

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.923

Б.М. Бржозовский, О.В. Захаров, А.Ф. Балаев

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМЫ ЗАГОТОВОК В ПАРТИИ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

Рассмотрен геометрический механизм образования погрешностей формы заготовок при бесцентровом суперфинишировании. Предложена методология обеспечения точности в партии заготовок на основе статистического моделирования Монте-Карло. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оптимальной наладке суперфинишного станка.

Бесцентровое суперфиниширование, обеспечение точности базирования деталей, оптимальная наладка оборудования.

B.M. Brzhozovsky, O.V. Zakharov, A.F. Balaev

MECHANISM OF INACCURACY FORMATION OF DETAILS' FORM IN PARTIES AT CENTERLESS SUPERFINISHING

A geometrical mechanism of details forms' errors is considered at centerless superfinishing. The methodology of the provision of accuracy in a batch of details is offered on the basis of Monte Carlo statistical modeling. Theoretical and experimental researches results on optimum adjustment of superfinishing machine tool are given.

Centerless superfinishing, provision to accuracy of the details bearing, optimum adjustment of the equipment.

Бесцентровое суперфиниширование – один из наиболее эффективных методов окончательной обработки наружных поверхностей деталей в виде тел вращения, эксплуатируемых в условиях трения качения под действием циклических нагрузок. К таким деталям относят ролики и кольца подшипников, плунжеры, распределительные валы и т.д. Очевидные преимущества данного метода заключаются в снижении шероховатости и геометрических отклонений формы заготовок. Особенность бесцентрового суперфиниширования состоит в базировании обрабатываемой заготовки на непрерывно вращающихся в процессе обработки валках. При этом происходит перенос отклонений формы, полученных на предыдущих операциях, на обрабатываемую поверхность и формирование новых из-за погрешностей базирования.

Практический опыт эксплуатации бесцентровых суперфинишных станков указывает на то, что процесс формообразования управляем за счет геометрической

наладки, но теоретические основы для этого недостаточно разработаны. Математическая модель базирования при бесцентровом суперфинишировании рассмотрена в работе [1]. Однако наличие некоторых упрощений при постановке задачи привело к погрешности расчета. Кроме того, отсутствие адекватного критерия для оценки погрешности базирования и соответственно отклонений формы заготовок не позволило получить практические рекомендации по оптимальной наладке станков.

Приведенные факты говорят о том, что целесообразно пересмотреть теоретические аспекты формообразования поперечного сечения заготовок при бесцентровом суперфинишировании, в том числе исследовать точность обработки в партии заготовок с помощью статистического моделирования Монте-Карло.

Рассмотрим схему базирования заготовки на валках в процессе бесцентрового суперфиниширования (рис. 1). Центр заготовки O в ее требуемом положении может быть определен радиусом r и углами контакта α_1 и α_2 соответственно с левым и правым валками, найденными из решения задачи расчета формообразующей траектории [2].

Профиль поперечного сечения заготовки с отклонениями формы может быть описан тригонометрическим полиномом:

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{n=2}^p a_n \sin(n\varphi - \varphi_n), \quad (1)$$

где r_0 – радиус номинальной окружности профиля заготовки; n – круговая частота или порядок гармоники; a_n – амплитуда n -й гармоники; φ – угловой параметр; φ_n – начальная фаза n -й гармоники; p – максимальное число гармоник.

