

Б.И. Бутаков, проф., д-р техн. наук, А.В. Зубехина, лаборант
Николаевский государственный аграрный университет

Влияние жесткости технологической системы при обкатывании роликами деталей на их точность

В статье описаны результаты исследования жесткости технологической системы станок-инструмент-деталь при обкатывании валов и раскатывании отверстий роликами. Описаны рекомендации по уточнению размеров деталей в результате обкатывания их роликами.

обкатывание и раскатывание деталей роликами, точность, шероховатость

Реализация оптимального режима обкатывания связана с возможностями используемых станков. Одним из условий при этом является возможность создания и стабилизации рабочего усилия необходимой величины.

При односторонней схеме обкатывания универсальными однороликовыми устройствами усилие обкатывания полностью воспринимается узлами станка, поэтому оно ограничивается размерами и фирменными особенностями станков.

Постоянство необходимого усилия непосредственно связано с жесткостью технологической системы станок – инструмент – деталь. Жесткость j системы, состоящей из нескольких звеньев, определяется по А.П. Соколовскому:

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_1} + \frac{1}{j_2} + \frac{1}{j_3} + \dots \quad (1)$$

Одна из основных составляющих жесткости системы – жесткость станка. На жесткость металлорежущих станков оказывает большое влияние соотношение составляющих усилия резания. Соотношение $P_z : P_y : P_x$, на которое рассчитаны универсальные металлорежущие станки, отличается наибольшим значением P_z . При довольно широких колебаниях указанное соотношение, в среднем характерное для процесса резания, составляет 1 : 0,4 : 0,25.

В отличие от этого процесс обкатывания характеризуется превалирующим значением P_y при незначительной величине остальных составляющих.

© Б.И. Бутаков, А.В. Зубехина, 2010

Непосредственные измерения усилий обкатывания валов диаметром 100 мм роликами различных размеров, выполненные динамометром УДМ конструкции ВНИИ с записью осциллограмм, показали, что для обкатывания характерно соотношение $P_z : P_y : P_x = 0,03 : 1 : 0,3$ [1]. У большинства конструкций станков максимальная жесткость достигается при отношении $P_y : P_z = 0,4$ и резко падает при его увеличении.

В смысле сохранения оптимального режима обкатывания представляет опасность не столько снижение жесткости, сколько ее непостоянство. Например, при обкатывании на токарных станках концов вала, кроме жесткости суппорта, на жесткость системы существенно влияет жесткость передней и задней бабок. Принято считать, что по мере передвижения суппорта от передней бабки к задней жесткость снижается на 40-60%. По данным Санкт-Петербургского технического университета у токарных станков с высотой центров 200-300 мм перепад жесткости составляет 50-100%, достигая в отдельных случаях четырехкратного. Аналогичная картина наблюдается у крупных токарных станков с высотой центров 500-1500 мм.

Очевидно изменение жесткости в процессе обработки на расточных и карусельных станках. При увеличении вылета шпинделя в 3 раза жесткость шпиндельного узла расточного станка с диаметром шпинделя 90 мм падает в 4 раза, а станка с диаметром шпинделя 150 мм - в 3,5 раза [2].

При характерном для обкатывания роликами распределении усилий увеличивается гистерезис кривой зависимости усилие - отжатие. Это связано с определяющей ролью стыков в деформации узлов станков [3]. Упругие деформации входящих в них деталей составляют лишь небольшую долю деформации узлов.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости деформации от радиального усилия для трех токарных станков разных размеров [4]. В начале разгрузки усилие резко падает при очень малых перемещениях, связанных с упругой деформацией деталей без участия стыков. В этот момент жесткость системы весьма высока; она измеряется сотнями килоньютонов на миллиметр.

В процессе обкатывания эксцентричное закрепление детали, радиальное биение роликов и другие погрешности приводят к тому, что система работает в колебательном режиме разгрузка - нагружение вблизи максимума приложенной нагрузки. Моделирование этого процесса путем шести последовательных циклов изменения нагрузки в пределах 8,5-10,5 кН, выполненное на станке с высотой центров 286 мм, представлено кривой 1 в увеличенном масштабе на рис. 1. Полученный график показывает, что жесткость системы при этом остается в области весьма высоких значений, характерных для разгрузочной ветви кривой $P=f(y)$.

Задача стабилизации усилия обкатывания в пределах допустимых отклонений решается введением в конструкцию обкатных устройств упругих элементов пониженной жесткости.

