

ПРЕЦИЗИОННЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВЫХ КУЛАЧКОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВНЕСЕНИЕМ УГЛОВЫХ ПОПРАВК

1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КУЛАЧКОВ

В практике машиностроения существует несколько способов изготовления кулачков: по разметке, по копиру, кинематическим методом и методом малых делений.

Изготовление кулачков по разметке требует высокой квалификации рабочего, мало производительно, трудоемко и недостаточно точно. Этим методом можно изготавливать кулачки, профиль которых спроектирован для воспроизведения любого из законов периодического движения толкателя. При использовании вспомогательной оснастки (например, предложенной на Невском машиностроительном заводе им. Ленина слесарем А. А. Никифоровым) такой метод дает хорошие результаты.

Изготовление кулачков по копиру производится на специальных станках или с применением специальной копировальной оснастки. Здесь могут быть использованы как явные копиры, так и неявные, т. е. потенциометры, реостаты и средства программного управления. Точность обработки в случае использования явных копиров определяется точностью их изготовления и чувствительностью копировального устройства, а в случае неявных копиров — чувствительностью схемы.

Кинематический метод изготовления кулачков аналогичен способу геометрической обкатки, применяемому при изготовлении зубчатых колес. С его помощью обработка может производиться с использованием кинематически настроенной цепи для обработки кулачков с профилем в виде спирали Архимеда, выражаемым функционально линейной зависимостью.

Иногда используют механизмы построителей, в которых конечное звено воздействует на подвижный элемент измерительного устройства следящей системы или непосредственно на перемещение рабочего инструмента. В этом случае в процессе обработки профиля кулачка кинематическая схема приспособления соответствует кинематической схеме кулачкового механизма. Однако вместо ролика толкателя здесь используется цилиндрическая фреза, а вместо кулачка — его заготовка.

Если заготовке кулачка сообщить вращательное движение, а вращающейся фрезе — относительное движение, соответствующее движению ролика толкателя, то в результате этих двух элементарных формообразующих движений будет получен профиль кулачка, предусмотренный расчетом.

В настоящее время разработаны конструкции приспособлений для изготовления кулачков по следующим конкретным законам периодического движения: постоянная скорость, косинусоидальный, синусоидальный, наклонной синусоиды, кулисного механизма [3], [4], [8], [12].

Кинематический метод изготовления кулачков отличается большой степенью точности рабочей поверхности кулачка и высокой производительностью. Непрерывность процесса резания не создает на поверхности кулачка волнистости, свойственной для методов с дискретным врезанием режущего инструмента.

Метод малых делений заключается в периодической обработке рабочего профиля кулачка последовательными дискретными врезаниями режущего инструмента на точно заданный размер, с поворотом заготовки на малый угол после каждого очередного врезания. При этом на поверхности кулачка в результате дискретности процесса резания образуется ряд гребешков, выемки которых касательны к идеальному профилю.

От угловой частоты расположения гребешков зависит точность обработки рабочей поверхности кулачка, контролируемая путем измерения радиусов-векторов эквидистантной кривой на специальном приспособлении. Обработка копиров и кулачков с использованием этого метода производится на фрезерных станках с делительной головкой или на координатно-расточных станках, что гарантирует высокую точность обрабатываемого контура. Метод малых делений широко применяется на заводах полиграфического машиностроения.

При нарезании кулачков для механизмов с качающимся толкателем, у которых ролик имеет дуговую траекторию, взамен необходимых частных угловых поправок обычно вводят общую суммарную поправку для циклового угла кулачка в целом — $\varphi_{уд}$ и $\varphi_{пр}$. Это приводит к отклонению полученного профиля от идеального, вследствие чего истинная динамика ведомого звена кулачкового механизма отличается от расчетной. Аналитический подсчет угловых поправок и корректировка по ним периодических поворотов заготовки на заданный угол — весьма трудоемкая и неудобная для исполнения операция.

В американской практике [11] до начала нарезания кулачков, требующих введения угловых поправок, в зависимости от геометрической схемы механизма производят подсчет координат x и y режущего инструмента относительно заготовки при повороте ее на заданные равные элементарные углы. Подсчет координат центра ролика (при нарезании центра торцевой фрезы) производится от начала координат, совпадающего с центром ролика в наиболее удаленном от центра кулачка положении, причем ось ou принимают совпадающей с линией центров кулачка и ролика.