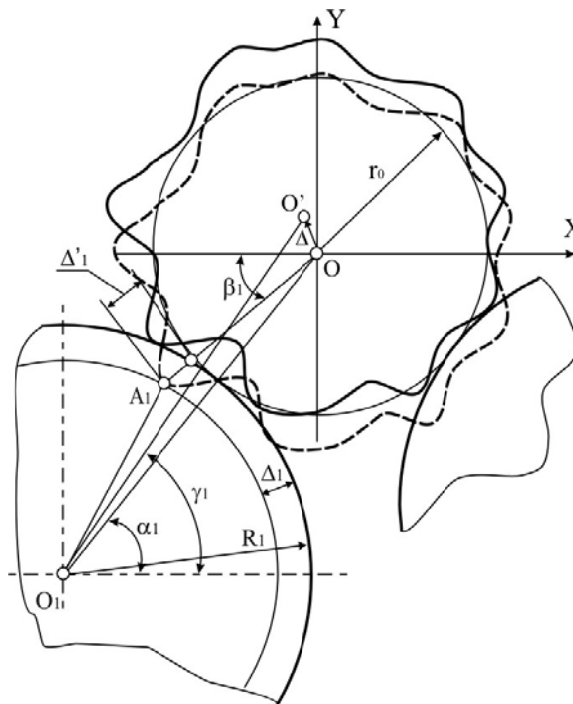


Рис. 1. Расчетная схема для определения смещения центра заготовки Δ

Поперечный профиль левого валка представим окружностью в полярной системе координат с помощью радиуса-вектора \vec{r}_1 , который может быть определен из геометрических соотношений как одна из сторон треугольника O_1OA_1 :

$$r_1^2 - 2r_1(R_1 + r_0) \cos(\beta_1 - \alpha_1) + r_0(r_0 + 2R_1) = 0, \quad (2)$$

где R_1 – радиус валка; r_1 – радиус-вектор, описывающий окружность валка в полярной системе координат; β_1 – угол, определяющий положение наиболее удалённой от центра заготовки точки профиля.

Уравнение (2) имеет два решения, соответствующих наиболее приближенной и удалённой точкам, проходящим через одну прямую. Согласно геометрическому смыслу, выбираем решение с наименьшим значением r_1 :

$$r_1 = (R_1 + r_0) \cos(\beta_1 - \alpha_1) - \sqrt{(R_1 + r_0)^2 \cos^2(\beta_1 - \alpha_1) - r_0(r_0 + 2R_1)}. \quad (3)$$

Для правого валка выражения (1) и (2) записываются аналогичным образом с заменой индексов 1 на 2.

Определим точки контакта заготовки с валками, поместив ее в номинальное положение. Очевидно, что искомыми будут те точки на профиле заготовки, которые или наиболее близко расположены к опоре (имеется зазор), или в наибольшей степени стремятся внедриться в опору (создается натяг). Установим зазор (натяг), выраженный модулем Δ' и полярным углом β , на основе минимизации функционала:

$$\left. \begin{aligned} \Delta'_1(\beta_1) &= \{r(\beta_1 + 180^\circ) - r_1(\beta_1)\} \rightarrow \max \\ \Delta'_2(\beta_2) &= \{r(360^\circ - \beta_2) - r_2(\beta_2)\} \rightarrow \max \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Проекцию Δ_1' на направление угла α_1 находим из решения треугольника O_1OA_1 :

$$(R_1 - \Delta_1)^2 = r_1^2 + (R_1 + r_0)^2 - 2r_1(R_1 + r_0) \cos(\beta_1 - \alpha_1),$$

откуда

$$\Delta_1 = R_1 - \sqrt{r_1^2 + (R_1 + r_0)^2 - 2r_1(R_1 + r_0) \cos(\beta_1 - \alpha_1)}. \quad (5)$$

Положение центра левого валка в проекциях на оси X и Y системы координат XOY соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} X_{O_1} &= -(R_1 + r_0) \cos \alpha_1 \\ Y_{O_1} &= -(R_1 + r_0) \sin \alpha_1 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

После смещения центра заготовки на Δ расстояние между этим центром и центрами валков станет равно $O_1O' = R_1 + r_0 + \Delta_1$ и $O_2O' = R_2 + r_0 + \Delta_2$ для левого и правого валков соответственно.

Перемещение центра заготовки в точку O' может быть представлено как последовательное перекачивание заготовки по правому и левому валкам. Центр заготовки при перекачивании её по левому валку будет совершать движение по дуге окружности с радиусом O_1O' и при перекачивании заготовки по правому валку по дуге окружности с радиусом O_2O' . Точка пересечения дуговых траекторий будет новым положением центра заготовки. Положение этого центра определяется углами наклона γ_1 и γ_2 соответствующих векторов O_1O' и O_2O' к оси OX . Разность проекций радиусов-векторов положения центра валка в системе координат XOY и положения нового центра O' заготовки относительно центра валка O_1 (для левого) и O_2 (для правого) равно проекции смещения детали Δ на соответствующие оси координат:

$$\left. \begin{aligned} -(R_1 + r_0) \cos \alpha_1 + (R_1 + r_0 + \Delta_1) \cos \gamma_1 &= (R_2 + r_0) \cos \alpha_2 - (R_2 + r_0 + \Delta_2) \cos \gamma_2 \\ -(R_1 + r_0) \sin \alpha_1 + (R_1 + r_0 + \Delta_1) \sin \gamma_1 &= -(R_2 + r_0) \sin \alpha_2 + (R_2 + r_0 + \Delta_2) \sin \gamma_2 \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Проведя преобразования системы (7), получим выражения для расчёта величины смещения $OO' = \Delta$ центра O' заготовки:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 = \arccos \left[\frac{-ac - \sqrt{(ac)^2 - (c^2 - b^2)(a^2 + b^2)}}{2(a^2 + b^2)} \right] \\ \Delta = \sqrt{[(R_1 + r_0 + \Delta_1) \cos \gamma_1 - (R_1 + r_0) \cos \alpha_1]^2 + [(R_1 + r_0 + \Delta_1) \sin \gamma_1 - (R_1 + r_0) \sin \alpha_1]^2} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $a = (R_2 + r_0) \cos \alpha_2 + (R_1 + r_0) \cos \alpha_1$; $b = (R_2 + r_0) \sin \alpha_2 - (R_1 + r_0) \sin \alpha_1$;

$$c = \frac{(R_2 + r_0 + \Delta_2)^2 - (a^2 + b^2) - (R_1 + r_0 + \Delta_1)^2}{2(R_1 + r_0 + \Delta_1)}.$$

Выражение (8) позволяет определить смещение заготовки Δ в конкретном её положении, заданном значением начальной фазы φ . При непрерывном вращении заготовка последовательно занимает множество положений, и для оценки точности базирования может быть применен критерий в виде среднего арифметического радиусов траектории центра заготовки за полный оборот [3]:

$$K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta(\varphi_i), \quad (9)$$

где φ_i – угол поворота заготовки при вращении; i – число расчетных точек траектории, или последовательных положений заготовки.

Для расчёта положения центра заготовки, повернутой на угол $\Delta\varphi$ относительно исходного положения, в выражение (1) вносится дополнение:

$$r(\varphi + \Delta\varphi) = r_0 + \sum_{n=2}^p a_n \sin(n(\varphi + \Delta\varphi) - \varphi_n).$$

Соответственно для моделирования процесса вращения заготовки $\Delta\varphi$ будет дискретно изменяться в зависимости от числа последовательных положений k за один оборот.

При вращении заготовки с реальным профилем радиус-вектор смещения центра $\bar{\Delta}$ будет описывать некоторый контур. При этом траекторией движения каждой точки профиля будет кривая, конгруэнтная траектории центра с учетом радиуса r_0 . Таким образом, поперечный профиль заготовки, формируемый в процессе суперфиниширования, определяется формой траектории центра O' . Для построения графика траектории центра заготовки число точек k следует брать наибольшим (ограничение обусловлено лишь производительностью вычислительной машины) кратным порядку полинома, в противном случае происходит перекося графика полученной траектории относительно реальной, что практически не влияет на величину коэффициента базирования.

Из рис. 1 видно, что форма траектории центра может зависеть от суммарного угла $\alpha_\Sigma = \alpha_1 + \alpha_2$, а положение этой кривой относительно полярной системы координат – от отдельных значений α_1 и α_2 , поэтому для удобства примем $\alpha_1 = \alpha_2$ при начальных фазах гармоник, равных нулю ($\varphi = 0$).

Для анализа изменений величины K (рис. 2) и формы траектории центра заготовки (рис. 3) в зависимости от суммарного угла контакта по представленной модели были проведены численные эксперименты. При этом расчеты проводились для гармоник со 2-й по 5-ю, полагая значения всех амплитуд гармоник равными 1 мкм. Первая гармоника не рассматривалась, поскольку она характеризует эксцентриситет, обусловленный точностью установки заготовки в измерительном приборе.

Выбор диапазона варьирования значений угла $\alpha_\Sigma = 60^\circ$ при базировании обусловлен кинематическими, силовыми и конструктивными ограничениями при наладке станка [4]. Минимальное значение угла α_Σ ($\alpha_\Sigma = 20^\circ$ для 2-й гармоники; $\alpha_\Sigma = 15^\circ$ для 4-й гармоники; $\alpha_\Sigma = 10^\circ$ для 3-й и 5-й гармоник) принято из условия, что при меньших значениях происходит выпадение заготовки между валками.