Объединяя в выражении (1) жесткость станка, детали, крепежных приспособлений общим символом j_c и выделив жесткость инструмента для обкатывания j_u , найдем жесткость системы [4]:

$$j = \frac{j_c j_u}{j_c + j_u}. \quad (2)$$

Предположим, что отношение жесткости инструмента к жесткости остальных элементов m , тогда

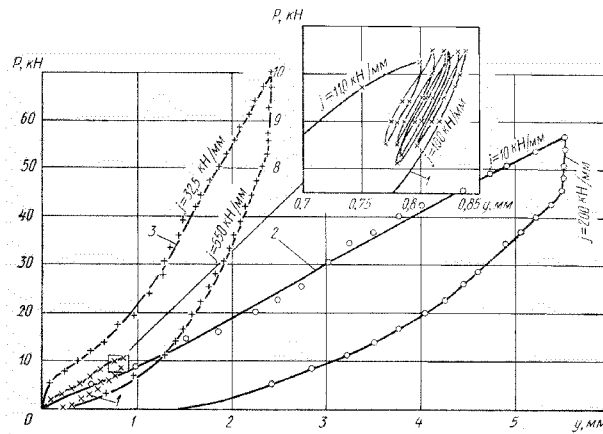
$$j_u = m j_c. \quad (3)$$

Если жесткость j_c колеблется в пределах от $j_{c\max}$ до $j_{c\min}$, причем $j_{c\max} = n j_{c\min}$, то введение в технологическую систему инструмента с жесткостью по формуле (3) приведет к уменьшению этих колебаний:

$$\Delta j = j_{\max} - j_{\min} = \frac{m}{1+m} (n-1) j_{c\min}.$$

Колебания жесткости системы уменьшатся в $\frac{1+m}{m}$ раз, или на $\frac{100}{m}\%$.

Одним из радикальных путей стабилизации режима обкатывания роликами является исключение из общей жесткости технологической системы поперечной жесткости станка. В производстве широко применяется обкатывание валов многороликовыми охватывающими устройствами разных типов. А раскатывание отверстий большой длины было бы невозможно без использования многороликовых головок с уравновешенным радиальным давлением. Разгрузка суппорта станка от рабочего усилия обкатывания упрощает силовую схему процесса. Усилие замыкается между деталью и обкатным устройством. Если при этом деталь имеет стенки достаточно большой толщины, то величина и постоянство усилия определяются конструкцией и жесткостью инструмента. При обкатывании или раскатывании тонкостенных деталей их жесткость должна быть учтена.



1 - 286 мм; 2 - 500 мм; 3 - 1250 мм

Рисунок 1 - Зависимость отжима суппорта токарного станка от радиального усилия при высоте центров

Рассмотрим жесткость системы инструмент - деталь на примере раскатывания втулок. Представим втулку в процессе раскатывания в виде тонкой цилиндрической оболочки, шарнирно опертой на концах и нагруженной в среднем сечении радиальными составляющими усилия, равномерно разнесенными по окружности и приложенными в точках контакта роликов. Такой случай рассмотрен в работе П.П. Бейларда [5].

Дифференциальные уравнения оболочки решаются методом разложения перемещений и нагрузок в двойные ряды Фурье. В результате получено выражение для радиального перемещения ω , пригодное для числовых расчетов:

$$\omega = \frac{12kl^3(1-\mu^2)P}{\pi h^3 E \rho} \left[\sum_n (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{\sin \frac{n\pi}{l} x}{n^4 \pi^4 + 12(1+\mu^2)\alpha^4 \gamma^2} + \sum_m \sum_n (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{2(m^2 \alpha^2 + n^2 \pi^2)^2}{T} \cos(km)\varphi \sin \frac{n\pi}{l} x \right]$$

где P - радиальное усилие на каждом ролике;

k - количество сил (роликов);

E, μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала раскатываемой втулки;

$\rho = \frac{|D_d|}{2}$; l, h - радиус, длина и толщина стенки втулки;

$\alpha = \frac{2l}{|D_d|}$; $\gamma = \frac{|D_d|}{2h}$; x, φ - цилиндрические координаты;

$$T = (m^2 \alpha^2 + n^2 \pi^2)^4 + 12(1-\mu^2)n^4 \pi^4 \alpha^4 \gamma^2 - m^2 \alpha^4 [2m^4 \alpha^4 + (6+\mu-\mu^2)n^4 \pi^4 + (7+\mu)m^2 \alpha^2 n^2 \pi^2].$$

Расчеты выполнены на ЭВМ для цилиндров диаметром $|D_d|=300$ мм с различными отношениями радиуса к толщине стенки $\gamma = \frac{|D_d|}{2h}$ и длины к радиусу

$$\alpha = \frac{2l}{|D_d|}.$$

Принятое при расчете шарнирное закрепление концов оболочки с бесконечной жесткостью в радиальном направлении не может служить моделью реального крепления втулок при раскатывании вблизи торцов. Из результатов расчета практическое значение имеют прогибы на достаточном удалении от концов оболочки при больших значениях α .

Полагая, что при $\alpha = 6,6$ влияние способа закрепления концов на прогиб в середине не существенно при любом количестве сил, рассчитаем прогибы и построим графики зависимости относительной жесткости от γ при разном количестве радиальных усилий в сечениях, удаленных от торцов. Под жесткостью j при этом понимается усилие, отнесенное к радиальному прогибу оболочки в точке приложения усилия. Полученные графики (рис. 2) показывают, как жесткость возрастает при увеличении толщины стенки и количества приложенных усилий (количества роликов раскатного устройства).

