

УДК 621.787.4

**УСТРАНЕНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ  
ДЕТАЛЕЙ РОЛИКАМИ**

*Б.И. Бутаков, доктор технических наук, профессор*

*В.А. Артюх, инженер*

*С.С. Креминский, соискатель высшего образования группы  
М2/2маг*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Сформулирована и экспериментально обоснована причина появления волнистости на поверхности при обкатывании торообразными роликами – колебание усилия обкатывания из-за наличия больших сил трения скольжения в механизме нагружения ролика.*

**Ключевые слова:** обкатывание роликом, поверхностно пластическое деформирование, трение скольжения, торообразный ролик.

Основной причиной появления волнистости некоторые исследователи считают наличие торцевого биения ролика, приводящее к переменной подаче обкатывания [1 – 3].

Несмотря на существенное влияние, которое продольная подача вносит в процесс деформации поверхностного слоя, влияние обкатывания на изменение исходной шероховатости при этом остается таким же, как при обкатывании без подачи.

Это проверено экспериментально и остается справедливым при равенстве количества проходов без подачи приведенному количеству проходов  $i$  ролика с подачей, определяющееся в зависимости от ширины контактной канавки  $2a_0$ , подачи  $s$  и количества продольных проходов ролика  $i_{\text{прод}}$ .

$$i = \frac{2a_0}{s} i_{\text{прод}} . \quad (1)$$

При обкатывании с продольной подачей ролика формируется новый микропрофиль поверхности, который накладывается на деформированную исходную шероховатость.

Обкатанная поверхность сохраняет винтовой след подачи ролика. Высота вновь созданных при этом неровностей на участке стабильного процесса может быть рассчитана геометрически:

$$R_z'' = r_p - \frac{\sqrt{4r_p^2 - s^2}}{2}, \quad (2)$$

где  $R_z''$  – высота неровностей, мм;

$r_p$  – радиус кривизны ролика, мм;

$s$  – подача ролика, мм/об.

Шаг этих неровностей равняется подаче ролика (рис. 1). Опытная проверка связи шероховатости с подачей ролика показывает, что зависимость (2) хорошо соблюдается при относительно больших подачах.

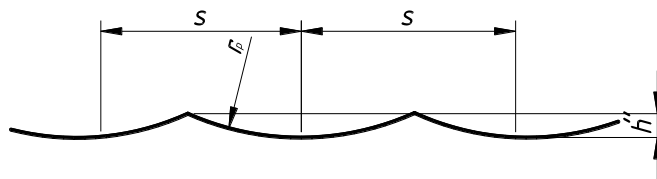


Рис. 1. Профиль неровностей при обкатывании роликом

При подачах больше 0,78 мм/об высота неровностей совпадает с расчетной; при меньших подачах высота сохраняется в пределах 0,28 - 0,35 мкм и от подачи не зависит. В этом случае на обкатанной поверхности образуется волна с шагом, отличным от подачи.

В этом случае высота волн не выходит из пределов 7-го класса шероховатости. В других случаях волнистость при обкатывании может быть значительно глубокой. При малой шероховатости поверхности в пределах одного шага волны (0,18 мкм) сама волна с шагом 2,5 мм имеет высоту 0,16 мкм.

Высота волны при обкатывании уменьшается с увеличением профильного радиуса ролика или с уменьшением усилия, то есть с уменьшением угла вдавливания ролика, и не зависит от подачи и скорости обкатывания.