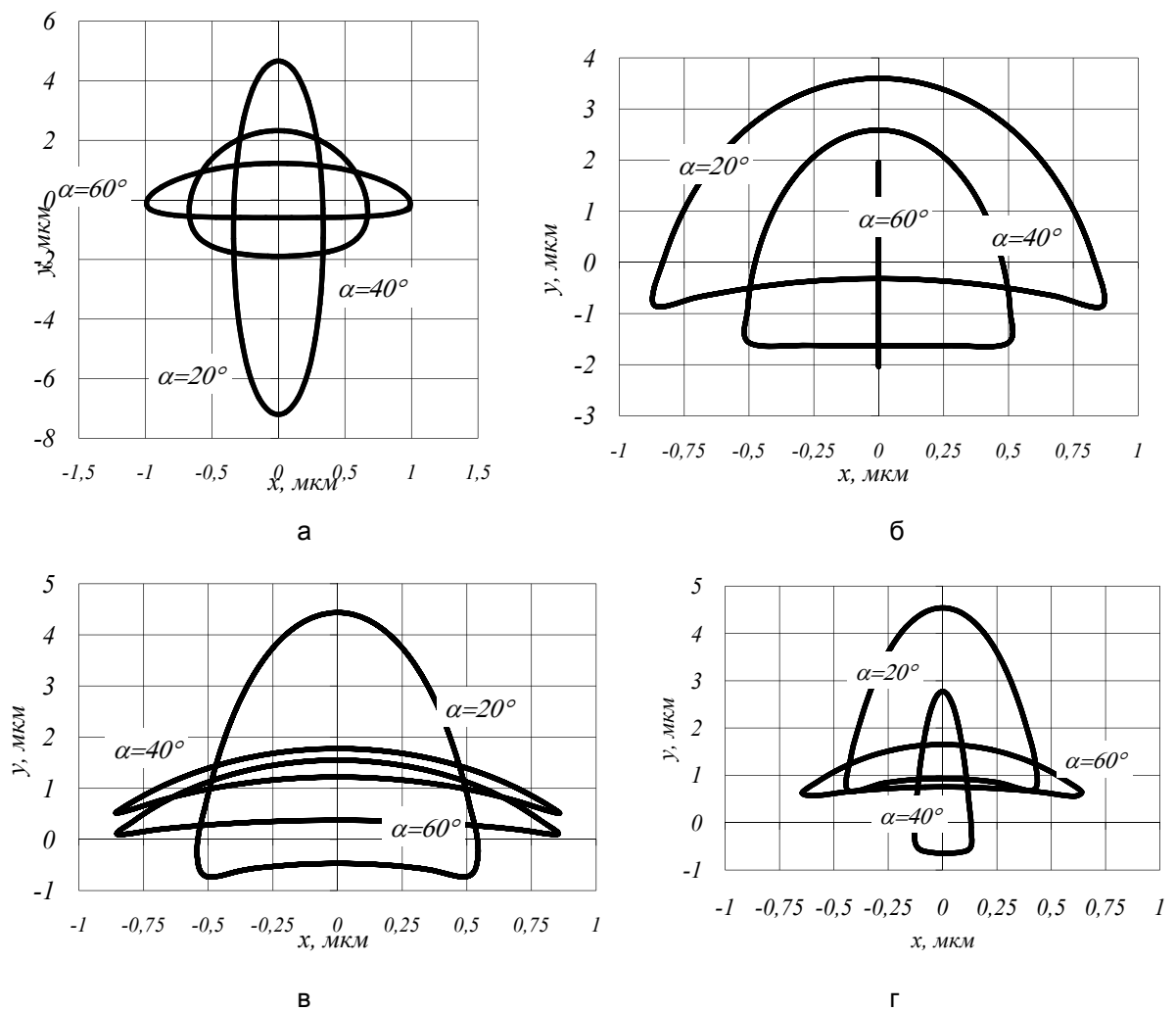


Рис. 2. Траектории движения центра заготовки:
 а – вторая гармоника; б – третья гармоника; в – четвертая гармоника; г – пятая гармоника

