

УДК 62 1.9.06-52

## Математическая модель расчета отклонений формы, размера и взаимного расположения плоских поверхностей

Кравченко И. И.<sup>1,\*</sup>

[\\*kniig@yandex.ru](mailto:kniig@yandex.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В статье рассмотрена математическая модель расчёта векторного поля отклонений формы, размера и взаимного положения плоских поверхностей корпусных деталей, обрабатываемых на многооперационных станках в условиях анизотропной жесткости технологической системы. В модели показано, что торцовое фрезерование - это силовой процесс, характеризующийся непостоянством сил резания в координатах 3D как по длине обработки, так и в пределах одного оборота торцовой фрезы.

**Ключевые слова:** многооперационный станок, математическая модель, отклонение от плоскостности, векторное поле, средняя плоскость, отклонение расположения реальных поверхностей, прогноз точности обработки

---

Разработка математической модели обработки плоских поверхностей торцовым фрезерованием на многооперационных станках и методов расчета ожидаемых отклонений формы от номинально плоских поверхностей является актуальной задачей, что обуславливается следующими обстоятельствами:

во-первых, плоские поверхности являются базовыми и одними из основных в машиностроении, поэтому точность их изготовления связана с качеством выпускаемых изделий в целом;

во-вторых, прогнозирование отклонений формы номинально плоских поверхностей с использованием традиционных методов и средств измерений характеризуется большой трудоемкостью и сложностью реализации измерений и математической обработки полученных результатов;

в-третьих, измерения отклонений точек, результаты которых в дальнейшем используются для воспроизведения вспомогательных отсчетных плоскостей (прилегающих, средних, выравнивающих и др.), выполняются не только при контроле отклонений формы номинально плоских поверхностей, но и при контроле некоторых отклонений расположения поверхностей (например, отклонений от параллельности, перпендикулярности, наклона, симметричности, позиционных отклонений).

Для этого потребовалось поставить и решить следующие задачи:

- провести анализ закономерностей формообразования плоских поверхностей деталей при их механической обработке торцовым фрезерованием в условиях анизотропной жесткости технологической системы;

- разработать математическую модель оценки отклонений от плоскостности векторным полем отклонений от средних поверхностей, полученного как результат моделирования процесса торцового фрезерования; прогнозировать с определённым приближением ожидаемую точность обработки.

В данной работе рассматривается разработка математической модели расчета отклонений формы, размера и взаимного расположения при обработке плоских поверхностей торцовым фрезерованием на многооперационных станках.

Из поставленных выше задач в рамках данной работы рассмотрим методику аналитического построения векторного поля  $\Phi$ , которое описывает с соответствующим приближением реальную поверхность, получаемую в результате моделирования процесса обработки плоских поверхностей корпусных деталей торцовым фрезерованием. Мы исходим из того, что процесс торцового фрезерования существенно отличается от однолезвийной обработки, где аналитические зависимости прогнозирования ожидаемой точности достаточно хорошо исследованы и объективно раскрывают силовую характеристику протекающих процессов резания [1.2].

В отличие от классической модели однолезвийной обработки торцовое фрезерование имеет свои характерные особенности: постоянно переменное и несимметричное распределение сил резания на зубьях за один оборот режущего инструмента (рис.1), переменная ширина фрезерования на участках входа и выхода фрезы (рис.2), большие усилия резания, значительные упругие деформации в условиях анизотропной жесткости [2] технологической системы не являются постоянными как по ширине, так и по длине обработки плоской поверхности. Подобные исследования показаны в работе [3] при обработке корпусных деталей на многооперационном станке мод. МС 12-250.