Грубая и чистовая обработка профиля кулачка производится на координатно-расточном или вертикально-фрезерном прецизионных станках. При каждой очередной подаче стола с заготовкой кулачка первое координатное перемещение должно быть установочным (с возможно малым врезанием фрезы в тело кулачка), а второе — представлять основную рабочую подачу на врезание фрезы (рис. 1б).

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ КУЛАЧКОВ

В Украинском полиграфическом институте им. Ив. Федорова автором статьи освоено и практически широко использовано специальное приспособление для точной обработки кулачков коромысловых кулачковых механизмов, исключающее необходимость расчета угловых по-

правок и величин радиусов-векторов эквидистантной кривой профиля кулачка. Это значительно упрощает техническую подготовку обработки кулачков.

Из геометрической схемы кулачкового механизма с качающимся толкателем (рис. 1а) величина радиуса вектора определяется зависимо-
стью

$$r_{ki} = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \beta_i},$$

где a — длина коромысла;

b — база механизма;

β_i — текущее угловое положение механизма, определяемое зависи-
мостью $\beta_i = \beta_0 + a_k \beta_{\Sigma}$;

β_0 — начальное угловое положение механизма, определяемое по формуле при

$$r_{kmin} = r_0;$$

β_{Σ} — угловой размах коромысла;

a_k — безразмерный позиционный инвариант подобия углового пере-
мещения, качественно отражающий закон периодического дви-
жения коромысла [7].

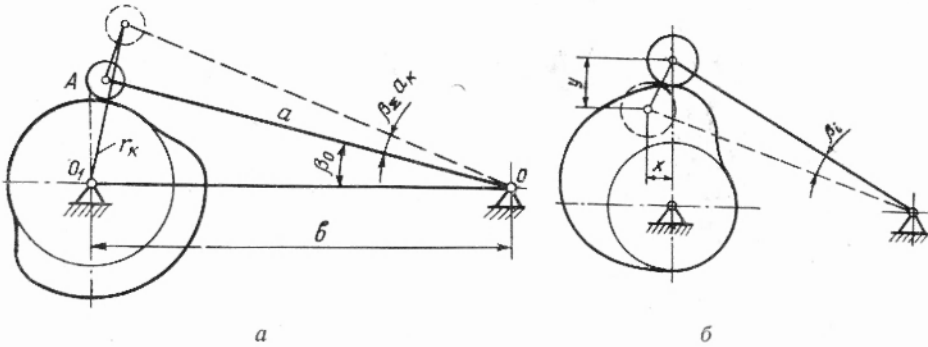


Рис. 1. а — схема настройки станка для нарезания дисковых кулачков с учетом угловой поправки; б — геометрическая схема кулачкового механизма с качающимся толкателем.

Очевидно, что на каждой из заданных позиций можно определить величину r_{ki} в зависимости от углового положения коромысла $\beta_i = \beta_0 + a_k \beta_{\Sigma}$. Если расположить инструмент (фрезу) так, чтобы его ось совпала с осью ролика и сообщать ему последовательные угловые положения, определяемые величиной $\beta_0 + a_k \beta_{\Sigma}$, соответственно выбранному числу позиций, то на поверхности заготовки получим контур, который сообщит коромыслу движение согласно выбранному закону движения $\beta = a_k \beta_{\Sigma}$.

Необходимость обеспечения взаимного расположения центра фрезы и заготовки кулачка в процессе обработки соответственно взаимным положениям ролика и кулачка на одноименных позициях в процессе работы механизма определила конструкцию приспособления.

Обработка кулачков на таком приспособлении может производиться без предварительного промежуточного расчета величин радиусов-векторов, так как их линейная величина, определяемая уравнением (1), получается автоматически при соответствующей угловой установке заготовки и фрезы в момент окончания врезания. Вследствие

относительной дуговой траектории движения инструмента и заготовки автоматически вносятся и угловые поправки, которые в этом случае не требуют расчета. На рис. 2а приведена принципиальная схема приспособления.

