

УДК 681.7.023.72

*А. С. КОЗЕРУК, А. А. СУХОЦКИЙ, И. П. ФИЛОНОВ, В. О. КУЗНЕЧИК*

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА  
 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ШАРОВИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ  
 ИЗ ЗАГОТОВОК КУБИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

*Белорусский национальный технический университет*

*(Поступила в редакцию 03.10.2013)*

На практике обосновано, что при изготовлении оптических деталей с высокоточными сферическими поверхностями радиусом кривизны менее 12 мм (например, микролинз) в качестве заготовок целесообразно использовать шарики, получение которых из хрупких материалов имеет ряд особенностей. Одной из них является необходимость применения устройства, позволяющего получать шарики из кубиков (операция галтовки). Для решения данной задачи целесообразно применять метод пневмоцентробежной обработки (ПЦО) шариков. Он основан на использовании устройства, содержащего два соосно расположенных инструмента в виде планшайб, снабженных по периферии абразивными коническими участками, вдоль которых происходит обкатка заготовок. На верхнем из упомянутых инструментов закреплена камера расширения с тангенциальными соплами, предназначенная для подачи в нее среды под давлением (например, сжатого воздуха), которая, выходя из сопел, сообщает заготовкам переносное движение вдоль абразивных участков [1].

При реализации ПЦО шаровидных деталей оптимальные значения геометрических параметров соответствующего устройства в настоящее время определяют экспериментальным путем. Метод трудоемкий и требует определенной квалификации исполнителя. С целью решения данной проблемы выполнено математическое моделирование процесса силового взаимодействия среды под давлением с заготовкой в рабочей зоне с учетом геометрических параметров последней.

Схема рабочей зоны инструмента для ПЦО представлена на рисунке, где  $r$  – радиус камеры расширения,  $R$  – внутренний радиус абразивных конических выступов,  $\tau = 2\pi/n$  – угловой шаг расположения тангенциальных сопел в камере расширения,  $n$  – количество таких сопел,  $\phi_p$  – угол, на котором отсутствует воздействие рабочей среды на заготовку,  $\psi$  – угол расхождения струи воздуха, выходящей из сопла. Штриховыми линиями показаны две соседние струи сжатого воздуха, исходящие из тангенциальных сопел, расположенных в точках  $A$  и  $D$ .

В процессе обработки со стороны рабочей среды на кубик действует тангенциальная  $P_t$  и нормальная  $P_n$  составляющие давления, оказывающие тангенциальное  $F_t$  и нормальное  $F_n$  усилия [2].

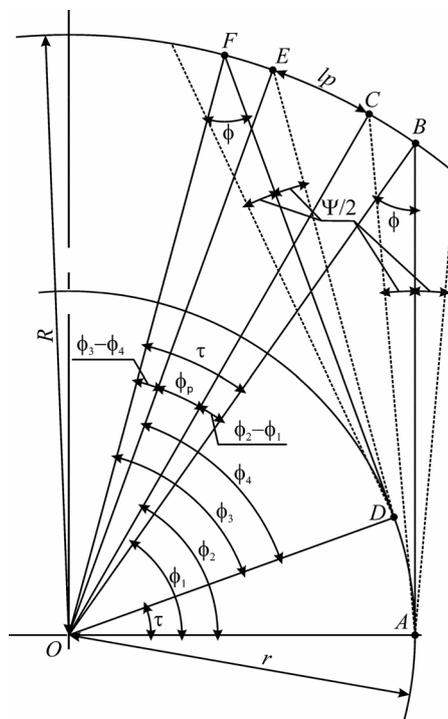


Схема рабочей зоны инструмента для пневмоцентробежной обработки

Для сообщения движения кубику с длиной ребра  $A$  необходимо, чтобы эти силы создали положительный крутящий момент  $M_k$  вокруг точки контакта  $K$  с поверхностью инструмента, который можно записать в виде:

$$M_k = \frac{A}{2} F_\tau - \frac{A}{2} F_n = \frac{A}{2} (F_\tau - F_n), \quad (1)$$

где

$$F_\tau = P_\tau A^2 = PA^2 \sin \varphi; \quad (2)$$

$$F_n = P_n A^2 = PA^2 \cos \varphi. \quad (3)$$

Тогда

$$M_k = \frac{PA^2}{2} (\sin \varphi - \cos \varphi), \quad (4)$$

где, как видно из рисунка,  $\varphi = \arcsin \frac{r}{R}$ .