Заслуживает внимания тот факт, что при увеличении количества усилий не во всех случаях монотонно растет жесткость. Превышение определенного количества усилий приводит к общему растягиванию втулки и соответствующему уменьшению жесткости в результате взаимодействия соседних усилий. Например, при отношении радиуса раскатываемой втулки к толщине стенки 23 жесткость одинакова при 12 и 16 усилиях. При уменьшении этого отношения до 16 (более толстостенная гильза) становятся равными жесткости втулок, нагруженных 16 и 8 усилиями и т. д.

Графики 1-7, приведенные на рис. 2, позволяют определить жесткость втулок с наиболее распространенными диаметральными размерами в сечениях, удаленных от торцов. Вблизи торцов жесткость существенно снижается.

Жесткость консольной оболочки, нагруженной радиальными усилиями, действующими в сечениях, лежащих вблизи торца, определяли экспериментально. Испытывали жесткость втулки длиной 600 мм с внутренним диаметром 300 мм. Толщина ее стенки была сначала 15 мм ($\gamma = 10$), затем втулку протачивали снаружи до толщины 10 мм ($\gamma = 15$); 7,5 мм ($\gamma = 20$) и 5 мм ($\gamma = 30$).

Для нагружения втулки изготовлен специальный гидравлический динамометр, имеющий восемь радиально расположенных рабочих цилиндров и нагрузочный цилиндр, вынесенный на противоположный конец центральной оправки. Оправка установлена в подшипниках центровика с конусом для крепления динамометра в пиноли задней бабки токарного станка.

Нагрузку замеряли манометром. При необходимости часть рабочих цилиндров можно было отключать углублением резьбовых упоров, ограничивающих радиальный ход плунжеров. Таким образом, можно варьировать количество точек нагружения. Втулка нагружалась последовательно на расстояниях 5, 10, 100 и 300 мм от торца в 2, 4 или 8 точках. Усилия, прикладываемые в каждой точке, составляли 3, 2 и 1 кН. Усилие ограничивалось по мере уменьшения толщины стенки для предотвращения остаточных деформаций втулки. Упругие деформации втулки измерялись при нагружении в диаметрально противоположных точках двумя микронными индикаторами, установленными на суппорте.

По деформациям и приложенным усилиям рассчитывалась жесткость втулок. Графики изменения жесткости по длине втулок с различной толщиной стенки приведены на рис. 2. Графики показывают, что жесткость вблизи торца при двухроликовой схеме раскатывания примерно в 4 раза ниже жесткости на глубине, равной диаметру, причем на всей этой длине жесткость повышается по мере удаления от торца. Увеличение количества точек нагружения до 4 и тем более до 8 несколько сокращает перепад жесткости до трехкратного и существенно приближает к торцу сечение, в котором жесткость стабилизируется. Представляет интерес полное совпадение опытных значений жесткости, полученных на глубине, равной диаметру втулки, с расчетными значениями, для соответствующих γ и количества усилий. Экспериментальные точки отмечены на рис. 2. Сказанное подтверждает практическую пригодность примененной методики расчета жесткости втулок при раскатывании на глубине, равной диаметру и большей при различном количестве роликов в раскатном устройстве.

Рассматривая шероховатость поверхности как отклонение от номинальной формы детали, можно говорить об обкатывании роликами, как об эффективном способе уточнения микропрофиля деталей машин. В значительно меньшей мере это относится к волнистости, возможность уменьшить которую зависит от соотношения шага волны и размеров зоны деформации. Волна с малым шагом устраняется достаточно эффективно. Соотношением зоны деформации с габаритными размерами обрабатываемой детали определяется возможность уточнения ее размеров и формы в макрообъеме. Для деталей малых размеров процесс обкатывания является процессом холодного формообразования.

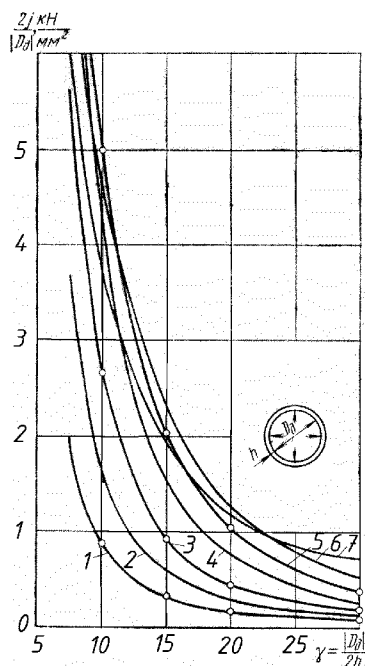


Рисунок 2 - Жесткость втулок в сечениях, удаленных от торцов при двух (1), трех (2), четырех (3), шести (4), восьми (5), двенадцати (6) и шестнадцати (7) радиальных усилиях