Приспособление устанавливается на столе вертикально-фрезерного станка. На жесткой плите в специальных круговых направляющих пе-

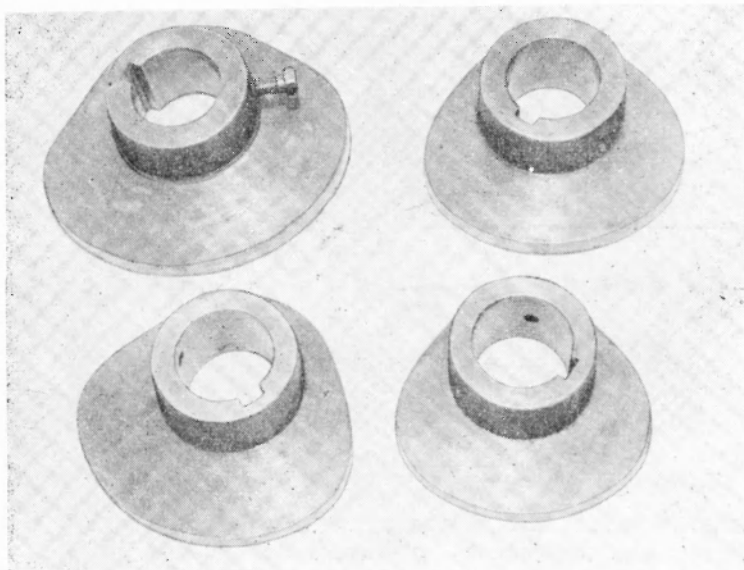
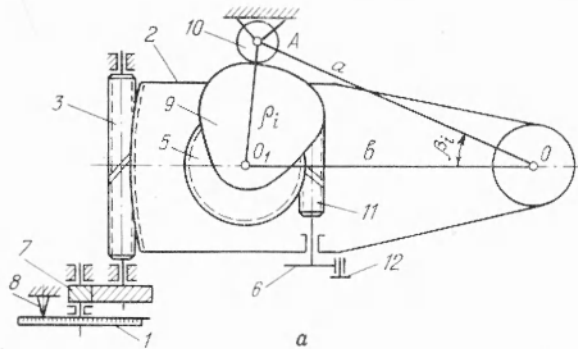


Рис. 2. а — принципиальная схема приспособления для прецизионного изготовления дисковых кулачков с автоматическим внесением угловых поправок, б — кулачки, изготовленные с использованием приспособления.

ремещается поворотный сектор 2, имеющий ось вращения в точке O . На торцевой поверхности сектора нарезаны зубья, притертые по зубьям термически обработанного и шлифованного червяка 3, смонтированного в подшипниках на неподвижной плите. Червячная пара 2—3, цилиндрическая косозубая пара 7, лимб 1 и указатель 8 представляют собой механизм дуговой подачи заготовки 9 на фрезу 10. Величина этой подачи определяется, как указывалось выше, в зависимости от угла $\beta = \alpha_k \beta_z$ (позиции коромысла). Для облегчения отсчетов лимб 1 может устанавливаться на нуль при любом значении r_{kmax} путем соот-

ветствующего поворота и закрепления на валу. Механизм угловой установки заготовки смонтирован на поворотном секторе 2 и представляет собой червячную пару 5—11 и рукоятку делительного устройства (фиксатор) 12 для фиксации положения заготовки после отсчета угла. Угловая подача заготовки (деление) может производиться с интервалом в 30', путем установки фиксатора 12 в соответствующее отверстие делительного диска, укрепленного на подвижной плите. Шпиндель приспособления выполнен заодно с червячной шестерней механизма круговой подачи.

Процесс нарезания рабочего профиля кулачка производится в направлении от $r_{k_{max}}$ к $r_{k_{min}}$, чтобы избежать влияния «мертвых ходов» в механизме дуговой подачи на величину подачи при переходе от φ_y к $\varphi_{пр}$. Выборка зазора в механизме дуговой подачи при обработке профиля в пределах φ_y и $\varphi_{пр}$ в таком случае происходит только в одном направлении. В приспособлении, в отличие от реального механизма, коромысло a является неподвижным, а база b подвижной. Это не меняет сущности относительных перемещений, но дает возможность использовать точность вращения фрезы, обеспечиваемую шпинделем станка.

Звенья механизма угловой установки заготовки выполнены с высокой степенью точности, так как действительное положение заготовки относительно фрезы на каждой позиции зависит от накопленной кинематической ошибки в системе этих звеньев.

