

DOI: 10.12737/24493

Дуганов В.Я., канд. техн. наук, доц.,
Сумской А.М., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ИХ ДЕФОРМАЦИИ

sumskoiam@yandex.ru

На современном этапе производства изделий машиностроения одним из главных конкурентоспособных преимуществ является показатель точности. С развитием современных технологий и внедрением их в производство требуется повышение уровня точности деталей и изделий в целом. Для кинематически не полных станков, базирующихся непосредственно на обрабатываемом изделии, возникают дополнительные погрешности, связанные с условиями эксплуатации этих станков и с особенностями обработки изделий.

В данной статье рассмотрены методы определения погрешностей вызванных деформацией деталей в связи с действиями гравитационных сил, что является важным фактором, влияющим на точность обработки крупногабаритных изделий. Это позволяет решить задачу динамической наладки бесцентрово-шлифовальных станков, что сводится к отысканию граничных значений частоты возмущающего воздействия, при которых коэффициенты формообразования имеют наибольшие положительные значения для заданного ряда гармонических погрешностей.

Ключевые слова: повышение точности, крупногабаритная бесцентровая обработка, обработка колец.

Введение. Технологическое обеспечение качества поверхности является одной из наиболее важных задач процесса изготовления изделия [1]. Увеличение конкуренции, вызванное развитием технологий и повсеместным внедрением их в производства, требует ответных действий, связанных не только с экономическими показателями обработки, но и с повышением уровня точности детали и улучшению изделия в целом. Все это приводит к возникновению задач, связанных с появлением новых, ранее не учтенных факторов, препятствующих обеспечению заданных параметров точности. На точность обработки изделий оказывает влияние большое число факторов, которые возникают во время движения режущей кромки инструмента по обрабатываемой поверхности, выполняемому в соответствии с кинематикой станка. В следствии несовпадения реальных движений заготовки и инструмента, движениям предусмотренной кинематической схемой станка, возникает погрешность обработки. При установке обрабатываемой детали на металлорежущее оборудование могут возникать различного рода погрешности установки. В состав такой погрешности входит: погрешность закрепления, погрешность приспособления (поверхностей, которые прилегают к закрепленной заготовке) и погрешность базирования. Для кинематически не полных станков, базирующихся непосредственно на обрабатываемом изделии, могут возникать дополнительные погрешности, связанные с условиями эксплуатации этих станков и с особенностями обработки изделий. Для крупногабаритных де-

талей с недостаточной жесткостью возможно дополнительное возникновение погрешностей из-за деформации самих деталей под действием гравитационных сил. При бесцентровой обработке деталей важное значение для получения требуемой точности имеет геометрическая настройка станка. Часто, геометрически правильно налаженный станок дает неудовлетворительные результаты по круглости. Это объясняется особенностями процесса бесцентрового шлифования, которые заключаются в том, что отсутствует жесткая кинематическая связь детали с базирующими элементами станка и инструментом, образующими упругую рабочую схему станка [2].

Нормальное протекание процесса бесцентровой обработки обеспечивается непрерывным силовым прижатием детали к базирующим элементам. Базирование осуществляется по обрабатываемой поверхности и деталь имеет несколько степеней свободы. При возникновении возмущающих сил, например, из-за огранности заготовки, биения кругов, внешних источников и т.п., изменяется относительное положение детали и элементов упругой системы станка, деталь смещается в направлении возможных перемещений. Это приводит к изменению воздействия упругой системы на рабочие процессы.

Существенное влияние оказывают динамические факторы на точность обработки. На первоначальных этапах наладки станков рекомендуется определить зоны и запас устойчивости для оптимальных геометрических наладок с помощью построения амплитудно-фазово-

частотных характеристик (АФЧХ) динамической системы [3]. Эти исследования дают возможность определить в первом приближении частоту вращения детали при шлифовании, на которой процесс обработки будет способствовать уменьшению амплитуды огранности.

Задача динамической наладки бесцентрово-шлифовальных станков сводится к отысканию граничных значений частоты возмущающего воздействия, при которых коэффициенты формообразования имеют наибольшие положительные значения для заданного ряда гармонических погрешностей.

Методология. Изменение геометрии взаимного расположения опорных узлов и режущего инструмента определяется с учетом деформирования обрабатываемого кольца, которое в свою очередь может быть определено методом сопротивления материалов теоретической механики.