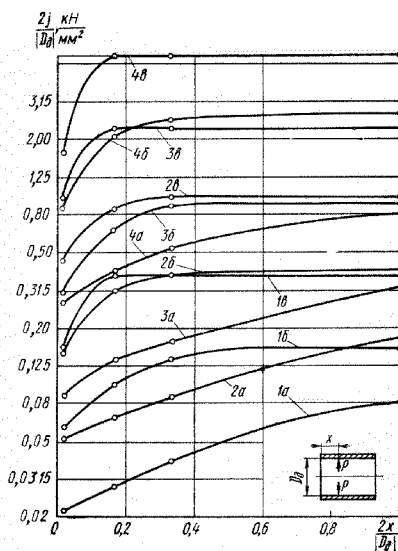


Рисунок 3 - Жесткость втулок вблизи торцов, нагруженных двумя (а), четырьмя (б) и восемью (в) усилиями при $\gamma = 30$ (1), 20 (2), 15 (3), 10 (4)

Допуск на точные валы малых диаметров во много раз меньше усадки, например для диаметра 5 мм шестого качества ISO он составляет всего 0,008 мм. Поэтому из заготовок низкой точности, изготовленных с припуском, не превосходящим усадку, обкатыванием довольно легко получают детали повышенной точности. По мере

увеличения размеров деталей усадка от обкатывания уменьшается. Деформация приобретает поверхностный характер, и на изменении размеров сказывается в основном перераспределение материала микронеровностей, смятие гребешков и заполнение впадин. Обычно изменение диаметров (уменьшение диаметра вала и увеличение диаметра отверстия) заметно превосходит высоту исходных микронеровностей, на которую должен был бы измениться диаметр при полном смятии микронеровностей треугольного профиля. Это объясняется, во-первых, тем, что при измерении диаметров контактные поверхности измерительных инструментов соприкасаются с наиболее выступающими гребешками микронеровностей, т. е. измеряется обычно наибольший описанный диаметр вала и наименьший вписанный диаметр отверстия; во-вторых, тем, что средняя линия микропрофиля поверхности, например после обтачивания, проходит несколько ниже половины высоты микронеровностей, так как вследствие скругления вершины резца форма микронеровностей отличается от треугольной и объем впадин микропрофиля превосходит объем гребешков. Кроме того, на изменение размеров влияют вытяжка поверхностного слоя у краев обкатанного участка и упругая деформация детали от остаточных напряжений.

Если допуск обкатываемой поверхности по величине сравним с ожидаемым изменением диаметра или меньше его, деталь должна быть подготовлена под обкатывание с заданным допуском, но с измененным на величину уменьшения номинального размера в процессе обкатывания в плюс для валов и в минус для отверстий. Практически это означает, что диаметры до 250 мм 8-го качества ISO и все диаметры 7-го качества ISO необходимо корректировать. Детали 8-го качества ISO с диаметром более 250 мм, а также менее точные детали всех размеров обкатывают после изготовления их по окончательным чертежным размерам.

Вопрос о повышении точности, т. е. о сужении поля допуска в результате обкатывания, связан с возможностью регулировать рабочее усилие. Очевидно, что при малой жесткости системы станок - инструмент - деталь, необходимой для обкатывания деталей роликами кругового профиля, когда для успешного проведения операции необходимо сохранение усилия в пределах, ограниченных допустимым углом вдавливания, можно говорить лишь о сохранении точности, полученной на предварительных операциях. Чтобы в результате обкатывания получить уточнение размеров обкатываемых деталей, необходимо использовать схемы высокой жесткости, в которых изменение натяга за счет колебания размеров заготовки вызвало бы заметное изменение усилия и соответствующее изменение усадки. При этом указанное изменение усилия не должно приводить к снижению качества обкатанной поверхности. Этому требованию в наибольшей мере удовлетворяет процесс обкатывания с каплевидной формой контакта роликов прямолинейного профиля. Постоянный угол вдавливания таких роликов предохраняет обкатываемую поверхность от волнистости и позволяет получать требуемое качество поверхности в некотором диапазоне усилий.

Например, при раскатывании отверстий в зависимости от допуска ε_1 на предварительно расточенное отверстие, натяг головки в отверстии изменяется. При высокой жесткости системы инструмент - деталь это изменение вызовет соответственное изменение рабочего усилия, а следовательно, и различные приращения диаметра раскатываемого отверстия. В результате допуск на раскатанное отверстие ε_2 будет меньше, чем в заготовке.

Относительное сужение поля допуска $\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ характеризует уточнение, достигаемое при раскатывании отверстий. Уточнения, необходимые для перевода размера деталей в более высокий класс ISO, приведены в табл. 1. Экспериментально возможность уточнения проверялась при раскатывании отверстий диаметром 46 и 58 мм и длиной 100 мм в толстостенных стальных втулках с наружным диаметром 140 мм

и во втулках из алюминия с наружным диаметром 100 мм. Втулки раскатывали жесткими планетарными головками с пятью роликами диаметром 9 мм. Шероховатость поверхности уменьшается при раскатывании стали с $Rz = 80$ мк до $Ra = 0,63$ мк и с $Rz = 20$ мк до $Ra = 0,32$ мк; для алюминия уменьшение шероховатости еще более значительное – с $Rz = 160$ мк до $Ra = 0,32$ мк и с $Rz = 40$ мк до $Ra = 0,16$ мк.

