обработке вогнутой поверхности на регулируемых режимах резания, время одного прохода составило $T = 1,2$ мин, ниже в 10 раз, в отличие от режима с постоянной подачей.

Экспериментальные исследования по определению влияния меняющихся параметров зоны обработки на силу резания при меняющейся подаче, проводился сферической фрезой фирмы HANITA с геометрическими параметрами: диаметр фрезы $D = 10$ мм; радиус сферы торца $R = 5$ мм; длина режущей части $L_1 = 30$ мм; вылет $L_2 = 50$ мм на вертикально-фрезерном станке 6Б52Ф3.

Образец

Блок 62x40x35, материал – нержавеющая сталь 40X13, твердость 40...45 HRC. Радиус

обрабатываемой поверхности $R_{пов} = 20$ мм. Предварительный припуск на обработку $T = 0,2$ мм. Измерение силы резания производилось динамометром УДМ-600 (рис. 5), показания параметров выводились программой Microsoft Excel.

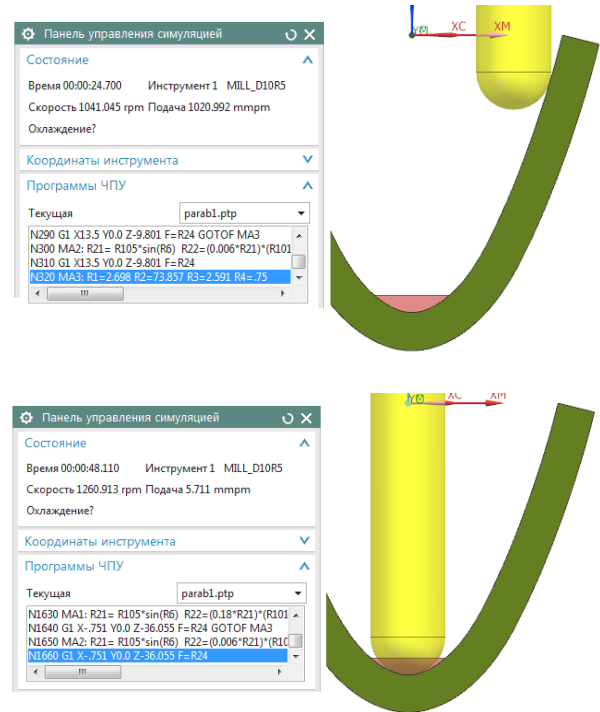


Рис. 4. Обработка с переменной подачей

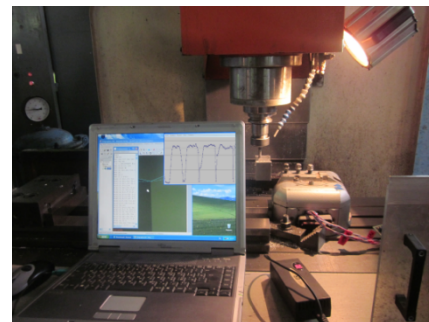


Рис. 5. Экспериментальное оборудование для определения силы резания

По параметрам динамометра, в программе

Microsoft Excel строились графики силы резания в зависимости от времени обработки (рис.6).

Использование предложенной управляющей программы позволило сократить время обработки от 3 до 12 раз, устранить появление брака по отклонению формы [9, 10].

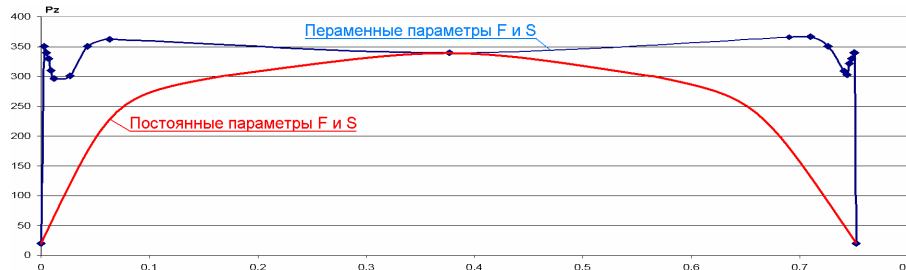


Рис. 6. Изменение силы P_z

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батуев, В.А., Батуев, В.В. Управление подачей с целью обеспечения точности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ / Сб. тезисов докладов международной научно-технической конференции. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2003. – С. 11–12.
2. Батуев, В.В. Обеспечение производительности при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей в условиях заданной точности / Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 91–94.
3. Гузеев, В.И. Погрешности динамической настройки при обточке фасонных деталей на станках с ЧПУ / Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. Челябинск: ЧПИ, – 1980. – №249. – С.16–18.
4. Гузеев, В.И., Батуев, В.В. Учет влияния следов предшествующей обработки на точность фрезерования пространственно-сложных поверхностей / Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – С. 115–117.
5. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение производительности объемного фрезерования необработанных зон. // Сб. науч. статей V Междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение – основа технологического развития России». Курск, 22...24 мая 2013 г. – 2013. – С. 307–310.
6. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение производительности чистового объемного фрезерования на станках с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №11(29). – С. 14–18.
7. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Расчет коэффициента усадки стружки при чистовой обработке сферическими фрезами // Материалы III междунар. научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии». Москва, 23-24 января 2014 г. – С. 89–94.
8. Малютин, Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – №4(306). – С. 74–81.
9. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №6(36). – С. 39–44.
10. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей

Проведенные эксперименты подтвердили возможность управления режимами резания в автоматическом режиме, в зависимости от изменения обрабатываемого контура, благодаря которому значительно повысилась производительность чистовой обработки поверхностей сложной геометрической формы.

сложной формы на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С.71–75.

REFERENCES

1. Batuev, V.A., Batuev, V.V. Feed control with purpose of ensuring accuracy at special-complex surfaces on NC machines / *Proceedings of the Inter. Scientif.-Tech. Conf.* – Barnaul: Publishing House of Polzunov STU of Altay, 2003. – pp. 11-12.
2. Batuev, V.V. Productivity ensuring at finish milling of special-complex surfaces under conditions of the specified accuracy / *Efficient Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings.* – Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 2005. – pp. 91-94.
3. Guzeev, V.I. Dynamic adjustment errors at formed component turning on NC machines / *Finishing Efficient Technology.* Chelyabinsk: ChPI, - 1980. – No.249. – pp. 16-18.
4. Guzeev, V.I., Vatiev, V.V. Account of previous machining marks impact upon accuracy of special-complex surfaces milling / *Efficient Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings* – Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 2003. – pp. 115-117.
5. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Productivity increase at spatial milling of unprocessed areas // *Proceedings of the V-th Inter. Scientif.-Tech. Conf. "Mechanical – Basis of Russia Technological Development"*. Kursk, May 22 – 24, 2013 – 2013. – pp. 307-310.
6. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Productivity increase at finish spatial milling on NC machines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2013. – No.11(29). – pp. 14-18.
7. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Computation of chip shrinkage factor at finishing with ball mills // *Proceedings of the III-d Inter. Scientif.-Pract. Conf. "XXI-st: Fundamental Science and Techniques"*. Moscow. January 23-24, 2014. – pp. 89-94.
8. Malyutin, G.E. Cutting force definition at finish spatial milling of concave complex surfaces with ball mills on NC machines // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology.* – 2014. – No.4 (306). – pp. 74-81.
9. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Efficiency increase of 3D finish spatial milling on NC machines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2014. – No.6(36). – pp. 39-44.
10. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Productivity increase at concave complex surface milling on NC machines. // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2014. – No.12. – pp. 71-75.

Рецензент д.т.н. А.С. Ямников