Основная часть. Бандаж цементной печи, имеющий отношение толщины стенки к наружному диаметру, равное 1:15, может быть рассмотрен как плоское тонкостенное кольцо, установленное в вертикальной плоскости на двух роликоопорах. Расчетная схема такого кольца изображена на рис. 1, причем собственный вес бандажа рассмотрен как распределенная по окружности нагрузка.

Под действием гравитационных сил кольцо деформируется - его точки смещаются от первоначального положения на окружности радиуса R.

Плоские замкнутые кольца, как известно, являются трижды статически неопределимыми системами. Для перехода к статически определимой (основной) системе разрежем кольцо по оси OY в нижней его части (рис. 2.). В силу симметрии кольца и внешней нагрузки, поперечные силы в этом сечении равны нулю, следовательно, лишними внутренними усилиями в нем будут изгибающий момент M_{x1} и продольная сила X_2 . Вместо кольца рассмотрим только одну его половину.

Канонические уравнения метода сил для рассматриваемой системы имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + \delta_{1p} &= 0 \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \delta_{2p} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$M_\varphi(\varphi) = qR^2 \int_n^\varphi (\varphi \sin \varphi - \sin \psi) d\psi = qR^2 (\varphi \sin \varphi + \cos \varphi - 1) \quad (4)$$

Величины опорных реакций N и G определяются весом кольца и углом расположения роликоопор 2α :

где δ_{ik} – перемещение в направлении X_i , вызываемое единичной силой, приложенной к рассматриваемой точке в направлении X_k ; δ_{ip} – перемещение точки в направлении X_i , вызываемое всеми действующими на кольцо силами.

Интенсивность действующих на кольцо сил тяжести равна весу его элемента единичной длины:

$$q = \frac{\rho q b \cdot \pi(D_2^2 - D_1^2)}{4\pi \cdot \frac{D_2^2 + D_1^2}{2}} = \pi q F \quad (2)$$

где $F = b \times h$ – площадь поперечного сечения кольца; D_1 и D_2 – внутренний и внешний диаметры кольца.

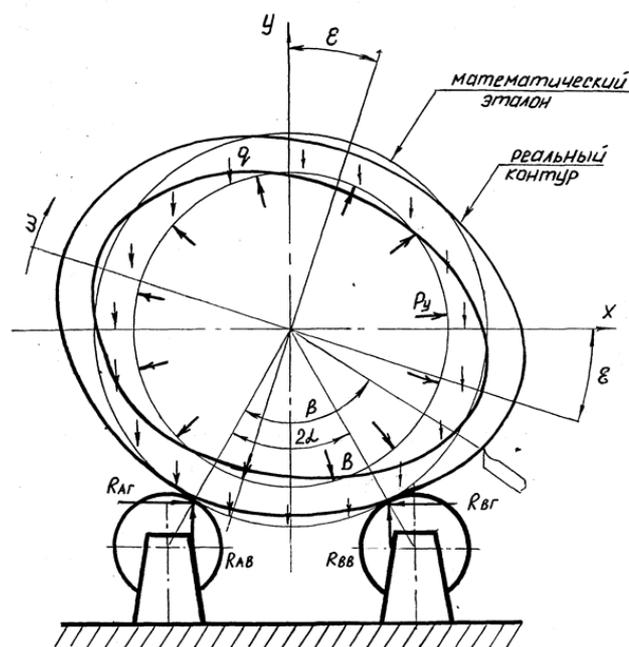


Рис. 1. Расчетная схема обработки деформированного бандажа

Найдем теперь изгибающий момент в произвольном поперечном сечении, определяемом углом φ от нагрузки q . Так как сила тяжести, действующая на элемент дуги ds геометрической оси стенки кольца dr , то элементарный изгибающий момент от неё в сечении с углом φ равен:

$$dM = dP(\sin \varphi - \sin \psi) = qR^2 (\varphi \sin \varphi - \sin \psi) d\psi \quad (3)$$