Таблица 1 - Величины уточнения $\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}$

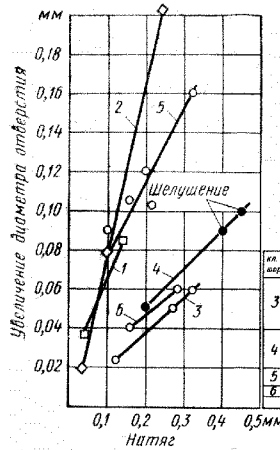
Исходный квалитет ISO	Требуемый квалитет ISO			
	6	7	8	9
6	0			
7	0,33	0		
8	0,5	0,25	0	
9	0,75	0,67	0,5	0
10	0,85	0,78	0,7	0,4

Оптимальным для получения наименьшей шероховатости на стали 20 является натяг 0,2 мм. При натяге около 0,3 мм появляется волнистость поверхности, а при 0,4 мм поверхность начинает шелушиться. На более твердой стали 40Х шероховатость уменьшается вплоть до натяга 0,3 мм, но при этом также появляется волнистость, свидетельствующая о приближающемся начале разрушения поверхностного слоя. Алюминий лучше всего раскатывается при меньших значениях натяга (0,1-0,15 мм). На рис. 4 даны графики изменения диаметра раскатанных втулок в зависимости от натяга. Изменение размеров связано с исходной шероховатостью. Обращает на себя внимание тот факт, что увеличение диаметра отверстий существенно превосходит степень шероховатости. Уточнения по данным рис. 4 составляют для стали при исходной шероховатости $Ra = 2,5$ мк 17,5%, $Rz = 20$ мк - 22,5%, $Rz = 80$ мк - 39 %. Они едва достигают величин, необходимых для перевода отверстий 7 квалитета ISO в 6-й, 8 в 7 и 10 - в 9 (табл. 1). Для алюминиевых втулок уточнение составляет 62 и 85% соответственно для $Rz = 40$ мк и $Rz = 160$ мк, что позволяет рассматривать раскатывание жесткими головками как способ калибровки отверстий в деталях из алюминиевых сплавов, правда, в весьма узком диапазоне натягов. При уменьшенной толщине стенки обкатывание позволяет в некоторых случаях калибровать и стальные детали. При раскатывании с натягом втулок с толщиной стенки менее 20 мм наблюдается увеличение их наружного диаметра (рис. 5), достигающее у втулки с двухмиллиметровой стенкой 0,1 мм. Изменение жесткости и пластическое течение материала, втулок вблизи торцов приводят к искажению их формы. Искажение формы осевого сечения втулок наблюдается у всех раскатанных образцов (рис. 6), причем у толстостенных втулок тем больше, чем толще стенка. Наименее деформированной оказалась втулка с толщиной стенки 4 мм. У втулки с толщиной стенки 2 мм отверстие у торца раскаталось на меньшую величину, чем в глубине, из-за недостаточной жесткости детали на краю. Наружная поверхность исказилась больше у втулок со стенкой толщиной 10 мм. Искажения формы тонкостенных деталей на краях предотвращаются снижением усилий (натягов), за счет уменьшения диаметра роликов и некоторого увеличения заднего угла вдавливания, что позволяет локализовать деформации в более тонком поверхностном слое. Сохранению формы втулок способствует также увеличение количества роликов раскатных головок, повышающее жесткость системы. Необходимое для стабилизации рабочего усилия обкатывания снижение жесткости технологической системы достигается применением инструментов с пружинящими элементами. На рис. 7 показано однороликовое устройство с пружинящим корпусом для обкатывания вала. Важное достоинство инструментов этого типа заключается в их простоте. Требуемое снижение жесткости достигается за счет только изменения конфигурации корпуса без введения дополнительных деталей.

Пружинящий корпус представляет собой консольный, круговой брус прямоугольного поперечного сечения. Его прогиб на уровне оси ролика может быть рассчитан в зависимости от усилия обкатывания P и геометрических размеров b, h, d, l (рис. 8):

$$f = \frac{12 \cdot P}{E \cdot b} \left[\frac{\pi \left(\frac{d}{h} + 1 \right)^3}{16} + \frac{l \left(\frac{d}{h} + 1 \right)^2}{h} + \frac{\pi \left(\frac{l}{h} \right)^2 \cdot \left(\frac{d}{h} + 1 \right)}{2} \right], \quad (4)$$

где E — модуль упругости материала.