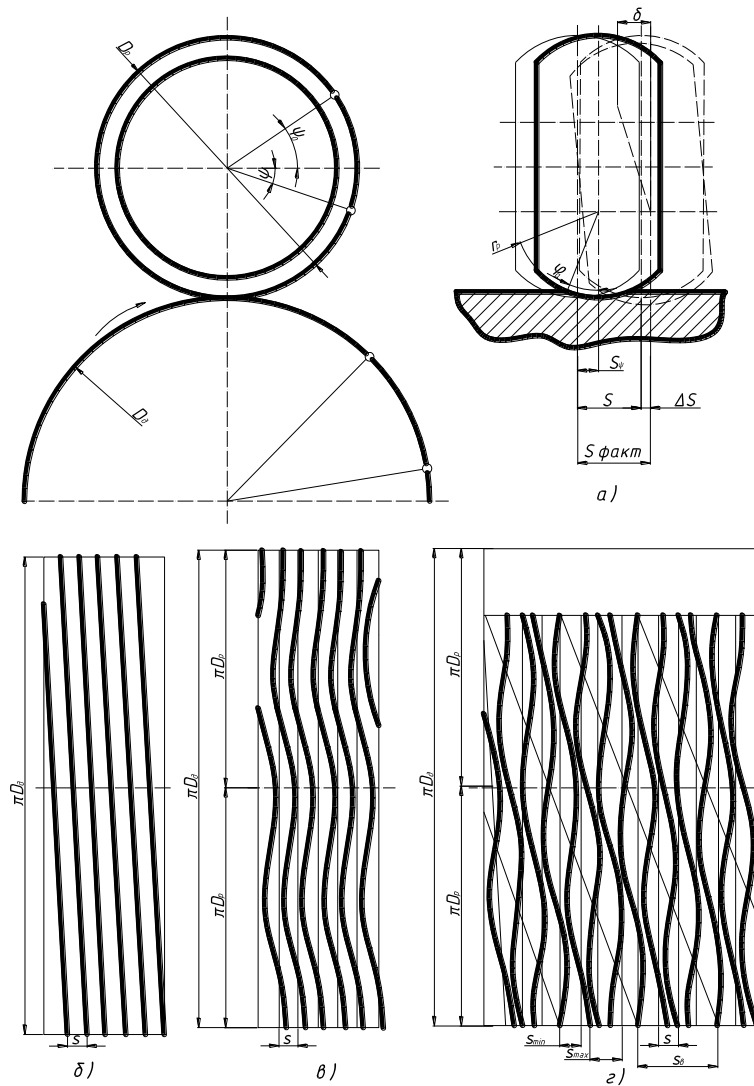


Рис. 2. Образование волнистости поверхности при обкатывании:  
*а* – изменение подачи при осевом биении ролика, *б* – развертка поверхности вала, обкатанного роликом, не имеющим осевого биения, *в* – развертка поверхности вала, обкатанного роликом с осевым биением при кратных диаметрах детали и ролика, *з*, – развертка поверхности вала, обкатанного роликом при некратных диаметрах детали и ролика

Рассмотрим этот процесс подробнее. Автор работы [1] считает что по мере вращения детали ролик вращается и подается (рис. 2, а), при этом углу поворота ролика  $\psi$  соответствует угол поворота детали  $\psi D_p/D_d$  и подача ролика на величину, определяющаяся следующим выражением:

$$S_\psi = s \frac{\psi}{2\pi} \cdot \frac{D_p}{D_d}, \quad (3)$$

где  $s$  – подача ролика на один оборот детали, мм.

Развернем поверхность детали на плоскость. В случае идеальной схемы контактная канавка постоянного профиля шириной  $2a$  расположится на обкатанной поверхности в виде параллельных прямых с постоянным шагом, равным подаче (рис. 2, б). Для реальной детали и ролика схема может существенно измениться.

Рабочая поверхность ролика из-за погрешности изготовления и установки может иметь некоторое осевое и радиальное биение (рис. 2, а). След ролика на развертке обрабатываемой поверхности становится криволинейным.

В результате биения изменяется фактическая подача ролика

$$S_{\text{факт}} = s + \Delta s. \quad (4)$$

Искажение подачи при рассматривании двух смежных следов ролика будет равняться

$$\Delta s = \frac{\delta}{2} \sin\left(\psi_0 + \psi + 2\pi \frac{D_d}{D_p}\right) - \frac{\delta}{2} \sin(\psi_0 + \psi) = \delta \cos\left(\psi_0 + \psi + \pi \frac{D_d}{D_p}\right) \cdot \sin \pi \frac{D_d}{D_p}. \quad (5)$$

В случае кратности диаметров детали и ролика  $\sin \pi D_d/D_p$ , а следовательно, и  $\Delta s$  равняются нулю, то есть подача остается постоянной, несмотря на биение ролика (рис. 2, в).