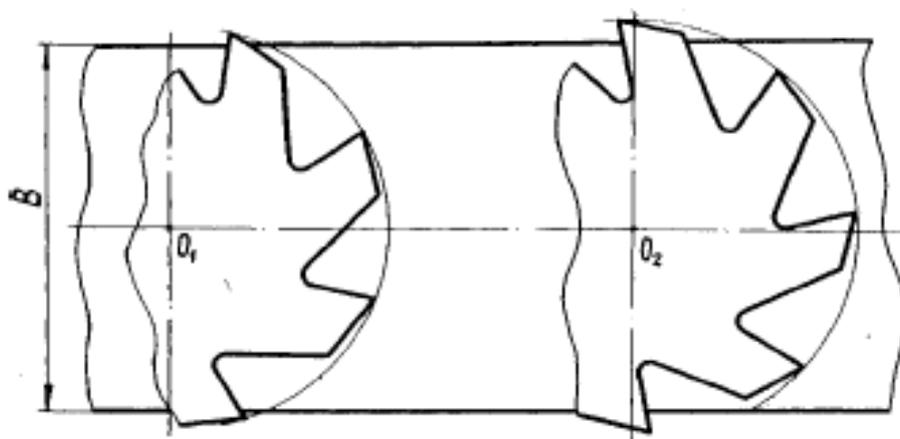
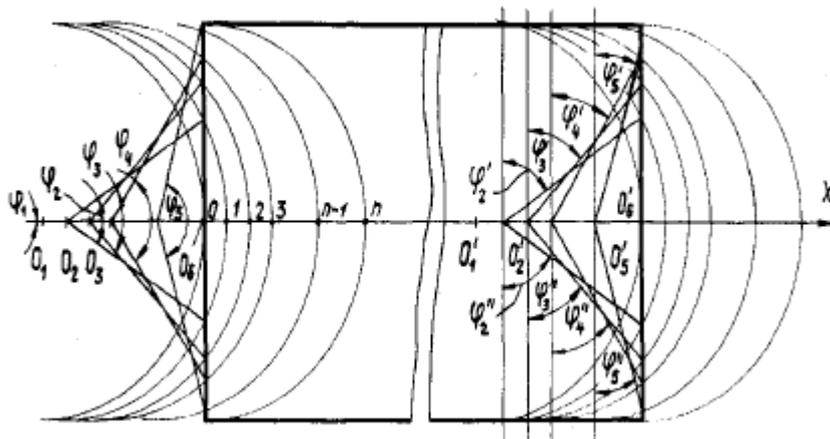


Рис. 1. Изменение количества одновременно работающих зубьев фрезы на дуге контакта с деталью



**Рис.2.** Изменение углов контакта зубьев торцевой фрезы с поверхностью детали по длине обработки (слева на рисунке начало фрезерования  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \dots, \varphi_n$ ; справа окончание фрезерования  $\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3, \dots, \varphi'_n$ )

Учитывая сложную динамику процессов при торцевом фрезеровании, в основу модели была положена гипотеза его имитации. В координатной системе станка и детали моделировалось ее состояние в каждой точке обрабатываемой поверхности. Вся траектория инструмента от начала формирования первого элемента стружки до выхода его из зоны обработки с подачей  $S_{\min}$  рассматривалась дискретно в пределах его одного оборота инструмента с заданным шагом итераций. Предполагая на каждом шаге итерации, что система на мгновение виртуально «остановилась» (рис.1), можно определить какое количество зубьев фрезы и в какой момент времени от начала обработки до ее завершения участвуют в работе (рис.2), в конкретном ее состоянии, т.е. априори известна схема обработки, величина действующих сил резания, известны координаты инструмента и заготовки, жесткость элементов технологической системы. На основании этих данных рассчитываем упругие деформации системы и определяем векторы отклонений поля  $\Phi$  от номинальной поверхности (*количество векторов отклонений зависит от величины шага итераций*).

Для количественной оценки отклонений формы, размера и расположения недостаточно наличия векторного поля  $\Phi$ , которое определено от геометрической плоскости, заданной номинальным размером  $B_n$ . Необходимо установить базу для их отсчета. Вопрос об установлении баз для отсчета имеет принципиальное значение, так как при различных базах могут быть получены разные величины отклонений. Поэтому ГОСТ 10356-63 определял отклонение формы (отклонения от плоскостности) от прилегающей плоскости, которая касается реальной поверхности, проходит вне материала детали и направлена так, что расстояние от нее до наиболее удаленной точки реальной поверхности, в пределах нормируемого участка меньше, чем при любых других положениях касательных плоскостей. ГОСТ предусматривал, что после приработки деталей в сопряжениях, они будут контактировать именно по прилегающим поверхностям.