Положительные значения момент  $M_k$  принимает только при условии, когда  $(\sin \varphi - \cos \varphi) > 0$ , т. е. при  $\varphi = 45 - 90^\circ$ .

После того, как кубик начал движение вдоль абразивных сегментов, на него действует сила инерции  $F_n$ , направленная обратно нормальному ускорению  $a_n$ , величина которой определяется таким образом:

$$F_n = a_n m = \frac{V^2}{R} A^3 \rho. \quad (5)$$

Здесь  $m$  – масса кубика;  $\rho$  – плотность материала.

Согласно рисунку,

$$\varphi_p = \tau - (\varphi_3 - \varphi_4) - (\varphi_2 - \varphi_1). \quad (6)$$

Определим углы, входящие в (6). Для этого рассмотрим равные треугольники  $OAB$  и  $ODF$ , у которых

$$\varphi_1 = \varphi_3 = \frac{\pi}{2} - \varphi. \quad (7)$$

Поскольку угол  $OAC = \frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2}$ , то из треугольника  $OAC$  по теореме синусов можно записать

$$\sin \angle OCA = \frac{l_{OA} \sin \angle OAC}{l_{OC}} = \frac{r}{R} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2} \right) = \frac{r}{R} \cos \frac{\psi}{2}. \quad (8)$$

Из суммы углов треугольника с учетом (8) имеем

$$\varphi_2 = \pi - \angle OCA - \angle OAC = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{r}{R} \cos \frac{\psi}{2} \right) + \frac{\psi}{2}. \quad (9)$$

Аналогично рассуждая касательно треугольника  $ODE$  и принимая во внимание, что угол  $ODE = \frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2}$ , получаем

$$\varphi_4 = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{r}{R} \cos \frac{\psi}{2} \right) - \frac{\psi}{2}. \quad (10)$$

Выражение (6) с учетом (7), (9) и (10) сводится к виду

$$\begin{aligned} \varphi_p &= \frac{2\pi}{n} - \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) + \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{r}{R} \cos \frac{\psi}{2} \right) - \frac{\psi}{2} - \\ &- \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{r}{R} \cos \frac{\psi}{2} \right) + \frac{\psi}{2} \right) + \left( \frac{\pi}{2} + \varphi \right) = \frac{2\pi}{n} - \psi. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда, как видно из рис. 1,

$$l_p = R\varphi_p = R\left(\frac{2\pi}{n} - \psi\right). \quad (12)$$

Смысл параметра  $l_p$  состоит в следующем. При галтовке шариков на устройстве для ПЦО возможна ситуация, когда исходная кубическая заготовка под действием рабочей среды перекачивается вдоль абразивных конических участков инструментов не с проскальзыванием, в процессе которого происходит съём припуска и таким образом формируется шар, а с ударами об инструмент. Такое движение заготовки имеет место в том случае, когда расстояние между границами соседних струй среды под давлением в непосредственной близости абразивных участков инструментов больше диагонали обрабатываемых кубиков (зона «провала»).

Как следует из выражения (12), варьируя внутренним радиусом  $R$  абразивных колец и количеством тангенциальных сопел  $n$  устройства, можно обеспечить наиболее выгодное сочетание тангенциального и нормального усилий при приемлемом значении параметра  $l_p$ .