В общем случае  $\Delta s$  является переменной величиной, зависящей в каждой точке поверхности от угла поворота ролика  $\psi$ . Найдем значение угла  $\psi$ , что отвечает наибольшему и наименьшему приращениям подачи. Для этого приравняем к нулю производную функции  $\Delta s = f(\psi)$ :

$$\Delta s' = -\delta \sin \pi \frac{D_o}{D_p} \cdot \sin \left( \psi_0 + \psi + \pi \frac{D_o}{D_p} \right) = 0. \quad (6)$$

Последнее равенство удовлетворяется при

$$\psi_0 + \psi + \pi \frac{D_o}{D_p} = \pm \pi n,$$

де  $n = 0; 1; 2; 3; \dots$

Отсюда

$$\psi = \pi \left( \pm n - \frac{D_o}{D_p} \right) - \psi_0. \quad (7)$$

Подставив найденное значение угла в равенство (5), найдем экспериментальные значения приращения подачи

$$\Delta s_{min}^{max} = \pm \delta \sin \pi \frac{D_o}{D_p}. \quad (8)$$

Из формулы (5) видно, что полный цикл изменения  $\Delta s$  завершается за каждый оборот ролика. При вращении детали участки, обкатанные с одинаковой фактической подачей, смещаются по ее поверхности, как в осевом, так и в круговом направлениях. При этом участки, обкатанные с уменьшенной против номинала подачей, деформируются сильнее и образуют впадину, а обкатанные с увеличенной фактической подачей и менее деформированные – гребень волны. Сливаясь в процессе обкатывания одинаково деформированные участки создают многозаходную винтовую поверхность с определенным шагом – шагом волны (рис. 2, з)

При обкатывании деталей цилиндрическими роликами на их поверхности получают прямоугольный отпечаток, если оси ролика и детали параллельны. В этом случае длина отпечатка на цилиндрической детали определяется длиной ролика или длиной образующей цилиндрической поверхности, ширина отпечатка зависит от приведенной кривизны ролика и детали в плоскости качения ролика. Если оси ролика и детали в осевом их пересечении наклонены под небольшим углом, или

вместо цилиндрического ролика применен конический, то на детали получают каплевидный отпечаток, ширина которого уменьшается до нуля в направлении обкатанной поверхности. При этом получают задний угол вдавливания ролика в деталь  $\varphi_a$  (рис. 3) равным  $25' - 30'$  при обкатывании сталей,  $40' - 1^\circ$  - при обкатывании закаленных сталей и  $1^\circ 30'$  - при обкатывании чугунов [1, 2, 3 - 5].

При таких значениях угла  $\varphi_a$  обеспечивается интенсивная деформация микронеровностей и поверхностного слоя, волнистость на обкатанной поверхности отсутствует. Такой процесс применяют при обкатывании валов и розкатывании цилиндрических отверстий в крупносерийном и массовом производствах.