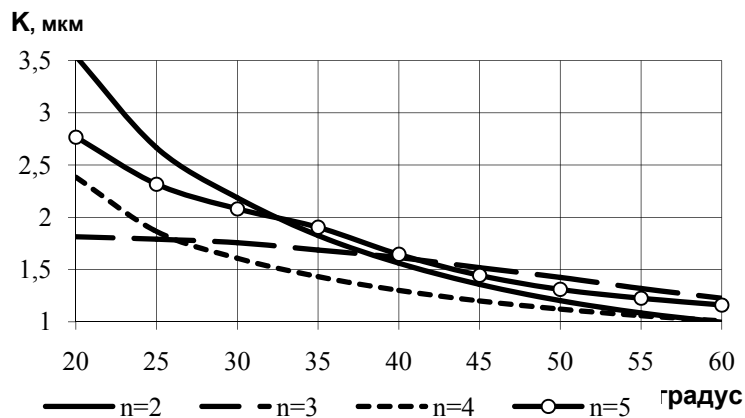


Рис. 3. Зависимость критерия K от суммарного угла контакта α

Проведенные расчеты позволили установить, что траектории движения центра заготовки имеют симметричный вид относительно вертикальной оси OY . В силу периодичности отклонений, полученные траектории центра, при полном обороте заготовки повторяются число раз, равное номеру рассматриваемой гармоника. С изменением суммарного угла происходит вытягивание формы траектории вдоль одной из осей, в частности при увеличении α_{Σ} для 2-, 4-, 5-й гармоник происходит вытягивание

кривой вдоль горизонтальной оси OX , для 3-й гармоники – вытягивание кривой вдоль вертикальной оси OY .

Для большинства гармоник при различных параметрах наладки преобладают траектории овальной и трехгранной формы, что подтверждается данными производственных исследований – для всей партии заготовок, прошедших суперфинишную обработку, наблюдаются только три первых гармоники, остальные гармоники наблюдаются менее чем в половине объема партии. Кроме того, это наблюдение позволяет сделать предположение о независимости числа граней заготовки после обработки (овальность, трехгранность) от номера порядка исходных гармоник, преобладающих в профиле заготовки до обработки. В то же время анализ формы траектории и углов контакта не позволил выявить между ними явной связи.

Исследование критерия K показало, что для 2-, 3-, 4-, 5-й гармоник оптимальным углом наладки в диапазоне $\alpha = 10-60^\circ$ является максимальное значение 60° . Для приведенных примеров при $\alpha = 10-60^\circ$ значение критерия K изменяется от 1,0 до 4,5. Для рассчитанного диапазона наладок критерий K принимает значения только больше единицы, что говорит о копировании погрешностей базовой поверхности и наличии тенденции к созданию новых погрешностей. При уменьшении отношения радиусов валков и заготовки наблюдается некоторое уменьшение критерия K .

При оптимизации процесса бесцентрового суперфиниширования по критерию точности микробазирования следует учитывать геометрические, кинематические и силовые ограничения [3, 4]. Геометрические ограничения накладываются исходя из расчета профиля валков на этапе профилирования или расчета формообразующей траектории при наладке станка. Ограничения по силовым параметрам имеют нелинейный характер и выявляются при решении задачи силового замыкания контакта. Область работоспособности в координатах углов α_1, α_2 контакта заготовки с валками приведена на рис. 4, где показаны: 1 – геометрические, 2 – кинематические, 3 – силовые ограничения.

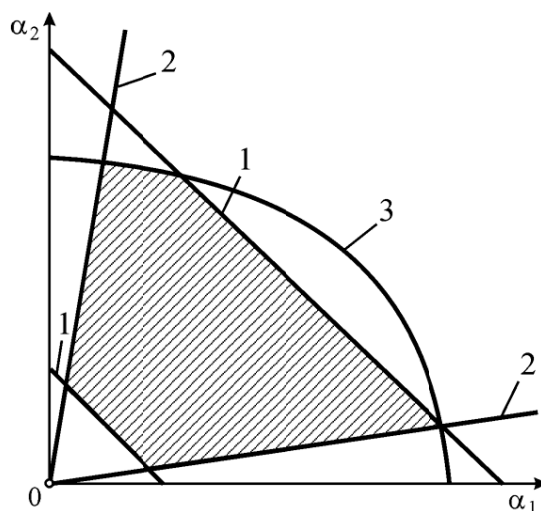


Рис. 4. Область работоспособности углов α_1, α_2 контакта заготовки с валками

Налаживать бесцентровые шлифовальные и суперфинишные станки на обработку одной конкретной заготовки нецелесообразно, а в партии отклонения формы заготовок имеют стохастический характер. Выявить одну доминирующую гармонику не всегда возможно, так как обычно имеются несколько гармоник со сравнительно большими амплитудами. Кроме того, наличие случайных начальных фаз и корреляционных связей между амплитудами гармоник существенным образом усложняет задачу.