Используя приведенную математическую модель и результаты экспериментального определения закономерностей распределения давления в струе сжатого воздуха, исходившего из тангенциального сопла [2], а также учитывая, что  $l_p$  не превышает размеров заготовки с ребром, например,  $A=10$  мм, рассчитываем величины  $n$ ,  $M_k$  и  $F_n$ , значения которых представлены в табл. 1–3 соответственно.

Из конструктивных соображений следует, что размер внутреннего диаметра абразивных колец должен быть больше диаметра камеры расширения. Такое сочетание диаметров соответствует в табл. 1–3 ячейкам с прочерком.

Кроме того, необходимо, чтобы расстояние между камерой расширения и абразивными кольцами превышало длину диагонали заготовки, в противном случае она не будет совершать переносного движения (одна звездочка в табл. 1–3). Если силы, действующие на заготовку, создают отрицательный крутящий момент, то обработка невозможна (две звездочки в табл. 1–3). Когда заготовка находится на расстоянии от тангенциального сопла, превышающем 80 мм, происходит значительная потеря кинетической энергии струи сжатого воздуха, в результате силы, действующие на заготовку, близки к нулю (три звездочки в табл. 1–3).

Т а б л и ц а 1. Количество тангенциальных сопел

Диаметр абразивных колец, мм	Диаметр камеры расширения, мм												
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
95	**	**	**	**	10	*	*	*	*	*	*	—	—
100	**	**	**	**	12	11	*	*	*	*	*	*	—
105	**	**	**	**	13	12	11	*	*	*	*	*	*
110	**	**	**	**	**	13	12	11	*	*	*	*	*
115	**	**	**	**	**	14	13	12	11	*	*	*	*
120	**	**	**	**	**	**	14	13	12	11	*	*	*
125	**	**	**	**	**	**	15	14	14	13	12	*	*
130	**	**	**	**	**	**	**	15	15	14	13	12	*
135	**	**	**	**	**	**	**	**	16	15	14	13	12
140	**	**	**	**	**	**	**	**	17	16	15	14	13
145	**	**	**	**	**	**	**	**	**	17	16	15	14
150	**	**	**	**	**	**	**	**	**	18	17	16	15
155	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	18	18	17
160	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	19	19	18
165	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	20	19
170	***	***	***	**	**	**	**	**	**	**	**	21	20
175	***	***	***	***	**	**	**	**	**	**	**	**	21
180	***	***	***	***	**	**	**	**	**	**	**	**	22
185	***	***	***	***	**	**	**	**	**	**	**	**	**
190	***	***	***	***	**	**	**	**	**	**	**	**	**

Таблица 2. Крутящий момент  $M_k$ , действующий на кубическую заготовку

Диаметр абразивных колец, мм	Диаметр камеры расширения, мм									
	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
95	**	0,93	*	*	*	*	*	*	—	—
100	**	0,49	1,15	*	*	*	*	*	*	—
105	**	0,17	0,6	1,17	*	*	*	*	*	*
110	**	**	0,33	0,75	1,33	*	*	*	*	*
115	**	**	0,12	0,47	0,85	1,3	*	*	*	*
120	**	**	**	0,24	0,59	0,95	1,42	*	*	*
125	**	**	**	0,06	0,35	0,71	1,07	1,46	*	*
130	**	**	**	**	0,17	0,46	0,75	1,15	1,56	*
135	**	**	**	**	**	0,26	0,5	0,84	1,25	1,61
140	**	**	**	**	**	0,13	0,33	0,59	0,93	1,21
145	**	**	**	**	**	**	0,19	0,41	0,62	0,9
150	**	**	**	**	**	**	0,09	0,27	0,45	0,69
155	**	**	**	**	**	**	**	0,16	0,34	0,52
160	**	**	**	**	**	**	**	0,07	0,23	0,4
165	**	**	**	**	**	**	**	**	0,14	0,3
170	**	**	**	**	**	**	**	**	0,05	0,2
175	***	***	***	**	**	**	**	**	**	0,11
180	***	***	***	***	***	***	**	**	**	0,03
185	***	***	***	***	***	***	***	***	**	**
190	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Таблица 3. Нормальная сила  $F_n$ , действующая на кубическую заготовку