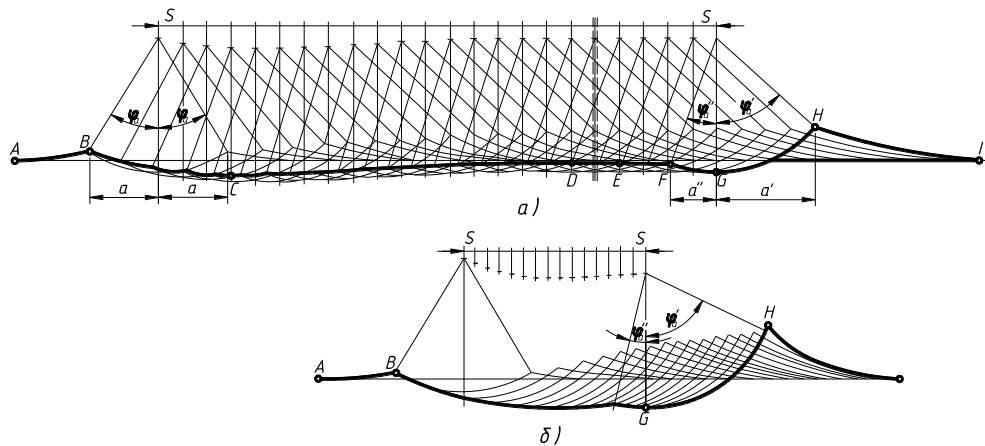


Рис. 3. Схема последовательного деформирования поверхности деталей при обкатывании торообразным роликом с продольной подачей  $S$ :  
 $a$  – при нормальном процессе;  $b$  – процесс деформации не стабилизировался

Каплевидный отпечаток может быть получен и при применении самоустанавливающегося цилиндрического ролика. С помощью силы подачи, возникающей в процессе обкатывания, ролик за счет поворота самоустанавливающейся головки на угол  $20' - 30'$  обеспечивает получение каплевидного отпечатка [6 - 8].

В том случае, когда оси цилиндрического ролика и детали перекрещиваются, на ней возникает эллиптический отпечаток. Такой же отпечаток может быть получен при обкатывании деталей бочкообразными, сферическими или торообразными роликами.

Во время обкатывания роликом отпечаток превращается в пластично деформированную канавку, которая при обработке цилиндрических поверхностей с подачей представляет собой винтовую линию. Так как

ширина канавки в несколько раз превышает подачу, то при последующих оборотах детали ролик прокатывается по уже деформированной поверхности, несколько расширяя и углубляя канавку.

При нормальном процессе обкатывания торообразным роликом после некоторого числа оборотов детали углубление канавки прекращается (рис. 3, *a*). Ролик соприкасается с каждой точкой поверхности  $2a/s$  раз. Перед роликом возникает волна деформированного металла, а расширение контактной канавки приводит к возрастанию контакта, что обуславливает постепенное снижение глубины канавки при последующих оборотах детали и на участке  $CD$  процесс обкатывания стабилизируется. Волна металла перед роликом  $GHI$  намного больше волны  $EFG$  за ним. На всем участке обкатывания до его стабилизации в точке  $D$  изменяется угол вдавливания ролика  $\varphi_a$ .

Процесс поверхностного деформирования зависит от силы обкатывания, размеров и профиля ролика, размеров обрабатываемой поверхности, механических свойств обкатываемого металла и числа  $2a/s$ . При некоторых сочетаниях указанных факторов стабилизация процесса может и не наступить.

Например, на рис. 3, *b* интенсивный рост волны металла перед роликом продолжается до тех пор, пока гребень волны не начнет разрушаться. Участок поверхности ниже остальной обкатанной поверхности. Имеется соотношение [1, 6 - 11] для расчета ширины впадины в начале обкатанной поверхности:

$$L_b = 1,27 \sqrt{\frac{P}{HB}}, \quad (9)$$

где  $P$  – усилие обкатывания,  $H$ .

При больших углах  $\varphi_a$  вдавливания ролика на обкатанной поверхности детали появляется волнистость с шагом, отличным от величины подачи ролика.

Для предотвращения появления волнистости при чистовом обкатывании рекомендуют принимать угол вдавливания значением  $2 - 3^\circ$  (что, однако, ограничивает шероховатость обкатанной поверхности величиной  $40 < R_z < 80$  мкм, а для уменьшения волнистости – использовать ролики с точным рабочим профилем и чаще их перешлифовывать. При упрочняющем обкатывании тонкий поверхностный слой для исключения волнистости поверхности сошлифовывают или стачивают, это существенно уменьшает эффективность упрочнения. Заметим, что силы трения в опорах, суммируясь с рабочим усилием пружинящего элемента обкатного устройства, влияют на величину усилия  $P$ ; при наличии же радиального биения ролика эти силы трения в процессе обкатывания становятся переменными по величине и направлению.