Если прилегающую плоскость при измерении отклонений можно виртуально построить, применяя метод, рекомендованный в приложении ГОСТ 10356-63 (сегодня раз-

дела этого ГОСТа I, II отменены), то ее аналитическое определение при известных профилограммах поверхности, необходимое для оценки погрешностей обработки, требует сложных, громоздких, непроизводительных расчетов, трудно поддающихся алгоритмизации [4].

В международной практике принято два стандарта отсчета отклонений: от средней линии, поверхности (система М) и от огибающей линии (система Е, которая корреспондируется с отсчетом отклонений формы от прилегающих).

Система М имеет определенные преимущества по отношению к системе Е (от прилегающих поверхностей) т.к. развитие измерительной техники, применение лазерных сканеров, автоматизированных оптико-механических средств и приборов позволяет в настоящее время широко использовать для отсчета отклонений средние плоские поверхности и профили [1,3,4], которые являются базовыми элементами номинальной формы и служащие основой для оценки отклонений формы.

Согласно стандартам, средний элемент (профиль) – поверхность, имеющая форму номинальной и расположенная по отношению к реальной поверхности так, чтобы сумма квадратов отклонений точек реальной поверхности от средней была бы минимальной. Тогда, при расчете отклонений формы от средней плоскости, отклонение формы равно сумме абсолютных значений наибольших отклонений точек реальной поверхности по обе стороны от средней плоскости.

Существующие сегодня измерительные приборы, в частности, позволяют измерять отклонения формы непосредственно от средней поверхности, исключая полностью какие-либо рутинные промежуточные расчеты и позволяют значительно сократить время измерения поверхностей.

ГОСТ 28187-89 (п.п.2.4.2) (СТ СЭВ 6329 88) и ГОСТ 24643-81 (СТ СЭВ 636-77) дают определения средних поверхностей без их аналитических выражений [5].

Предлагаемая математическая модель расчета векторного поля  $\Phi$  отклонений точек реальной поверхности  $\overline{1:t}$  от номинального положения, разработанная для обработки корпусной детали на многооперационном станке с горизонтальной компоновкой шпинделя (рис.3), позволяет рассчитать и дать прогноз (т.е. аналитический расчет ожидаемой точности) отклонения формы, размера  $\Delta_\phi$ ,  $\Delta_p$  и  $\Delta_{в,p}$  расположения плоскости, используя в качестве базы для отсчета отклонений среднюю плоскость [3].

Уравнение плоскости в системе координат  $X, Y, Z$  :

$$Z = \frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C}$$

или

$$Z = b_0 + b_1 x + b_2 y,$$

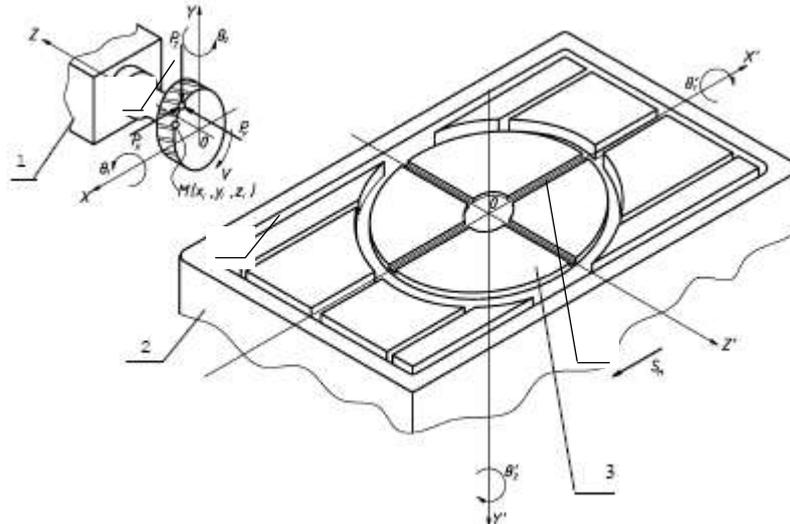
нам необходимо найти параметры  $b_0, b_1$  и  $b_2$  при выполнении предыдущего условия. Для этих целей применяется метод наименьших квадратов.