Изгибающий момент в том же сечении от всех сил тяжести, действующих на дугу с центральным углом 2α , найдем интегрированием:

$$N = \pi R q, \quad G = \pi R q \cdot \text{tg} 2\alpha \quad (5)$$

В основной системе координат горизонтальные реакции опор u уравниваются силами Q , приложенными к краям разреза:

$$Q = \frac{G}{2}(1 + \cos \alpha) \quad (6)$$

Изгибающие моменты опорных реакций определяются выражениями:

$$M_G(\varphi) = \begin{cases} \frac{\pi R^2 q \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} (1 + \cos \alpha)(1 - \cos \varphi); 0 < \varphi \leq \alpha \\ \frac{\pi R^2 q \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} (1 - \cos \alpha)(1 + \cos \varphi); \alpha < \varphi \leq \pi \end{cases} \quad (7)$$

$$M_N(\varphi) = \begin{cases} 0; 0 < \varphi \leq \alpha \\ \pi R^2 q (\sin \alpha - \cos \varphi); \alpha < \varphi \leq \pi \end{cases} \quad (8)$$

Изгибающие моменты от единичных нагрузок $X_1 = 1$ и $X_2 = 1$ приложенных в сечении А имеют значения:

$$\bar{M}_1 = 1; \bar{M}_2 = R(1 - \cos \varphi) \quad (9)$$

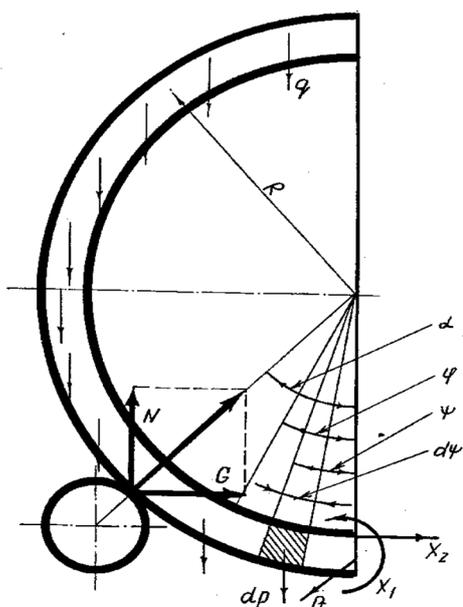


Рис. 2. Схема расчета перемещений кольца при деформации

Найдем теперь перемещения, вызываемые действием единичных нагрузок:

$$M(\varphi) = \begin{cases} qR^2 \cdot (\varphi \sin \varphi + (0.5 - \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha + \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \cos \varphi + \frac{1}{\cos \alpha}); 0 < \varphi \leq \alpha \\ qR^2 \cdot (\varphi \sin \varphi - \pi \cdot \sin \varphi + (0.5 + \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \cos \varphi + \frac{1}{\cos \alpha}); \alpha < \varphi < \pi \end{cases} \quad (17)$$

Найдем теперь вертикальное перемещение нижней точки кольца (точки А). Для этого прикладываем к точке А единичную силу, направленную вертикально вниз (рис. 3).

С помощью соотношения (16) можно рассчитать также изгибающий момент M_1 от рас-

$$\delta_{11} = \frac{R}{Ej} \int_0^\pi \bar{M}_1^2 d\varphi = \frac{R}{Ej} \int_0^\pi d\varphi = \frac{\pi R}{Ej}$$

$$\delta_{22} = \frac{R}{Ej} \int_0^\pi \bar{M}_2^2 d\varphi = \frac{R^3}{Ej} \int_0^\pi (1 - \cos \varphi)^2 d\varphi = \frac{3\pi R^3}{2Ej} \quad (10)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{R}{Ej} \int_0^\pi \bar{M}_1 \cdot \bar{M}_2 d\varphi = \frac{R^2}{Ej} \int_0^\pi (1 - \cos \varphi) d\varphi = \frac{\pi R^2}{Ej}$$

Далее имеем:

$$\delta_{1p} = \frac{R}{Ej} \int_0^\pi M_p \bar{M}_1 d\varphi = \frac{R}{Ej} \int_0^\pi M_p$$

$$\delta_{2p} = \frac{R}{Ej} \int_0^\pi M_p \bar{M}_2 d\varphi = \frac{R^2}{Ej} \int_0^\pi M_p (1 - \cos \varphi) d\varphi \quad (11)$$

где:

$$M_p(\varphi) = M_q(\varphi) = M_G(\varphi) = M_N(\varphi) \quad (12)$$

Подставив выражения (10) и (11) в канонические уравнения метода сил, найдем:

$$x_1 + Rx_2 = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi M_p d\varphi$$

$$x_1 + \frac{3}{2} Rx_2 = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi M_p (1 - \cos \varphi) d\varphi \quad (13)$$