1,2 - из алюминия с исходной шероховатостью соответственно $Rz = 40$ мк и $Rz = 160$ мк; 3-5 - из стали 20 с исходной шероховатостью соответственно $Ra = 2,5$ мк, $Rz = 20$ мк и $Rz = 80$ мк; 6 - из стали 40X с исходной шероховатостью $Rz = 20$ мк

Рисунок 4 - Увеличение диаметра отверстий при раскатывании толстостенных втулок

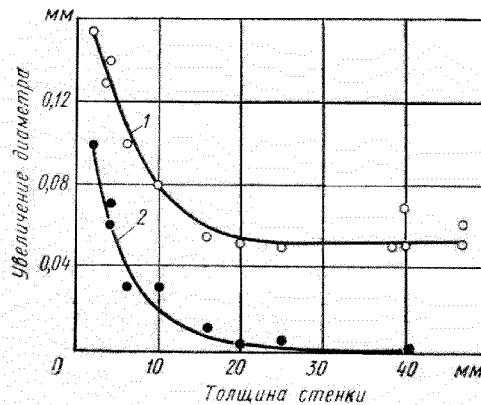
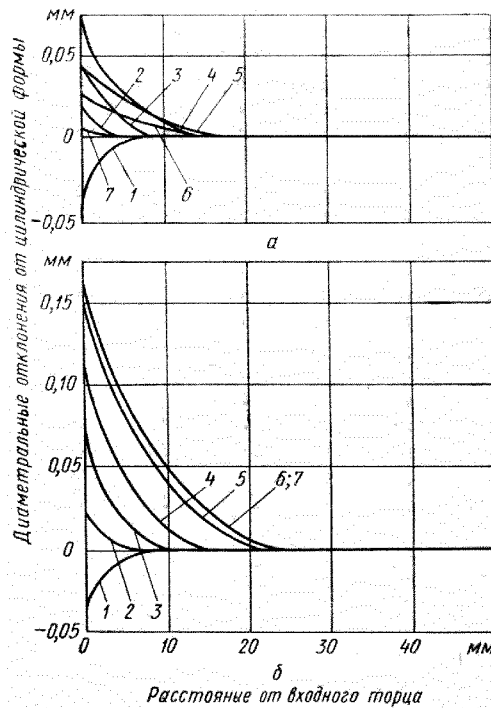


Рисунок 5 - Увеличение внутренних (кривая 1) и наружных (кривая 2) диаметров стальных втулок в зависимости от толщины стенки



1 – 2 мм; 2 – 4 мм; 3 – 6 мм; 4 – 10 мм; 5 – 16 мм; 6 – 25 мм; 7 – 40 мм

Рисунок 6 - Форма наружной (а) и внутренней (б) поверхностей раскатанных втулок диаметром 58 мм у торцов при различной толщине стенки

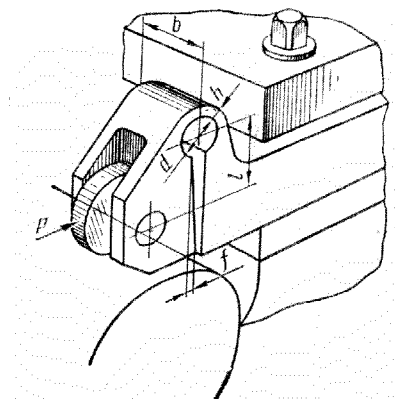


Рисунок 7 - Универсальное однороликовое устройство с пружинящим корпусом

Прогиб от усилия, приходящегося на единицу ширины пружинящей части корпуса, определяется его относительными размерами.

Корпуса подобной формы в продольном сечении и одинаковой ширины при равных прогибах дают одинаковые усилия. Однако прогиб, а следовательно, и допустимое усилие ограничиваются упругостью корпуса:

$$\frac{P}{b} < \frac{\sigma_T h}{1 + \frac{\left(2 \frac{l}{h} + \frac{d}{h} + 1\right) \left(1 - k \frac{d}{h} - k\right)}{k \frac{d}{h} \left(\frac{d}{h} + 1\right)}}$$

(5)

где σ_T - предел текучести материала корпуса; k - коэффициент, определяющий положение нейтрального слоя кругового бруса в зависимости от $\frac{d}{h}$.

Обозначим:

$$c_p = \frac{1}{1 + \frac{\left(2 \frac{l}{h} + \frac{d}{h} + 1\right) \left(1 - k \frac{d}{h} - k\right)}{k \frac{d}{h} \left(\frac{d}{h} + 1\right)}}$$

$$c_f = \frac{12}{E} \left[\frac{\pi}{16} \left(\frac{d}{h} + 1 \right)^3 + \frac{l}{h} \left(\frac{d}{h} + 1 \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{l}{h} \right)^2 \left(\frac{d}{h} + 1 \right) \right];$$

Тогда
$$f = c_f \frac{P}{b}; \quad \frac{P}{b} < c_p \sigma_T h. \quad (6)$$

Значения коэффициентов c_f и c_p в зависимости от $\frac{d}{h}$ и $\frac{l}{h}$ приведены в табл.2; там же приведены и значения $k = F\left(\frac{d}{h}\right)$, необходимые для расчета коэффициентов c_p .