Запишем модель, представляющую реальную поверхность, в виде,

$$Z = F(X, Y), \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned} Z &= [z_1, \dots, z_m]^T \\ Y &= [y_1, \dots, y_m]^T \\ X &= [x_1, \dots, x_m]^T. \end{aligned}$$



**Рис.3.** Компоновка и система координат многооперационного станка мод. MC12-250 1 - шпиндельный узел; 2 - продольный стол; 3- поворотный стол

Введем обозначения:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_m & y_m \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

Вектор оценок, полученный методом наименьших квадратов, имеет вид

$$\hat{\mathbf{b}} = (X'X)^{-1}X'Z. \quad (2)$$

Тогда уравнение средней плоскости в матричной форме

$$\hat{Z} = X\hat{\mathbf{b}}. \quad (3)$$

Разность двух матриц  $[Z] - [\hat{Z}] = [\Delta\hat{Z}]$  представляет матрицу текущих значений отклонений точек реальной поверхности от средней плоскости. Сумма абсолютных значений наибольших отклонений по обе стороны от средней плоскости даст отклонение формы (рис.1).

$$|\Delta\hat{Z}_{max}| + |\Delta\hat{Z}_{min}| = \Delta\Phi. \quad (4)$$

Считая известными уравнение геометрической плоскости, заданной номинальным размером

$$Z = -\frac{A'}{c'}x - \frac{B'}{c'}y - \frac{D}{c'} = B_H \quad (5)$$

и уравнение полученной средней плоскости

$$\hat{Z} = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C}, \quad (6)$$

Можно определить угол между их нормальными

$$\cos \gamma = \frac{AA' + BB' + CC'}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \sqrt{(A')^2 + (B')^2 + (C')^2}} \quad (7)$$

Учитывая, что  $\hat{b}_0 = -\frac{D}{C}$ ;  $\hat{b}_1 = -\frac{A}{C}$ ;  $\hat{b}_2 = -\frac{B}{C}$ ,

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \hat{b}_1^2 + \hat{b}_2^2}}. \quad (8)$$

Отклонение расположения

$$\Delta_{в.р} = l * \operatorname{tg} \gamma = l * \sqrt{\hat{b}_1^2 + \hat{b}_2^2}, \quad (9)$$

где  $l$  – длина нормируемого участка.

Сумма квадратов отклонений

$$S_0 = (X^T X)^{-1} * X^T * Z \quad (10)$$

Тогда, среднее квадратическое отклонение точек реальной поверхности от средней плоскости

$$\sigma = \sqrt{\frac{S_0}{m-3}},$$

где  $m$  – число точек поверхности, в которых определены отклонения  $\Delta \hat{Z}_i$ .

Если  $m \geq 100$ , то погрешность расчета равна:

$$\Delta_p = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{m}} = \pm 0,1 * \sigma \quad (11)$$

Согласно стандартному определению, поля допуска размера по ГОСТ 28187-89, размер можно контролировать в любой точке рассматриваемой поверхности, если она не имеет отклонений формы и расположения. В противном случае, размер  $B$  должен контролироваться во всех точках рассматриваемой плоскости. Отклонение размера в каждой точке реальной поверхности будет определяться модулем вектора  $\Delta \bar{Z}_i$ .

При обработке партии деталей, в результате упругих перемещений технологической системы (рис.4), имеем рассеяние выполняемого размера и формы. В случае копирования погрешностей, когда наибольшие и наименьшие действительные размеры поверхностей после обработки получаются соответственно из заготовок с наибольшими и наименьшими действительными размерами, по выше приведенным зависимостям можно определить две различных средних плоскости, соответствующих деталям с максимальным и минимальным размерами [5].

Тогда представляется рациональным принять за погрешность выполняемого размера наименьшую разность между двумя средними плоскостями (рис.5)