Для решения подобных задач предназначен метод статистического моделирования, также называемый методом статистических испытаний Монте-Карло [5]. Он базируется

на применении случайных чисел некоторой случайной величины с заданным распределением вероятности. Сущность метода статистического моделирования сводится к построению моделирующего алгоритма, его реализации с помощью программно-технических средств ЭВМ и обработке данных методами математической статистики.

Применительно к задаче базирования основная идея метода Монте-Карло заключается в моделировании стохастических входных данных (отклонений формы заготовок), многократной реализации аналитической модели базирования и получении вероятностных характеристик, численные значения которых совпадают с результатом решения детерминированной задачи. В результате получают серию частных значений искомой погрешности базирования, статистическая обработка которых дает сведения о влиянии параметров наладки станка при обработке партии заготовок. Исходные данные о погрешностях формы заготовок получают экспериментальным путем, а законы и параметры распределения рассчитывают по формулам математической статистики. Если количество реализаций достаточно велико, то полученные результаты моделирования приобретают статистическую устойчивость и с достаточной точностью принимаются в виде оценок искомых параметров.

Исходными данными при моделировании являются параметры заготовки (радиус r_0 , число n гармоник, параметры распределения и границы интервала изменения амплитуд и начальных фаз гармоник), параметры наладки станка (углы базирующих элементов α_1 , α_2 , радиусы валков R_1 , R_2) и количество m заготовок в партии. Число m заготовок в партии назначают, исходя из трудоемкости моделирования, а не из реального технологического процесса. Очевидно, что с увеличением числа реализаций m возрастают точность и достоверность получаемых статистических оценок.

Для формирования базы данных по законам и параметрам распределения отклонений формы заготовок в партиях были проведены экспериментальные исследования в условиях ОАО «Саратовский подшипниковый завод». Объектами исследования служили партии роликов подшипников, обработанные на бесцентровых шлифовальных станках мод. SASL-200×500 и затем на суперфинишных станках мод. SZZ-3. В ходе экспериментов подтверждена склонность методов бесцентровой абразивной обработки к геометрическому наследованию погрешностей формы. Проведенные исследования выявили, что амплитуды a гармоник распределены по закону Пирсона первого типа, а начальные фазы φ – по закону равной вероятности.

С учетом экспериментальных данных проведено моделирование критерия точности базирования для партии из 200 заготовок для бесцентрового суперфиниширования. Статистическая обработка результатов показала, что наилучшим образом критерий K описывается нормальным законом. Функция плотности вероятности однозначно определена двумя параметрами – математическим ожиданием m и среднеквадратическим отклонением σ . Графики плотности вероятности f для трех рассчитанных вариантов наладки изображены на рис. 5.

Обработка результатов статистического моделирования представлена в таблице. Рассчитаны первые четыре статистических момента (m_1 , m_2 , m_3 , m_4), среднеквадратическое отклонение σ , показатели асимметрии α_3 и эксцесса α_4 для распределения критерия K .

Начальные моменты распределения критерия K в партии заготовок

α_2	m_1	m_2	σ	m_3	α_3	m_4	α_4
15	1,400	0,123	0,351	0,012	0,277	0,043	2,858
30	0,809	0,049	0,221	0,004	0,007	0,393	2,790
45	0,603	0,020	0,141	0,001	0,001	0,306	3,154