Зависимости $\frac{P}{b} = F(f)$ для корпусов с толщиной пружинящей части $h = 10$ мм в графической форме могут быть получены по рис. 8; они рассчитаны для предела текучести $\sigma_T = 1$ МПа. Луч, проведенный из начала в точку пересечения координат $\frac{P}{b}$ и f , позволяет определить необходимые размеры корпуса. Такая задача решается при конструировании обкатных инструментов. При использовании уже имеющихся устройств графики дают возможность по геометрическим размерам корпусов построить характеризующие их зависимости (4) и (5). На рис. 8 нанесены точки, характеризующие связь усилия с деформацией корпуса размерами $h = 10$, $d = 16$, $l = 80$, $b = 50$ мм. Такой корпус был изготовлен из улучшенной стали 34ХН1М и испытан на прессе. Корпус нагружался различными усилиями, при этом измерялась его деформация. Расчетная прямая зависимостей для этого корпуса - OA . Опытная кривая, проведенная по точкам замеров OB , совпадает с расчетной в зоне упругой деформации и отклоняется от нее правее точки A , соответствующей максимально допустимому прогибу - 3 мм. Корпус таких размеров используют для однорезцовых устройств с рабочим усилием 7 кН, применяемых на токарных станках с высотой центров 200 - 300 мм; жесткость его 0,25 кН/мм.

Таблица 2 - Коэффициенты c_f (верхние значения), c_p (нижние значения) и k в зависимости от размеров пружинящих корпусов

$\frac{l}{h}$	$\frac{d}{h}$											
	0,4	0,5	0,63	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5
1	0,0028 0,044	0,0032 0,0475	0,0035 0,0524	0,0044 0,0515	0,0052 0,0520	0,0067 0,054	0,0086 0,0545	0,0114 0,053	0,0158 0,047	0,0228 0,042	0,0346 0,0375	0,0530 0,0356
1,25	0,0039 0,038	0,0042 0,0415	0,0049 0,0463	0,0058 0,0458	0,0069 0,0465	0,0088 0,0495	0,0110 0,0495	0,0144 0,046	0,0195 0,043	0,0270 0,039	0,041 0,035	0,0615 0,0336
1,6	0,0056 0,0335	0,0062 0,0357	0,0068 0,040	0,0082 0,0393	0,0098 0,0405	0,0123 0,0430	0,015 0,044	0,0191 0,043	0,025 0,0392	0,0350 0,0354	0,051 0,0322	0,0750 0,0312
2	0,0079 0,028	0,0088 0,0307	0,0097 0,0344	0,0120 0,0343	0,0132 0,0353	0,0168 0,0376	0,0200 0,0388	0,0253 0,0383	0,0332 0,035	0,0450 0,0320	0,064 0,0294	0,0914 0,0287
2,5	0,0116 0,0242	0,0127 0,0260	0,0140 0,0294	0,0162 0,0295	0,0186 0,0304	0,0235 0,0330	0,027 0,0340	0,0342 0,0346	0,045 0,0313	0,0585 0,0286	0,082 0,0266	0,1146 0,0262
3,15	0,0171 0,0196	0,0186 0,0180	0,0200 0,0246	0,0235 0,0243	0,0261 0,0258	0,0344 0,0280	0,0396 0,0290	0,0485 0,0292	0,0630 0,027	0,0800 0,0252	0,108 0,0236	0,150 0,0235
4	0,026 0,0164	0,0284 0,0180	0,0312 0,0204	0,0354 0,0206	0,0406 0,0214	0,0510 0,0232	0,058 0,0245	0,070 0,0247	0,087 0,0233	0,112 0,0217	0,150 0,0205	0,202 0,0207
5	0,039	0,0425	0,0465	0,0525	0,060	0,075	0,083	0,101	0,125	0,157	0,207	0,275

	0,0135	0,0149	0,0169	0,0172	0,0180	0,0195	0,0208	0,0210	0,0198	0,0187	0,0179	0,0181
6,3	0,060	0,065	0,0715	0,0800	0,0904	0,114	0,122	0,150	0,184	0,230	0,295	0,385
	0,0112	0,0122	0,0139	0,0141	0,0148	0,0161	0,0174	0,0177	0,0168	0,0159	0,0152	0,0157
8	0,093	0,101	0,110	0,124	0,139	0,176	0,161	0,226	0,276	0,340	0,435	0,560
	0,0089	0,0098	0,0112	0,0114	0,0121	0,0131	0,0141	0,0143	0,0138	0,0133	0,435	0,0133
10	0,144	0,154	0,168	0,188	0,212	0,266	0,290	0,339	0,41	0,500	0,633	0,803
	0,0072	0,0080	0,0092	0,009	0,0099	0,0109	0,0117	0,0120	0,0115	0,0111	0,0108	0,0112
12,5	0,220	0,236	0,260	0,286	0,325	0,405	0,427	0,508	0,610	0,740	0,93	1,17
	0,0059	0,0065	0,0075	0,0076	0,0081	0,0090	0,0095	0,0098	0,0095	0,0092	0,0089	0,0095
16	0,360	0,382	0,416	0,463	0,520	0,650	0,70	0,810	0,97	1,170	1,460	1,81
	0,0047	0,0052	0,0059	0,0061	0,0064	0,0071	0,0076	0,0079	0,0077	0,0075	0,0073	0,0077
<i>k</i>	0,204	0,173	0,149	0,112	0,09	0,072	0,055	0,041	0,028	0,019	0,013	0,0093