Решив систему уравнений (13) получим

$$x_1 = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi M_p d\varphi - \frac{2}{\pi} \int_0^\pi M_p \cos \varphi d\varphi$$

$$x_2 = \frac{2}{\pi R} \int_0^\pi M_p \cos \varphi d\varphi \quad (14)$$

Изгибающий момент в сечении 1-1 имеет вид:

$$M(\varphi) = M_p(\varphi) + x_1 + x_2 R(1 - \cos \varphi) \quad (15)$$

или с учетом выражения (14)

$$M(\varphi) = M_p(\varphi) - \frac{2 \cos \varphi}{\pi} \int_0^\pi M_p(\varphi) \cos \varphi d\varphi - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi M_p(\varphi) d\varphi \quad (16)$$

Подставив в соотношение (16) выражения (4), (7), (8), (12) и выполнив интегрирование, найдем:

сма триваемой единичной нагрузки и в неразрезанном кольце. Однако, для отыскания перемещений в симметрично нагруженных кольцах в интегралах Мора вместо $\bar{M}(\varphi)$ можно использовать изгибающий момент в основной системе

$M_1(\varphi)$, что существенно сокращает объем вычислений. Поэтому для перемещения точки А имеем:

$$\Delta y = \frac{2R}{Ej} \int_0^\pi M(\varphi)M_1(\varphi)\varphi d\varphi = \frac{qR^4}{Ej} \int_0^\alpha \left[\varphi \cdot \sin \varphi + (0.5 + (\alpha - \pi) \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \cos \varphi + \frac{1}{\cos \alpha} \right] \cdot \sin \varphi d\varphi + \frac{qR^4}{Ej} \int_\alpha^\pi \left[\varphi \cdot \sin \varphi + (0.5 + \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \cos \varphi - \pi \cdot \sin \varphi + \frac{1}{\cos \alpha} \right] \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \varphi d\varphi \quad (18)$$

Выполнив интегрирование, получим:

$$\Delta y = \frac{qR^4}{Ej} \left[\frac{\alpha^2}{4} - \frac{7}{8} + \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{\alpha \cdot \sin 2\alpha}{4} - \frac{\cos 2\alpha}{8} + (0.5 + \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot (\pi - \alpha) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2} - \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{\pi}{4} + \operatorname{tg} \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{8} - \frac{\alpha \cdot \sin 2\alpha}{4} \right) \right] \quad (19)$$

Относительные перемещения точек А и Б можно выразить так:

$$\frac{\Delta Y}{R} = 12 \frac{\rho gh}{E} \left(\frac{R}{n} \right)^3 \cdot f_1(\alpha) \quad (20)$$

$$\frac{\Delta X}{R} = 12 \rho gh \left(\frac{R}{n} \right)^3 \cdot f_2(\alpha)$$

$$f_1(\alpha) = \frac{\alpha^2}{4} - \frac{7}{8} + \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{\alpha \cdot \sin 2\alpha}{4} - \frac{\cos 2\alpha}{8} + \frac{0.5 + \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} \cdot (\pi - \alpha) \cdot \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{\pi}{4} + \operatorname{tg} \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{8} - \frac{\alpha \cos 2\alpha}{4} \right) \quad (21)$$

$$f_2(\alpha) = \frac{1}{\cos \alpha} - \pi \frac{\cos 2\alpha}{8} - \frac{\pi}{8} - \frac{\pi}{2 \cos \alpha} + \frac{\pi}{2} \cos \alpha - \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} - \frac{\sin \alpha}{2} \right)$$

Графики деформаций $f_1(\alpha)$ и $f_2(\alpha)$ приведены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что для значений угла $\alpha \leq 37^\circ$ нижняя точка кольца (точка А) перемещается вверх, для углов $\alpha > 37^\circ$ – вниз. При $\alpha \approx 37^\circ$ отклонение точки А от окружности равно нулю.

Обоснование коррекции угла установки режущего инструмента в зависимости от деформации бандажа и частоты его вращения

Массивное круглое кольцо, например, бандаж цементной печи, установленное вертикально на роликоопоры, деформируется под действием собственного веса и принимает сложную форму, которая не может быть задана аналитически, а может быть лишь рассчитана численными методами.