$$\Delta_p = \hat{Z}_{\max(\min)} - \hat{Z}_{\min} \quad (12)$$

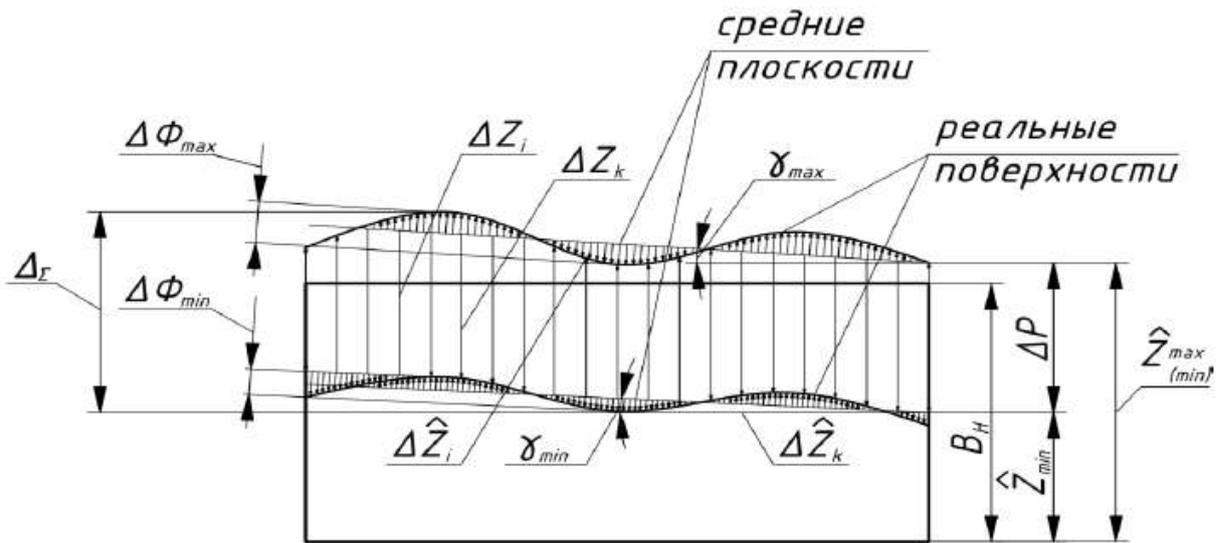


Рис.4. Расчетная схема определения отклонений формы, размера и расположения поверхностей

Суммарная погрешность обработки в общем случае с учетом отклонений формы и расположения может быть представлена следующей зависимостью:

$$\Delta_{\Sigma} = [(\hat{Z}_{\max(\min)} - \hat{Z}_{\min}) + L * \sqrt{\tan \gamma_{\max}} + 0,5(\Delta\Phi_{\max} + \Delta\Phi_{\min})] \quad (13)$$

Если полагать, что распределение  $\Delta\hat{Z}$  нормальное (векторы отклонений нормально распределены  $M_{\Delta\hat{Z}} = 0$  и  $M_{(\Delta\hat{Z}\Delta Z^T)} = \sigma^2$ ), то можно провести проверку существенности, тесно связанной с построением средней плоскости. Т.е., получая оценки  $\hat{b}$ , можно ставить вопрос о мере зависимости между  $Z$  и  $\hat{Z}$ , т.е. измерить взаимосвязь между наблюдаемыми и предсказанными их значениями, характеризующуюся коэффициентом корреляции  $\rho$ . Коэффициент корреляции характеризует меру линейной зависимости между величинами  $Z$  и  $\hat{Z}$ . Это означает следующее, если  $\hat{b}_0 + \hat{b}_{1x} + \hat{b}_{2y}$  есть линейная функция наилучшего среднеквадратического приближения к величине  $Z$ , т.е. такая линейная функция, для которой математическое ожидание

$$M * [z - (\hat{b}_0 + \hat{b}_{1x} + \hat{b}_{2y})]^2$$

достигает наименьшего значения.  $\Delta\hat{Z}$  - ошибка этого приближения

$$\Delta\hat{Z} = Z - (\hat{b}_0 + \hat{b}_{1x} + \hat{b}_{2y}) \quad (14)$$

Тогда математическое ожидание случайной величины  $\Delta\hat{Z}$  равно нулю, а отношение ее дисперсии к дисперсии величины  $Z$  определяется только величиной коэффициента корреляции по формуле

$$\frac{\sigma^2_{\Delta\hat{Z}}}{\sigma^2_Z} = 1 - \rho^2 .$$

Коэффициент корреляции может быть записан в одной из следующих форм:

$$\rho = \frac{1}{\sigma_z \sigma_{\Delta\hat{Z}}} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z})(\Delta\hat{z}_i - \Delta\hat{z}), \quad (15)$$

где дисперсии величин  $Z$  и  $\Delta\hat{Z}$  соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z})^2 \\ \sigma_{\Delta\hat{z}} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\Delta\hat{z}_i - \Delta\hat{z})^2 \end{aligned} \right\}$$

Абсолютное значение коэффициента корреляции находится в интервале  $0 \leq |\rho| \leq 1$ . Чем ближе  $|\rho|$  к 1, тем теснее линейная зависимость между величинами  $Z$  и  $\hat{Z}$ , т.е. тем меньше (относительно) средняя квадратическая ошибка представления каждой из величин с помощью линейной функции другой величины.