С целью проверки данных представлений с помощью универсального динамометра УДМ конструкции ВНИИ нами были измерены составляющие усилия  $P$  при обкатывании торообразным роликом вала из наиболее распространенной конструкционной стали 40 (200 НВ) диаметром 100 мм на токарном станке с помощью разработанного и изготовленного на кафедре “Транспортных технологий и технического сервиса” Николаевского НАУ устройства рычажного типа со стабилизацией рабочего усилия обкатывания, показанного на рис. 4 [12].

Принцип работы устройства заключается в следующем: ролик 7 установлен с помощью подшипников 12, 13 на оси 11. Усилие пружины 5 через тягу 4, ось 8 и рычаг 6 передается на ролик 7 и передается на



обкатываемую деталь. Рычаг 6 установлен на оси 9 с помощью игольчатого и упорных подшипников, и легко перемещается вокруг корпуса 10

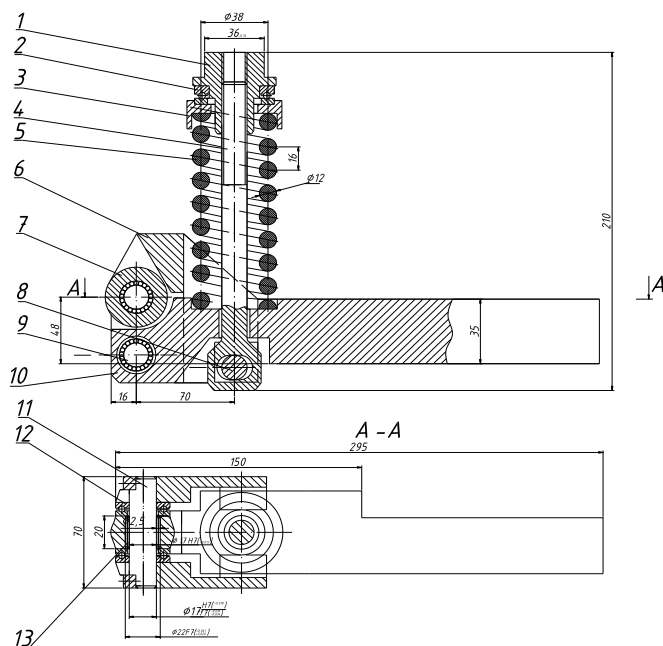


Рис. 4. Конструктивная схема устройства для обкатывания деталей торообразным роликом со стабилизацией рабочего усилия обкатывания

Общий вид устройства для обкатывания роликом со стабилизацией рабочего усилия обкатывания представлен на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид устройства для обкатывания деталей торообразным роликом со стабилизацией рабочего усилия обкатывания

Жесткость рычажно-пружинного механизма составляет 0,745 кН/мм. Усилие пружины ( $P_{np}$ ) определяется величиной ее сжатия ( $f_{np}$ ) в миллиметрах и рассчитывается по зависимости:

$$P_{np} = j_{np} \times f_{np}, \quad (10)$$

где  $j_{np}$  – жесткость пружины,  $j_{np} = 0,472$  кН/мм.

Усилие  $P$  обкатывания на ролике в кН определяют по зависимости:

$$P = P_{np} \times 60/38 = f_{np} \times 0,472 \times 60 / 38 == 0,745 f_{np} \quad (11)$$

где 60 и 38 величины плеч усилия пружины и усилия на ролике соответственно в миллиметрах.

На рис. 6 показана схема действия составляющих усилия обкатывания на деталь.