Общими (укрупненными) характеристиками формы опертого на роликоопоры кольца является его симметрия относительно вертикальной оси:

$$f_1(\alpha) = \frac{2}{\cos \alpha} - \frac{\pi}{4} (1 + \cos 2\alpha) + \pi \left(\cos \alpha - \frac{1}{\cos \alpha} \right) - \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} - \sin \alpha \right) \quad (26)$$

$$r(\varphi) = r(-\varphi) \quad (22)$$

а также изменение диаметра кольца в направлении оси ОХ и оси ОУ

$$\delta_x = 2 \left(r \left(\varphi = \frac{\pi}{2} \right) - R \right) \quad (23)$$

$$\delta_y = \delta_{y1} + \delta_{y2} \quad (24)$$

где $\delta_{y1} = r(\varphi = \pi) - R$; $\delta_{y2} = r(\varphi = 0) - R$; δ_{y1} и δ_{y2} – смещения верхней и нижней точек кольца; R – радиус математического эталона кольца;

$r(\varphi)$ - радиус деформированного кольца, соответствующий углу φ (рис.4).

Выражения для δ_x и δ_y , найденные выше, имеют вид:

$$\delta_x = \frac{qR^4}{Ej} \cdot f_1(\alpha); \delta_y = \frac{qR^4}{Ej} \cdot f_2(\alpha) \quad (25)$$

где

$$f_2(\alpha) = \frac{\alpha^2}{4} - 0.875 + \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{\alpha \cdot \sin 2\alpha}{4} - \frac{\cos 2\alpha}{8} + (0.5 + \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha)(\pi - \alpha) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2} - \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{\pi}{4} + \operatorname{tg} \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{8} - \frac{\alpha \cos 2\alpha}{4} \right) \quad (27)$$

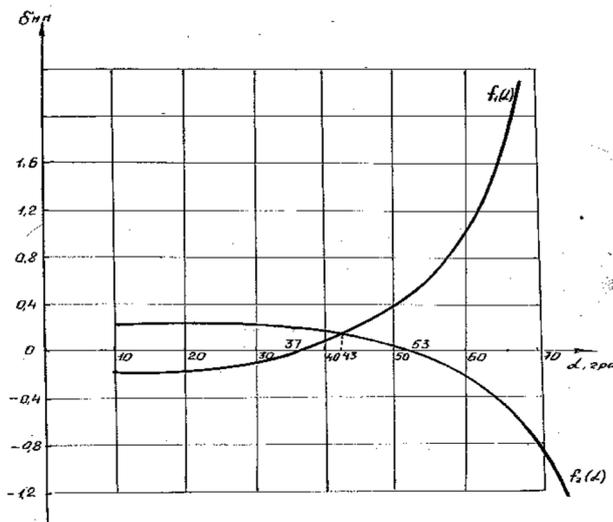


Рис.3. Графики зависимости деформаций кольца от центрального угла базирования

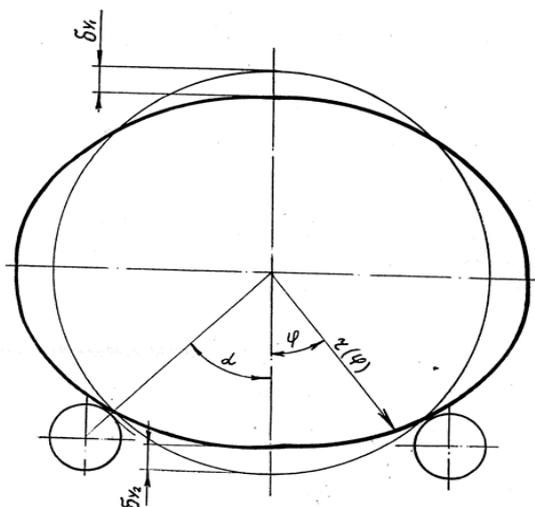


Рис. 4. Схема перемещений при деформировании кольца

Таблица 1.

Значения функций $f_1(\alpha)$ и $f_2(\alpha)$ для некоторых значений угла α

Град	10	15	18	22,5	30	45	60
$f_1(x)$	0,412	0,389	0,372	0,338	0,264	0,024	-0,42
$f_2(x)$	-0,015	-0,027	-0,034	-0,039	-0,033	0,1	0,657

Отметим, что для угла $\alpha = 36,5^0$, $f_2(\alpha) = 0$, т.е. смещение нижней точки кольца отсутствует.