Диаметр абразивных колец, мм	Диаметр камеры расширения, мм									
	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
95	**	0,58	*	*	*	*	*	*	—	—
100	**	0,54	0,56	*	*	*	*	*	*	—
105	**	0,47	0,45	0,46	*	*	*	*	*	*
110	**	**	0,45	0,43	0,44	*	*	*	*	*
115	**	**	0,45	0,43	0,4	0,37	*	*	*	*
120	**	**	**	0,4	0,4	0,37	0,35	*	*	*
125	**	**	**	0,37	0,38	0,39	0,36	0,32	*	*
130	**	**	**	**	0,36	0,37	0,34	0,34	0,31	*
135	**	**	**	**	**	0,34	0,32	0,33	0,32	0,29
140	**	**	**	**	**	0,33	0,31	0,31	0,32	0,28
145	**	**	**	**	**	**	0,3	0,3	0,28	0,27
150	**	**	**	**	**	**	0,31	0,29	0,27	0,27
155	**	**	**	**	**	**	**	0,3	0,28	0,26
160	**	**	**	**	**	**	**	0,31	0,29	0,27
165	**	**	**	**	**	**	**	**	0,3	0,29
170	**	**	**	**	**	**	**	**	0,31	0,3
175	***	***	***	**	**	**	**	**	**	0,31
180	***	***	***	***	***	***	**	**	**	0,31
185	***	***	***	***	***	***	***	***	**	**
190	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Учитывая данные табл. 1, можно заключить, что при возрастании значений внутреннего диаметра абразивных колец и постоянном диаметре камеры расширения необходимо увеличивать количество тангенциальных сопел, а при увеличении диаметра камеры расширения и неизменном диаметре абразивных колец число тангенциальных сопел можно уменьшить.

Из анализа формулы (12) следует, что с одной стороны, увеличение числа тангенциальных сопел приводит к уменьшению участка «провала» в рабочей зоне и к более равномерному рас-

пределению значений  $F_{\tau}$  и  $F_n$ . С другой стороны, в произвольный момент времени обработки одна заготовка может находиться под воздействием только одной струи сжатого воздуха. Остальные сопла работают вхолостую. Поэтому с точки зрения увеличения КПД устройства рекомендуется загружать в него максимально допустимое количество заготовок  $n_{\max}$ , такое, при котором они могут совершать относительное вращение в своем переносном движении вдоль рабочей поверхности абразивных колец. Как установлено на практике, величину  $n_{\max}$  можно определить, используя следующее эмпирическое соотношение:  $n_{\max} = 1,5\pi R/C$ , где  $C$  – диагональ кубика исходной заготовки.

Как видно из табл. 2, при увеличении диаметра камеры расширения  $D_r$  и постоянном значении диаметра абразивных колец  $D_k$  крутящий момент, действующий на заготовку, существенно возрастает и, следовательно, повышается производительность обработки. Увеличение же диаметра абразивных колец при постоянном значении диаметра камеры расширения приводит к незначительному изменению нормального усилия  $F_n$  (табл. 3). Однако чем меньше величина  $D_r$ , тем больше сила  $F_n$ . Исходя из этого, при проектировании устройства для формообразования шариков из кубиков диаметр камеры расширения целесообразно выбирать в пределах 60–70 мм где, как видно из табл. 3, создаются максимально возможные в рассматриваемой конструкции инструмента силы прижима заготовки к внутренней поверхности абразивных колец порядка 0,46–0,58 Н. С целью достижения максимального крутящего момента  $M_k$  диаметр абразивных колец для данного размера камеры расширения лучше выбирать как можно меньший (табл. 2). Например, для обработки кубика с ребром 10 мм рекомендуемый диаметр колец 95–105 мм, а наиболее выгодное количество тангенциальных сопел при этом  $n = 10 - 11$  (табл. 1). Такое сочетание конструктивных параметров обеспечит на первой стадии галтовки, когда поверхность заготовки имеет участок как сферической, так и кубической формы, момент  $M_k = 0,93-1,17$  Н·мм, что является максимально возможным значением для выбранного диаметра абразивных колец (табл. 2).