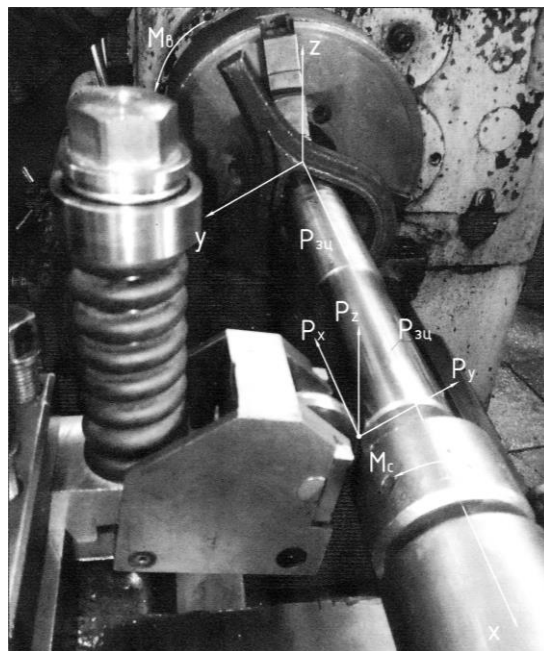


Рис. 6. Составляющие усилия обкатывания на деталь:

$P_x$  – касательное усилие качения ролика;  $P_y$  – номинальное усилие поджатия ролика к детали;  $P_z$  – усилие подачи;  $P_{зц}$  – нагрузка от задней бабки в осевом направлении

На рис. 7 показана осциллограмма составляющих усилия  $P$ , полученная при установке роликового узла на опорах скольжения, т.е.

применительно к конструкции устройств, используемых на заводах для упрочняющего или чистового обкатывания стальных деталей.

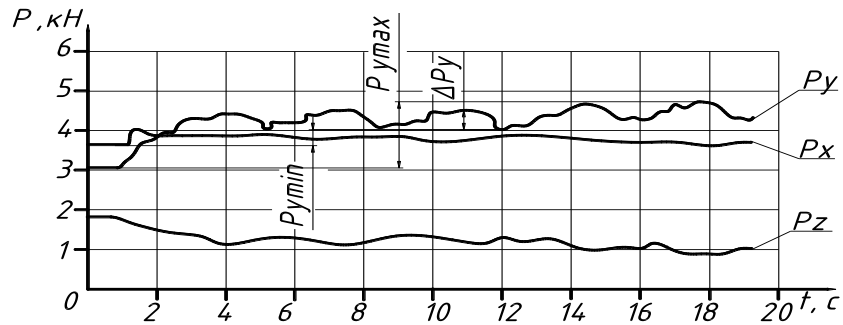


Рис. 7. Осциллограмма составляющих усилия обкатывания  $P$  при установке роликового узла на опорах скольжения

Номинальное значение усилия поджима ролика к детали,  $P_{yn} = 5 \text{ кН}$ , а соотношение:  $P_{xn} : P_{yn} : P_{zn} = 0,15 : 5 : 1,5$ . Сила  $P_x$  в процессе обкатывания остается практически постоянной, а силы  $P_y$  и  $P_z$  с каждым оборотом ролика периодически изменяются; амплитуда колебания силы  $P_y$  составляет  $\Delta P_y = 0,45$ , а сила  $P_z$  (в направлении подачи) изменяется менее заметно. При установке роликового узла на подшипниках качения, как показали измерения,  $\Delta P_y < 0,03 P_{yn}$ , а колебания сил  $P_x$  и  $P_y$  практически не обнаружены.

Коэффициент трения в подшипниках скольжения составляет  $f_c = 0,05 \div 0,1$ , а в подшипниках качения  $f_k = 0,003 \div 0,008$ , поэтому стабилизация силы  $P$  при установке роликового узла на подшипниках качения достигается существенным уменьшением сил трения в опорах. Силы трения в опорах, складываясь с рабочим усилием пружинящего элемента обкатного устройства, влияют на величину усилия  $P$  обкатывания; при наличии же радиального биения ролика силы трения в процессе обкатывания становятся переменными по величине и направлению. Это позволило предположить, что основной причиной появления волнистости является наличие колебания усилия  $P$  обкатывания при каждом обороте ролика в результате его радиального биения.

Рассчитаем шаг волны  $S_w$  при некратных отношениях  $D_\partial/D_p$ . Точками на развертке следа ролика при качении его по детали отмечены места максимального значения усилия  $P$  (рис. 8).