Приспособление настраивается следующим образом: устанавливается длина коромысла (отрезок AO) — при помощи механизмов подачи стола станка; производится установка приспособления по максимальному углу β_2 , соответственно максимальному размеру радиус-вектора кулачка $r_{k_{max}}$; лимб 1 устанавливается в нулевом положении относительно указателя 8. Затем производится обработка профиля кулачка на участке, соответствующем углу верхней паузы при $r_{k_{max}}$ вращением рукоятки 6 механизма угловой установки. На рис. 26 приведены фотографии кулачков, изготовленных на приспособлении.

3. ВЫБОР НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ЦИКЛОВ ВРЕЗАНИЯ

Так как метод малых делений обеспечивает не непрерывный, а дискретный процесс обработки заготовки, то на поверхности кулачка образуются гребешки между смежными цилиндрическими врезаниями. Высота гребешка, а следовательно, и волнистость профиля зависят от величины элементарной угловой подачи заготовки, принятой при расчете обработки за цикл врезания, от диаметра фрезы и величины радиального смещения фрезы при последующем врезании.

На рис. 3а введены обозначения:

- H — геометрическая высота микронеровностей (высота гребешка);
- Δr_k — приращение радиуса вектора кулачка;
- R — радиус фрезы, равный радиусу ролика-толкателя;
- r_{k1} — радиус-вектор кулачка при предыдущем врезании;
- r_{k2} — радиус-вектор кулачка при последующем врезании.

Из схемы видно, что $a = R - H$, а $\sin \alpha = \frac{R - H}{R}$. Соответственно

$b = 2R \cos \alpha$ или $b = 2R \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$. Поэтому

$$b = 2R \sqrt{1 - \left(\frac{R - H}{R}\right)^2} = 2R \sqrt{\frac{2H}{R} - \left(\frac{H}{R}\right)^2}.$$

Заменяв отношение $\frac{H}{R}$ через относительный параметр H_0 , получим

$$c = 2R \sqrt{2H_0 - H_0^2},$$

или, пренебрегая H_0^2 , как величиной весьма малой, имеем

$$c = D_p \sqrt{2H_0}.$$

С другой стороны, величина c равна $c = \sqrt{(\Theta r_{к2})^2 + (\Delta r_{к})^2}$.
Приравнявая эти равенства, получим $2D_p^2 H_0 = (\Theta r_{к2})^2 + (\Delta r_{к})^2$.

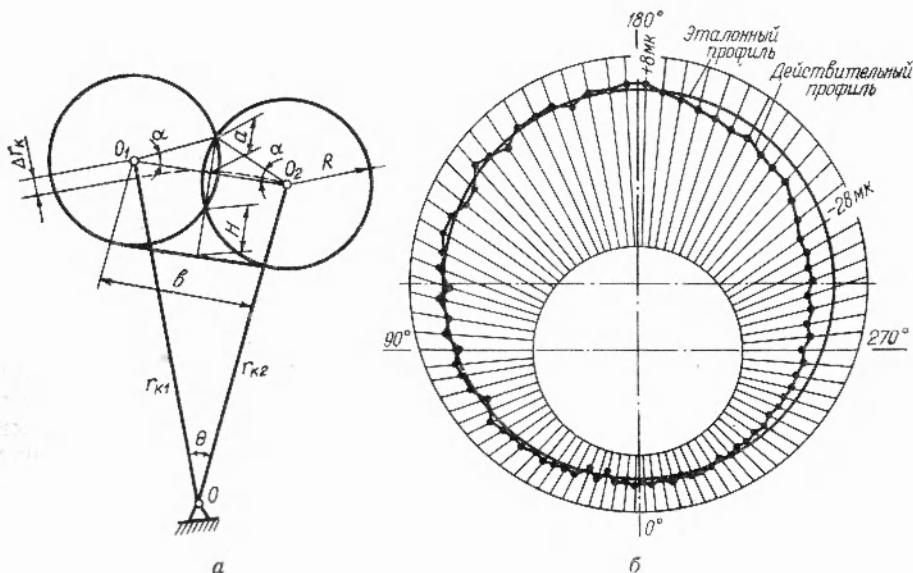


Рис. 3. а — схема дискретного врезания фрезы в заготовку; б — отклонение действительного профиля кулачка от эталонного.