При вращении вертикально установленного кругового кольца правильной идеальной формы никакого углового смещения его осей симметрии не происходит. Если бы упругие деформации кольца происходили мгновенно, то так же мгновенно происходила бы перестройка его формы при вращении и положение оси симметрии так же не изменялось бы. В действительности же ось симметрии деформированного кольца при его вращении отклоняется в сторону вращения на некоторый угол ψ величина которого определяется соотношением скоростей деформирования кольца при его вращении.

Выводы. Для исправления формы деформированного кольца при обработке наружной поверхности резанием необходимо знать величину этого смещения (оси симметрии) для более точной настройки положения режущего инструмента. Корректировка положения режущего инструмента на расчетную величину позволит повысить точность формообразования функционально важной поверхности кольца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пастухов А.Г., Дегтярев Н.М., Минасян

А.Г. Теоретическое обоснование режимов механической обработки шипов упрочненных крестовин // Научное обозрение. 2014. №4. С.215–222.

2. Суслов А.Г. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. - 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2007. 430 с.

3. Дуганов В.Я., Бешевли О.Б. Определение деформации кольца, установленного на опорных роликах под действием гравитационных сил // Ремонт восстановление и модернизация. 2012. №3. С. 25–27.

4. Данилевский В. В. Технология машиностроения. 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1984. 416 с.

5. А.С. № 1630140. Способ бесцентровой обработки крупногабаритных колец / Пелипенко Н.А., Дуганов В.Я. / Оpubл. в 1990.

6. Пастухов А.Г. Методика оценки качества сборочных единиц по функциональным параметрам // Все материалы Энциклопедический справочник. Приложение «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 2014. №3. С. 9–16.

7. Пастухов А.Г., Федоров С.К., Дегтярев Н.М., Жуков Е.М. Экспериментальные исследования влияния режимов ЭМО на эксплуатационные свойства рабочих поверхностей шипов

крестовин // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т.117. С. 100–104.

8. Щетинин Н.А., Рыбалко В.Ю., Мурыгина Л.В., Черняев А.С., Шрубченко И.В. Параметры шероховатости поверхности при ленточном шлифовании // Электронный ресурс. Материалы Международной науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2012.

9. Сумской А.М., Дуганов В.Я. Способ выверки оси вращающейся печи // Электронный ресурс. Материалы Международной науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2016.

10. Лозовая С.Ю., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., Воробьев Н.Д. Повышение эффективности ремонтной обработки опорных узлов крупногабаритных вращающихся агрегатов // Вестник ИрГТУ. 2015. №7. С. 60–66.

11. Спиридонов. А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

12. Банит Ф.Г., Несвижский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М.:

Машиностроение. 1975. 317 с.

13. Дуганов В.Я. Станок для обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения: пат. 132012 Рос. федерация: МПК7 В23D 1/20, В23D 9/00 / Дуганов В.Я., Бешевли О.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Белгородский гос-й технологический ун-т им. В.Г. Шухова. - № 2013100863/02; заяв. 09.01.13; опубл. 10.09.2013 Бюл. №25

14. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 230 с.

15. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия. 1974. 264 с.

16. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Voronkova M.N., Murygina L.V., Optimization of cutting conditions for the processing of bandages of rotary cement kilns at a special stand. World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 31. № 9. С. 1593-1600.

Duganov V.J., Sumskoy A.M.

IMPROVING PRECISION MACHINING PARTS WITH REGARD TO THEIR DEFORMATION

At present, the production of engineering products one of the main competitive advantages is the accuracy rate. With the development of modern technologies and their introduction into production, require increasing levels of precision parts and products in general. For kinematically complete machines based directly on the workpiece, there are additional errors associated with the conditions of operation of these machines and products processing features.

This article describes methods for determining the error caused by deformation of the parts due to the influence of the gravitational force, which is an important factor in the precision machining of large-sized products. This makes it possible to solve the problem of dynamic adjustment of centerless grinding machines, which reduces to finding the boundary values of the frequency of the disturbance, in which the shaping factors have the greatest positive values for a given number of harmonic errors.

Key words: *improved accuracy, the large centerless machining, processing rings.*

Дуганов Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: dvybgtu@mail.ru

Сумской Александр Михайлович, аспирант кафедры технология машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: sumskoiAM@yandex.ru