Точки, сдвигаясь по поверхности детали, образуют винтовые линии с шагом  $S_w$ , превосходящим величину  $S$  подачи ролика. Вдоль этих линий деформация металла поверхностного слоя детали получается большей, чем в промежутках между ними, чем и определяется появление волнистости.

Из подобия треугольников  $ABC$  и  $A_1B_1C$  получим

$$S_w = D_p S / (D_p N - D_\partial), \quad (12)$$

где:  $N = D_\partial/D_p + 1$  (здесь  $D_\partial/D_p$  - целая часть отношения). Данное выражение справедливо для случая, исключая проскальзывание ролика по детали при их взаимном вращении, при наличии скольжения фактический шаг волны может значительно отличаться от расчетного. Разворотом оси ролика вокруг перпендикуляра к поверхности контакта в ту или другую сторону можно изменить степень проскальзывания ролика и тем самым повлиять на величину  $S_w$ .

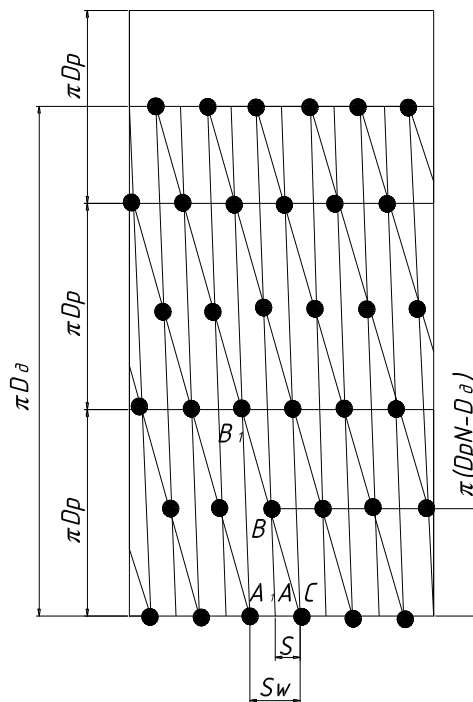


Рис. 8. Схема расчета шага  $S_w$  волны при обкатывании роликами

Стабілізують з допомогою установки роликового узла на підшипниках качення зусилля  $P$  можна виключити появу хвилястості при великих кутах вдавлювання, які властиві навіть упрочнюванню обкатуванню. При цьому вдасться отримати шорховатість поверхності  $R_a = 0,08 - 0,32$  мкм при початковій  $R_z = 80 - 160$  мкм, і крім того, поєднати чистове і упрочнювальне обкатування.

Представлені на рис. 9 профілограми поверхності вала з найбільш м'якої з всіх конструкційних сталей, 20,  $HV 140$  (при обкатуванні цієї сталі має місце максимальна хвилястість обробленої поверхності) до обкатування і після при  $P_{ун} = 5$  кН,  $S = 0.2$  мм/об деталі,  $D_d = 117$  мм,  $D_p = 60$  мм, свідчать про ефективність установки роликового узла на підшипниках качення.

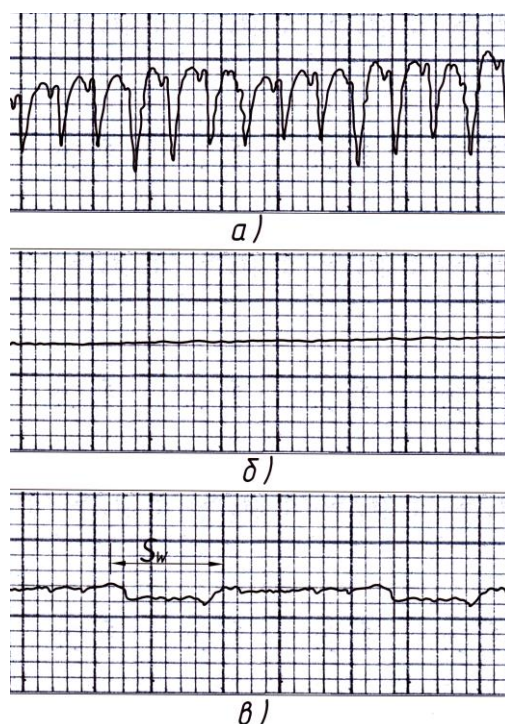


Рис. 9. Профілограми поверхності вала з сталі 20:

$a$  – до обкатування  $R_z = 100$  мкм;  $б$  – після обкатування при установці роликового узла на підшипниках качення ( $R_a = 0,08 - 0,16$  мкм);  $в$  – після обкатування при установці роликового узла на опорах скольження

На кривой (рис. 9, в) видна волнистость на обкатанной поверхности с шагом  $S_w = 3,9$  мм, что соответствует значению  $S_w$ , рассчитанному по формуле (12). Эффективность обкатывания может быть повышена также за счет применения роликов малого диаметра (бочкообразных и цилиндрических), что полностью исключает появление волнистости и при трении скольжения роликового узла в устройстве в следствии малости угла  $\varphi_a$ . Разработан и исследован способ стабилизации усилия обкатывания при установлении роликового узла на опорах качения, что позволяет устранить появление волнистости обкатыванием торообразными роликами при больших средних углах вдавливания роликов ( $\varphi \leq 5^\circ$ ) и совместить упрочняющее и чистовое обкатывание.

### Литература

1. Браславский В. М. 1975. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. 2-е изд. – М.: Машиностроение, – 160.
2. Азаревич Г. М. 1963. Чистовая обработка цилиндрических поверхностей пластическим деформированием / Г. М. Азаревич, Г. Ш. Берштейн - М.: ОНТИ НИИ Тракторсельхозмаша, - 43.
3. Браславский В. М. 1975. Технология обкатки крупных деталей роликами / Браславский В. М. - М.: Машиностроение, - 160.
4. Одинцов Л. Г. 1987. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л. Г. Одинцов – М.: Машиностроение, – 160.
5. Рыжов Э. В. 1971. Повышение износостойкости соединений технологическими методами обработки / Рыжов Э. В., Браславский В. М., Топычканов В. В. Науч. – тех. сб. Брян. ин – та транспорт. Машиностроения. – №2. — С. 47 — 51.
6. Рыжов Э. В. 1972. Влияние усилия обкатывания на геометрию неровностей / Рыжов Э. В., Браславский В. М., Топычканов В. В. Науч. – тех. сб. Брян. ин – та транспорт. Машиностроения. – №2. — С. 47 — 51

7. Рыжов Э. В. 1979. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П. – Л.: Машиностроение, – 176с.
8. Шнейдер Ю. Г. 1982. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Шнейдер Ю. Г. – Л.: Машиностроение, – 248с.
9. Коновалов Е. Г. 1968. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей / Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А.–Минск: Высшейш. шк.,–364с.
10. Кудрявцев И. В. 1984. Новые способы поверхностного пластического деформирования / И. В. Кудрявцев, Р. Е. Грудская. Машиностроитель, № 7, 28-29.
11. Фридман Я. Б. 1987. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман — М.: Машиностроение, — 556.
12. Пат. 71119 Україна, МПК В24В 39/00. Пристрій для зміцнюючого та чистового обкатування поверхонь тіл обертання зі стабілізацією робочого зусилля / Б. І. Бутаков, В. О. Артюх; заявник і власник Бутаков Б. І. – № u201112463; заявл. 24.10.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13.

Усунення волнистості при обкатуванні деталей роликами. Б.И. Бутаков, В.А. Артюх, С.С. Креминский

*Сформульована і експериментально обґрунтована причина появи хвилястості на поверхні при обкатуванні Торообразная роликами - коливання зусилля обкатування через наявність великих сил тертя ковзання в механізмі навантаження ролика.*

Waviness elimination at obkatuvanni parts rollers. B.I. Butakov, V.A. Artyukh, S.S. Kreminskiy

*Formulated and experimentally proved the cause of the undulations on the surface at obkatyvani toroidal roller - swing obkatyvani efforts because of the large forces of friction in the mechanism of the loading roller.*