На второй стадии галтовки у заготовки уже частично срезаны ребра и поэтому ей можно придать большую переносную скорость  $\omega_{10}$  без риска появления сколов, что осуществляется путем увеличения силы  $F_{\tau}$ . Исходя из этого, а также из результатов расчета (табл. 3), при проектировании устройства для рассматриваемой стадии обработки целесообразно диаметр камеры расширения выбирать в пределах 75–85 мм, когда создаются силы прижима заготовки к абразивным кольцам порядка 0,35–0,44 Н. Для обработки кубика с ребром 10 мм и указанным размером камеры расширения рекомендуемый диаметр колец 110–120 мм, что обеспечит оптимальный момент  $M_k = 1,33-1,42$  Н·мм (табл. 2). Согласно табл. 1, минимальное количество тангенциальных сопел в этом случае  $n = 11$ .

На третьей заключительной стадии галтовки заготовка принимает форму шара. Движение шарика носит безударный характер. Поэтому производительность можно увеличить за счет больших скоростей  $\omega_{10}$ , а прижим заготовки к абразивным сегментам будет осуществляться в основном за счет центробежной силы, которая, как известно, тем больше, чем больше  $\omega_{10}$ . В свою очередь переносная скорость зависит от раскручивающих заготовку сил, т. е. от  $M_k$ . Исходя из данных табл. 3, при проектировании устройства для заключительной стадии галтовки целесообразно диаметр камеры расширения выбирать в пределах 90–100 мм, где создаются максимальные условия разгона заготовки вдоль поверхности абразивных колец. Следовательно, для обработки кубика с ребром 10 мм на данной стадии шлифования рекомендуемый диаметр колец составляет 125–140 мм, поскольку это обеспечит максимально возможный момент  $M_k = 1,46-1,61$  Н·мм (табл. 2). Минимальное количество тангенциальных сопел для этого случая, согласно табл. 1,  $n = 12$ .

## Выводы

1. Выполненное математическое моделирование силового взаимодействия среды под давлением с заготовкой позволило предложить методику определения наиболее выгодных параметров устройства для ПЦО шаровидных деталей на различных стадиях галтовки.

2. Предложенное аналитическое выражение для определения допустимого количества одновременно обрабатываемых заготовок в устройстве для ПЦО дает возможность использования его с максимальной эффективностью.

### **Литература**

1. Козерук А. С., Филонов И. П., Сухоцкий А. А., Филонова М. И. // СТИН. 2000. № 7. С. 28–29.
2. Сухоцкий А. А. // Вестн. БНТУ. 2003. № 1. С. 32–33.

*A. S. KOZERUK, A. A. SUHOTSKY, I. P. FILONOV, V. O. KUZNECHIK*

### **A METHOD FOR DETERMINATION OF DESIGN PARAMETERS OF A DEVICE FOR PRIDUCTION OF HIGH-PRECISION SPHERICAL PARTS FROM CUBIC BILETS**

### **Summary**

Mathematic modeling of power interaction process of pressure medium and part blank in operating space of a pneumo-centrifugal device for making spherical parts from cubic blanks is made. Analytic expression of mechanical blank trajectory length where there is no driving force from pressure medium is obtained. Digital investigations of optimal tangential nozzle quantity in expansion chamber of cited above device as well as torque moment and axial force acting on the blank are made.