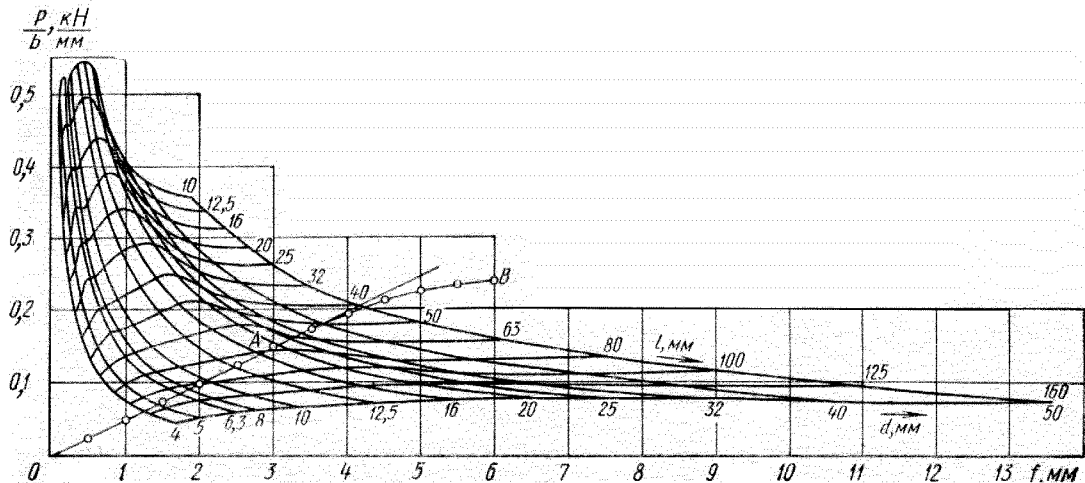


Рисунок 8 - Зависимость усилия обкатывания от прогиба пружинящих корпусов приспособлений с толщиной пружинящей части 10 мм

Если принять жесткость средних токарных станков при обкатывании равной 10 кН/мм, то согласно выражению (3) при $m = 0,25$ колебания жесткости технологической системы уменьшатся не менее чем в 5 раз. Учитывая же работу системы по разгрузочной ветви кривой усилие - отжатие (см. рис. 1), можно ожидать еще большего эффекта. Небольшое биение детали, погрешности ее формы и другие нарушения исходных условий деформации компенсируются соответствующими смещениями ролика за счет незначительных колебаний рабочего усилия обкатывания в пределах упругой деформации корпуса устройства.

Высокая радиальная жесткость системы инструмент – деталь и, как следствие этого, непосредственная зависимость качества поверхности от небольших изменений натяга - серьезный и трудно преодолимый недостаток планетарных многороликовых устройств. Хотя постоянство угла вдавливания роликов с прямолинейной образующей создает им преимущества перед шариковыми жесткими головками, необходимость подготовки обкатываемых деталей в узких допусках для сохранения оптимального натяга служит серьезным препятствием широкому использованию их для обработки деталей большого диаметра. Действительно, если допустить колебания натяга в пределах 0,1 мм, то отверстия диаметром до 260 мм следует обрабатывать под раскатывание по 8 качеству, а при больших диаметрах (от 260 до 500 мм) по 7 качеству ISO независимо от точности, требуемой условиями эксплуатации деталей.

Создание практичной конструкции головок пониженной радиальной жесткости с роликами прямолинейного профиля остается актуальной проблемой, от решения которой зависит расширение номенклатуры раскатываемых деталей.

Список литературы

1. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев - Киев: Наукова думка, 1995. – 256 с.

2. Фукс А.И. Определение оптимального состава гаммы горизонтально-расточных станков / А.И. Фукс, М. Е. Эльясберг. - М.: НИИМАШ, 1969. - 65 с.
3. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин / Э. В. Рыжов - М.: Машиностроение, 1968.-180 с.
4. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В.М. Браславский - М.: Машиностроение, 1975. - 160 с.
5. Бейлард П. П. Напряжения от локальных нагрузок в цилиндрических сосудах давления. // Вопросы прочности цилиндрических оболочек / П. П. Бейлард - М.: Оборонгиз, 1960, - С. 43—65.

В. Бутаков, О.Зубехіна

Вплив жорсткості технологічної системи при обкатуванні роликами деталей на їх точність

В статті описані результати дослідження жорсткості технологічної системи станок-інструмент-деталь при обкатуванні валів і розкочуванні отворів роликами. Описані рекомендації по уточненню розмірів деталей в результаті обкатування їх роликами.

В. Butakov, A. Subekhyina

Influencing of inflexibility of the technological system at rolling by the rollers of details on their exactness

In the article the results of research of inflexibility of the technological system are described machine tool - instrument - detail at rolling of billows and rolling of opening by rollers. Recommendations on clarification of sizes of details as a result of rolling are described by their rollers.

Одержано 10.11.09