Произведем замену $\Delta r_{к} = \text{tg } \alpha \cdot \Theta r_{к2}$, так как наибольшее приращение радиуса-вектора кулачка будет при достижении угла давления наибольшей величины $\alpha = \alpha_{\text{max}}$, а $r_{к2} = r_0 + 0,5\beta_{\Sigma} a$. Из тех же соображений, заменив $\Theta = \frac{r_y}{z}$, где z — искомое число позиций врезания, получим

$$2D_p^2 H_0 = \frac{r_y^2}{z^2} (r_0 + 0,5\beta_{\Sigma} a)^2 (1 + \text{tg}^2 \alpha_m).$$

Из [7] известно, что

$$\text{tg } \alpha_{\text{max}} = \frac{B \beta_{\Sigma}^2 a}{r_y (r_0 + 0,5\beta_{\Sigma} a)},$$

где B — константа пика скорости, характеризующая закон периодического движения ведомого звена. С учетом этого равенство преобразуется к виду

$$2D_p^2 H_0 = \frac{1}{z^2} \frac{B^2 \beta_{\Sigma}^2 a^2}{\text{tg}^2 \alpha_{\text{max}}} (1 + \text{tg}^2 \alpha_{\text{max}}).$$

Откуда необходимое число циклов врезания будет равно

$$z = \frac{B\beta_{\Sigma a}}{D_p} \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{\max}}{2H_0 \operatorname{tg}^2 \alpha_{\max}}}$$

Обозначив $\sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{\max}}{2D_p^2 H_0 \operatorname{tg}^2 \alpha_{\max}}} = z_0$, будем иметь $z = z_0 B \beta_{\Sigma}$.

В таблице приведены значения величины z_0 в зависимости от диаметра ролика D_p и геометрической высоты микронеровностей H при наибольшем угле давления $\alpha_{\max} = 45^\circ$.

$H_0 \backslash D_p$	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.005	2,24	1,83	1,58	1,41	1,29	1,20	1,12	1,06	1,00
0.020	1,58	1,29	1,06	1,00	0,914	0,845	0,790	0,745	0,708
0.015	1,29	1,05	0,914	0,817	0,745	0,690	0,645	0,608	0,578
0.020	1,12	0,914	0,790	0,708	0,645	0,598	0,560	0,527	0,500
0.025	1,00	0,817	0,708	0,631	0,578	0,535	0,500	0,483	0,447
0.030	0,91	0,745	0,645	0,578	0,527	0,488	0,457	0,430	0,410

4. ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ОБРАБОТКИ КУЛАЧКОВ

Техническая подготовка обработки кулачков на предлагаемом приспособлении заключается в следующем:

1. Определяется необходимое минимальное число циклов врезаний по изложенной методике.

2. Цикловой угол кулачка $\varphi_{уд}$ или $\varphi_{пр}$ разбивается на соответствующее число элементарных угловых установок заготовки кулачка.

3. Соответственно каждой угловой установке определяются величины дуговых подач подвижной плиты приспособления — по формуле $\beta_i = \beta_0 + a_k \beta_{\Sigma}$.

4. С учетом передаточного отношения механизма дуговой подачи количество делений лимба, соответствующее каждой угловой установке заготовки, определится зависимостью $n = \frac{ia_k \beta_{\Sigma}}{K}$, где K — цена деления лимба. Величины a_k (безразмерных позиционных коэффициентов перемещения ведомого звена) имеются в литературе [7].

5. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ КУЛАЧКОВ

Для проверки точности изготовления кулачков в практике машиностроения существуют три метода контроля: по эталонам, путем измерения радиусов-векторов специальными индикаторными приборами, электрический метод.

Для оценки точности обработки кулачков с использованием приспособления, описанного выше, в качестве эталонного кулачка был использован эксцентрик диаметром 130 мм с эксцентриситетом 13 мм, выточенный на точном токарном станке. Его погрешности оказались ниже чувствительности индикатора часового типа, с точностью отсчета до 0,01 мм, а потому не могли быть зафиксированы.

Для эксцентрика теоретически были подсчитаны величины дуговой подачи при последовательных врезаниях, с установкой заготовки через

каждые 30° . Кулачок, фрезерованный с помощью описанного дискретного метода, сравнивался с эталонным эксцентриком. С этой целью кулачок и эксцентрик совместно укреплялись на оправке делительной головки; после каждого поворота ее на 1° измерялась с помощью индикатора разность отсчета по рабочим поверхностям профиля кулачка и эксцентрика. Полученные результаты измерения показывают, что кулачок, изготовленный на приспособлении, имеет некоторые отклонения от эталонного эксцентрика (рис. 3б).