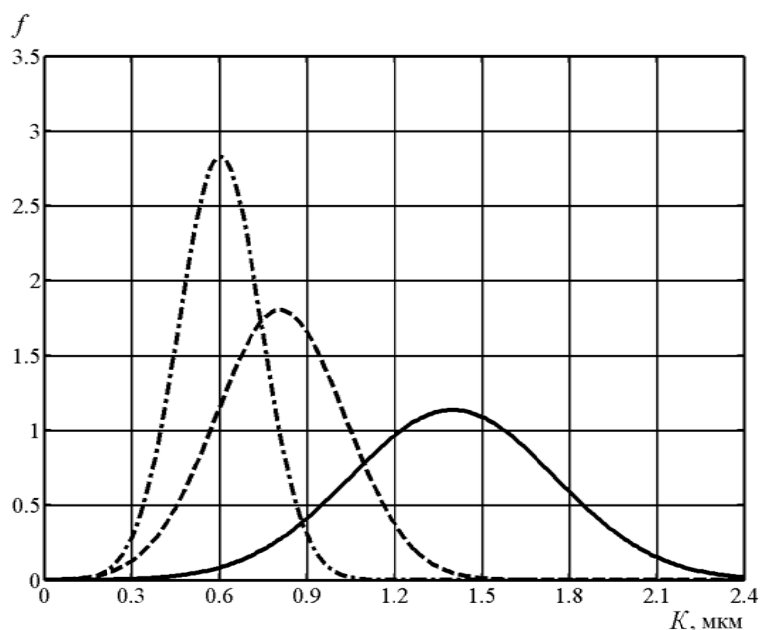


Рис. 5. Плотность вероятности критерия K в зависимости от наладки станка: сплошная линия – $\alpha_{\Sigma} = 15^{\circ}$; штриховая – $\alpha_{\Sigma} = 30^{\circ}$; штрихпунктирная – $\alpha_{\Sigma} = 45^{\circ}$

Анализ таблицы показал, что все варианты наладки характеризуются положительным показателем асимметрии и показателем эксцесса, равным трем и более. При бесцентровом суперфинишировании наиболее нерациональный угол $\alpha_{\Sigma} = 15^{\circ}$ (математическое ожидание погрешности базирования равно 1,4 мкм и среднее квадратическое отклонение 0,351 мкм). При наилучшем угле наладки $\alpha_{\Sigma} = 45^{\circ}$ среднее арифметическое отклонение уменьшается примерно в 2,3 раза и среднее квадратическое отклонение – в 2,5 раза. Столь большие различия статистических оценок критерия K объясняются тем, что оптимальный вариант наладки находится вне исследуемого диапазона угла $\alpha_{\Sigma} = 15 \dots 45^{\circ}$. При наличии ограничений на максимальное значение угла α_{Σ} уменьшение среднего арифметического и среднего квадратического отклонений составит 50%.

Сравнение оценок математического ожидания для критерия базирования с величиной отклонения от круглости показало, что оптимальные варианты наладки суперфинишного станка способствуют активному исправлению профиля поперечного сечения. Кроме того, наименьшему математическому ожиданию также соответствует наименьшее среднее квадратическое отклонение.

Таким образом, разработанные математические модели позволили выявить основные закономерности формирования отклонений формы заготовок вследствие погрешностей базирования при бесцентровом суперфинишировании, а предложенная методика оптимальной наладки станка – обеспечить точность обработки в партии заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров О.В. Математическая модель базирования при бесцентровом суперфинишировании / О.В. Захаров, А.Ф. Балаев // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2004. С. 55-59.
2. Захаров О.В. Обобщенная геометро-аналитическая модель для расчета формообразующей траектории при бесцентровом суперфинишировании / О.В. Захаров, Б.М. Бржозовский, А.Ф. Балаев // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 10. С. 11-15.
3. Захаров О.В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке / О.В. Захаров. Саратов: СГТУ, 2006. 152 с.

4. Бржозовский Б.М. Кинематические и силовые аспекты бесцентрового суперфиниширования / Б.М. Бржозовский, О.В. Захаров, А.Ф. Балаев // СТИН. 2006. № 11. С. 2-5.

5. Обеспечение точности обработки партии заготовок при бесцентровой абразивной обработке на основе статистического моделирования Монте-Карло / О.В. Захаров, Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4. Вып. 1. С. 12-17.

Бржозовский Борис Максович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета

Brzhozovskiy Boris Maksovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Designing and Computer Modeling of Technological Equipment in Machine and Instrument Building» of Saratov State Technical University

Захаров Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета

Zakharov Oleg Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Designing and Computer Modeling of Technological Equipment in Machine and Instrument Building» of Saratov State Technical University

Балаев Андрей Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета

Balayev Andrey Fyodorovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Designing and Computer Modeling of Technological Equipment in Machine and Instrument Building» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.10.09, принята к опубликованию 25.03.10