Для подтверждения гипотезы о некоррелированности рассматриваемых  $Z$  и  $\hat{Z}$  необходимо проверить значимость коэффициента корреляции. Значимость коэффициента корреляции проверяется путем сравнения абсолютной его величины, умноженной на  $\sqrt{m-1}$ ,  $H = |\rho|\sqrt{m-1}$ , с его критическими значениями при заданной надежности вывода  $\zeta$ . Значения  $H$  для различных значений надежности вывода приведены в [5].

Если для вычисленного  $\rho$  произведение  $|\rho|\sqrt{m-1}$  окажется больше критического значения  $H$  при заданном  $\zeta$ , то с надежностью вывода  $\zeta$  следует отвергнуть гипотезу о некоррелированности рассматриваемых  $Z$  и  $\Delta\hat{Z}$ .

Необходимо отметить, что наличие векторного поля  $\Phi$  отклонений точек поверхности от номинального положения позволяет использовать различные методики оценки отклонений от плоскостности, но наиболее целесообразно, с точки зрения аналитических и метрологических соображений, применение в качестве базы отсчета отклонений от средней плоскости.

Следовательно, уравнения (4,9,12) описывают отклонения формы, расположения и размера обрабатываемых плоскостей, используя в качестве базы для их отсчета среднюю плоскость.

## Заключение

1. Погрешности от упругих перемещений технологической системы, определяющие точность обработки плоскостей, являются функцией одного линейного перемещения шпиндельного узла относительно оси  $Z$ , двух угловых его перемещений по осям  $X$  и  $Y$ , а также поворотного стола относительно оси  $Y$ .

2. Для нахождения вектора отклонений от номинального положения каждой точки рассматриваемой поверхности следует использовать разработанную математическую модель торцового фрезерования, учитывающую анизотропные свойства упругой технологической системы [6].

3. Оценку погрешностей обработки плоскости рекомендуется производить с помощью векторного поля  $\Phi$ , описывающего отклонения точек реальной поверхности от номинального положения. В качестве базы отсчета отклонений рекомендуется использовать среднюю плоскость [1].

4. Предлагаемая математическая модель может составлять как отдельную часть информационно согласованных подсистем, так и представлять отдельный модуль в автоматизированной системе технологической подготовки производства, что позволяет получить законченный результат проектирования [8,10].

### Список литературы

1. Кравченко И.И. Математическое моделирование торцового фрезерования плоских поверхностей корпусных деталей // Главный механик. 2016. № 2. С. 38-42.
2. Кравченко И.И. Математическое моделирование обработки плоских поверхностей торцовым фрезерованием // Республиканская научно-техническая конференция «Усовершенствование технологической подготовки производства машиностроительных и приборостроительных предприятий с применением средств вычислительной техники»: тез. докл. Таллин: ТПИ, 1979. С. 34-37.
3. Кравченко И.И. Исследование точности и производительности обработки фрезерованием плоскостей корпусных деталей (на примере обработки на многооперационных станках): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 208 с.
4. Детлев Х. Обработка данных измерения непрямолинейности и неплоскостности с помощью ЭВМ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1974.
5. ГОСТ 28187-89. Основные нормы взаимозаменяемости. Отклонения формы и расположения поверхностей. Общие требования к методам измерений. М.: Изд-во стандартов, 1989. 19 с.
6. Кравченко И.И. Влияние анизотропной жесткости технологической системы на точность обработки плоских поверхностей // Главный механик. 2016. № 1. С. 48-50.
7. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 192 с.
8. Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. А.И. Кондакова. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
9. Коротков В.С., Афонасов А.И. Метрология, стандартизация и сертификация: уч. пособ. / под ред. В.С. Короткова, А.И. Афонасова. Томск: ТПУ, 2012. 194 с.
10. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 360 с.