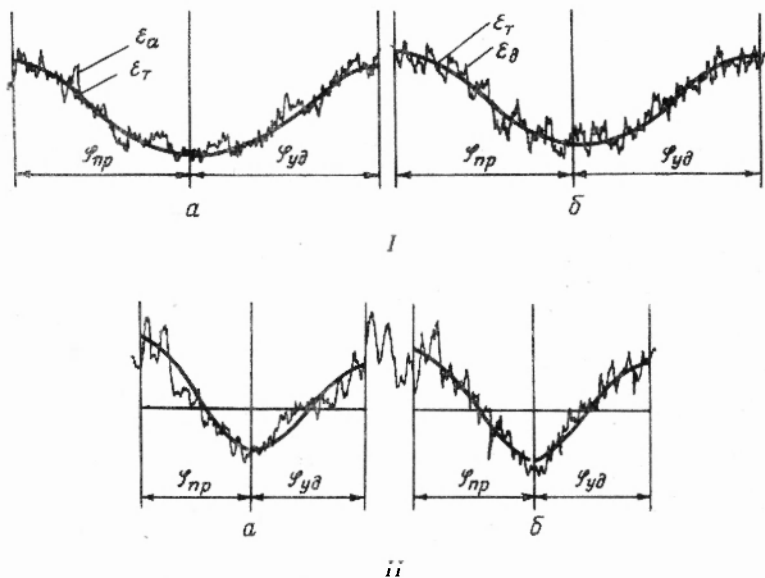


Рис. 4. I — осциллограммы записи истинных ускорений с наложением расчетных при $n = 80$ об/мин; II — осциллограммы записи истинных ускорений с наложением расчетных при $n = 195$ об/мин.

Угол приближения кулачка ($180-360^\circ$) имеет радиусы-векторы с отклонением от эталонного в минус, с наибольшим отклонением 28 мк. Это объясняется тем, что участок угла приближения обрабатывается попутным фрезерованием, в связи с чем происходит затягивание кулачка под фрезу за счет выборки зазоров и недостаточной жесткости механизма дуговой подачи приспособления. Остальной участок профиля имеет радиусы-векторы с отклонениями чаще в плюс до 8 мк и реже — в минус до 3 мк. Это объясняется наличием погрешностей в механизме дуговой подачи, неточностями установки лимба и заготовки на шпинделе, а также отжимом фрезы под действием сил резания в процессе фрезерования.

Полученные результаты позволяют определить поле допуска для радиусов-векторов кулачков, нарезаемых на рассматриваемом приспособлении. Верхнее допускаемое предельное отклонение размеров радиусов-векторов кулачка от номинала установлено в $+0,010$ мм и нижнее в $-0,030$ мм, т. е. поле допуска составляет $0,040$ мм.

Электрический метод контроля основан на использовании электронно-тензометрической цепи с записью истинных ускорений ведомого звена, которая позволяет оценить точность изготовления кулачка при сравнении с расчетными ускорениями.

На рис. 4. I приведены осциллограммы действительных кривых ускорений с наложением расчетных, записанных для эталонной шай-

бы — *a* и фрезерованной шайбы — *b* для 80 об/мин. Кривые действительных ускорений, как видно из осциллограмм, искажены наложением собственных крутильных колебаний ведомой системы. Это наложение имеет большие амплитуды у фрезерованной шайбы и носит более хаотический характер, чем у эталонной, что объясняется наличием погрешностей на поверхности фрезерованного кулачка.

Коэффициент динамичности для фрезерованного и эталонного кулачка практически одинаков, для эталонного кулачка $k_d = 1,3$; для фрезерованного $k_d = 1,35$, что является вполне удовлетворительным результатом. В американской практике принято считать [9], что если допустимая величина ускорения, вызываемая погрешностью профиля, не превышает 20—50% расчетного пика ускорений, то такой профиль является удовлетворительным. В нашем случае отклонения ускорений, вызываемых погрешностью профиля, не превышают этого предела. С повышением числа циклов $n = 195$ об/мин отклонения ускорений, сообщаемых ведомому звену фрезерованным кулачком, повышаются (рис. 4, II), однако не выходят за указанный предел. Из этого следует, что работа кулачков в диапазоне скоростей 20—120 об/мин является удовлетворительной, и отклонения ускорений, вызванные погрешностями изготовления профиля, невелики и лежат в пределах допускаемых.