## **A Mathematical Model for Calculating Deviations of the Shape, Size and Geometric Relationship of Flat Surfaces**

I.I. Kravchenko<sup>1,\*</sup>

\*[knig@yandex.ru](mailto:knig@yandex.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** machining center, mathematical model, vector field, the average plane deviation of real surfaces, the expected precision

---

There is a variety of objectives for measuring deviations of flatness, size and mutual arrangement of flat surfaces, namely: processing accuracy control, machinery condition monitoring, treatment process control in terms of shape deviation, comparative analysis of machine rigidity. If for a processing accuracy control it is sufficient to obtain the flatness deviation, as the maximum adjoining surface deviation, the choice of the adjoining surface as a zero reference datum deviation leads to considerable difficulties in creating devices and in particular devices for measuring size and shape variations. The flat surface is characterized by mutual arrangement of its points and can be represented by equation in the selected coordinate system. The objective of this work is to provide analytical construction of the vector field  $F$ , which describes the real surface with an appropriate approximation upon modelling the face milling of the flat surfaces of body parts in conditions of anisotropic rigidity of technological system. To determine the numerical value of shape and size deviation characteristics the average surfaces can serve a basis for the zero reference values of vectors. A mean value theorem allows to obtain measurement information about deviations in shape, size and arrangement of processed flat surfaces in terms of metrology, as well as about the process parameters such as depth of cut, feed, cutting speed, anisotropic rigidity of technological system that characterize the specific processing conditions. The machining center MS 12-250 was used to carry out a number of experiments with processing the surfaces of the prism-shaped body parts (300x300x250) and the subsequent measurements of flatness on the IS-49 optical line to prove the correlation between expected and observed values of the vectors of flatness deviations.

### **References**

1. Kravchenko I.I. Mathematical modeling of face milling of flat surfaces of body parts. *Glavnyi mekhanik*, 2016, no. 2, pp. 38-42. (in Russian).

2. Kravchenko I.I. Mathematical modeling of processing of flat surfaces by face milling. *Respublikanskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Uovershenstvovanie tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva mashinostroitel'nykh i priborostroitel'nykh predpriyatii s primeneniem sredstv vychislitel'noi tekhniki": tez. dokl.* [Abstracts of the Republican scientific-technical conference "Perfection of technological preparation of production of machine-building and instrument-making enterprises with the use of computer equipment"]. Tallinn, TPI Publ., 1979, pp. 34-37. (in Russian).
3. Kravchenko I.I. *Issledovanie tochnosti i proizvoditel'nosti obrabotki frezerovaniem ploskosti korpusnykh detalei (na primere obrabotki na mnogooperatsionnykh stankakh). Avtoreferat kand. diss.* [Investigation of accuracy and performance of the processing by milling of surfaces of body parts (on the example of processing on multioperational machine tools). Abstract of cand. diss.]. Moscow, 1979. 208 p. (in Russian, unpublished).
4. Detlev Kh. *Obrabotka dannykh izmereniya nepryamolineinosti i neploskostnosti s pomoshch'yu EVM. Avtoreferat kand. diss.* [Processing of measurement data of unstraightness and nonflatness by computer. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 1974. (in Russian, unpublished).
5. *GOST 28187-89. Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Otkloneniya formy i raspolozheniya poverkhnosti. Obshchie trebovaniya k metodam izmerenii* [State Standard 28187-89. Basic norms of interchangeability. Deviations of form and position. General requirements for methods of measurements]. Moscow, Standards Publishing House, 1989. 19 p. (in Russian).
6. Kravchenko I.I. Influence of anisotropic stiffness of technological system on the precision machining of flat surfaces. *Glavnyi mekhanik*, 2016, no. 1, pp. 48-50. (in Russian).
7. Rumshinskii L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Mathematical processing of results of the experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 192 p. (in Russian).
8. Vasil'ev A.S., Dal'skii A.M., Zolotarevskii Yu.M., Kondakov A.I. *Napravlennoe formirovanie svoistv izdelii mashinostroeniya* [Directed formation properties of engineering products]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 352 p. (in Russian).
9. Korotkov V.S., Afonarov A.I. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya: uch. posobie* [Metrology, standardization and certification: the academic manual]. Tomsk, TPU Publ., 2012. 194 p. (in Russian).
10. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Fundamentals of CAD]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 360 p. (in Russian).