Для оценки точности кулачков, изготавливаемых на приспособлении, был использован специальный индикаторный щуп, принципиальная схема установки которого указана на рис. 5.

Индикаторный щуп устанавливается в шпинделе станка с помощью конического хвостовика (точка *A*), второй конец вместе с подвижным сухарем *b* на шпиндель механизма угловой установки приспособления (точка *O*). Расстояние между этими точками соответствует величине радиуса-вектора до эквидистантной кривой кулачка *б*. В корпусе щупа *1* перемещается в прямолинейных направляющих ползун *2*, один из концов которого выполнен в виде полуокружности радиусом, равным половине диаметра фрезы (или ролика толкателя). В процессе измерения ползун поджимается к поверхности кулачка пружиной *3*. Перед началом контроля подвижной ползун *2* выставляется так, чтобы центр его полуокружности совпадал с осью шпинделя станка, а часовой индикатор приводится к началу отсчета. Затем последовательно проводятся те же операции, что и при обработке профиля кулачка. Кулачок *б* поворачивался с помощью механизма угловой установки на заданный угол (позицию), а база *b* поворачивалась относительно точки *O* механизмом дуговой подачи на угол $\beta_1 = \beta_0 + \alpha_k \beta_2$. При этом ползун *2* за счет погрешностей действительного радиуса-вектора смещался вдоль направляющих относительно нулевого положения, что и фиксировалось индикатором. Показания индикатора отражают отклонения действительного радиуса-вектора кулачка от расчетного за счет упругих деформаций системы приспособление—деталь—инструмент.

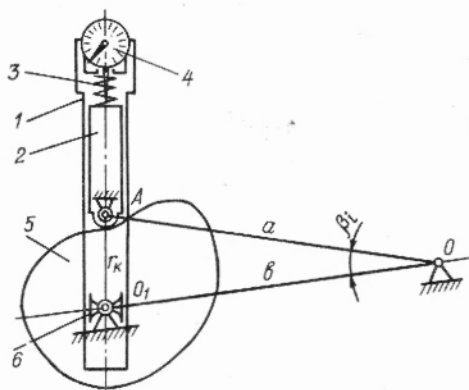


Рис. 5. Принципиальная схема приспособления для контроля кулачков и его установки.

Профилометрические исследования, проведенные с помощью профилометра, показали чистоту поверхности рабочей части кулачка — 6—7▽.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Ачеркан. Расчет и конструирование металлорежущих станков, Машгиз, М., 1952.
2. И. А. Дружинский. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках, Машгиз, М., 1961.
3. О. С. Езикашвили. О кинематическом методе обработки кулачков. Труды семинара по ТММ АН СССР, 1953.
4. О. И. Кульбачный. Методы расчета кулачковых механизмов инерционного типа, Автореферат диссертации, 1956.
5. М. Л. Орликов. Проектирование механизмов станков-автоматов, Машгиз, М., 1962.
6. А. П. Соколовский. Технология машиностроения, вып. 5, ОНТИ, М., 1935.
7. К. В. Тир. Комплексный расчет кулачковых механизмов, Машгиз, М., 1958.
8. А. Е. Кобринский. Кулачки с оптимальными динамическими характеристиками и схема приспособлений для их обработки, Сб. «Вопросы машиностроения», Изд-во АН СССР, М., 1950.
9. Г. А. Ротбарт. Кулачковые механизмы, Судпромгиз, М., 1960.
10. Г. А. Шаумян. Автоматы, Машгиз, М., 1952.

PRECISION METHOD OF MAKING DISC CAMS WITH AUTOMATIC BRINGING IN OF ANGLE CORRECTIONS

A. N. POLUDOV

The existing methods of making cams are studied. A special device for accurate machining of cams of rocking shaft cam mechanisms is described, which device enables omitting the calculations of the angle corrections and radiusvector sizes of some equidistant curves, determining the cam shape. The problem of choosing some necessary number of cutting cycles is investigated and many other questions as well.
