

Артюх В.А.,  
Марченко Д.Д.  
Николаевский национальный  
аграрный университет  
г. Николаев, Украина  
E-mail: marchenkodd1984@gmail.com

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОБКАТЫВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ РОЛИКАМИ

УДК 621.787.4.

*Проведены исследования по выбору оптимального усилия обкатывания, установлено, что значение среднего давления  $p$  для торообразных, бочкообразных и цилиндрических роликов, определенное при разных средних углах вдавливания  $\varphi$ , отклоняется от твердости по Мейеру не более чем на 7%. Это позволяет принять при расчете усилия обкатывания  $P$  торообразными, бочкообразными и цилиндрическими роликами в качестве условия подобия постоянство среднего угла вдавливания  $\varphi$ , а также установлены оптимальные углы вдавливания для чистового и упрочняющего режима обкатывания и экспериментально определено оптимальное погонное усилие обкатывания в зависимости от диаметра ролика, которое обеспечит шероховатость поверхности на обработанной детали  $R_a = 0,63 - 1,25$  мкм.*

**Ключевые слова:** обкатывание, ролик, средний угол вдавливания, твердость, стабилизация усилия, приведенная кривизна, погонное усилие.

**Введение.** К основным элементам режима обкатывания роликами относят усилие, подачу, скорость и количество проходов. Усилие обкатывания в многосерийном и массовом производствах определяется опытным путем на пробной партии деталей [1].

В условиях единичного и мелкосерийного производства находят применение методики, которые позволяют назначить усилие обкатывания в зависимости от геометрических размеров детали и ролика, а также механических свойств обкатываемого материала [1]. Ю. Г. Проскуряков на основе экспериментальных исследований предложил метод расчета усилия обкатывания валов и отверстий шариком и роликом с прямолинейной образующей. Усилие определяется в зависимости от геометрических размеров ролика и детали, модуля упругости обкатываемого материала и максимального давления в контакте при обкатывании.

**Основной материал.** Измерения отпечатков, полученных при разных усилиях вдавливания и разных размерах деталей и роликов, показали, что форма эллипса характеризуется отношением полуосей  $v/a$ , значения которых рассчитаны по известным формулам теории упругости. На рис. 1 приведен график зависимости формы отпечатка ( $v/a$ ) от соотношения кривизны детали и ролика [2].

Нами в основу расчета усилия обкатывания положена зависимость, которая связывает усилие вдавливания шарика с диаметром отпечатка, который рассчитывается по формуле Мейера [3, 4].

$$P_{ш} = md_0^n = mD_{ш}^n \sin^n \varphi, \quad (1)$$

где  $P_{ш}$  – сила вдавливания шарика;  $d_0$  – диаметр отпечатка;  $D_{ш}$  – диаметр шарика;  $\varphi$  – угол вдавливания (рис 1);  $m$  и  $n$  – константы Мейера, соответственно зависящие от диаметра шарика, свойств обрабатываемого материала и от способности материала к наклепу.

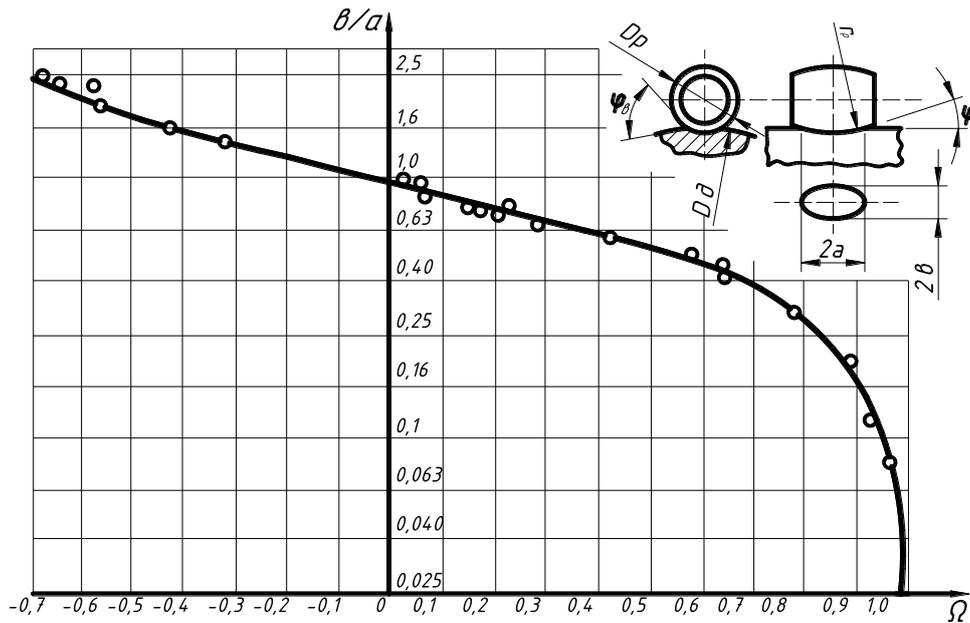


Рис. 1 – Зависимость формы отпечатка от размеров детали и ролика ( $\Omega = (2/D_p + 2/D_o - 1/r_p - 1/R)/(2/D_p + 2/D_o + 1/r_p + 1/R)$ ), где  $D_p, r_p$  – диаметр и профильный радиус ролика,  $D_o, R$  – диаметр и радиус кривизны образующей детали)

При изменении диаметра шарика, когда соблюдается постоянство угла вдавливания, усилие изменяется пропорционально площади отпечатка (закон подобия)

$$\frac{P}{F} = \frac{P_u}{F_i} = const. \quad (2)$$

При разных углах вдавливания равенство (2) не соблюдается, потому что удельное давление зависит от угла вдавливания шарика. Так как отпечаток ролика на поверхности детали имеет форму эллипса (рис 1) для сравнения усилия вдавливания ролика и шарика условие подобия заменено равенством среднего угла вдавливания

$$\frac{\varphi_a + \varphi_v}{2} = \varphi, \quad (3)$$

где  $\varphi_a, \varphi_v$  – углы вдавливания ролика соответственно в осевом и продольном сечениях.

В предположении, что при условии (3) усилия пропорциональны площадям отпечатков, запишем с учетом (1)

$$P = P_u \frac{F}{F_u} = 4m D_u^{n-2} \sin^{n-2} \varphi a v, \quad (4)$$

где  $a, v$  – полуоси отпечатков соответственно в осевом и поперечном сечениях (рис. 1).

Значения  $m$  и  $n$  определены в работе [2] для разных сталей и диаметров шарика;  $n = 2,3$  для  $D_u = 60$  мм и стали 20 (140 HB),  $m = 0,44$  кН/мм (значение  $D_u, a$  и  $v$  приведены в мм,  $P$  – в кН).

Экспериментально установлено, что при обкатывании без продольной подачи с углами вдавливания  $5 - 6^\circ$  шероховатость поверхности уменьшается на 5-7 классов. Впрочем, использование таких углов вдавливания считают в работе [3] при обкатывании с подачей роликов недопустимым из-за волнистости обкатанной поверхности. Полуось отпечатка ролика на детали будет равна

$$a = r_p \sin \varphi_a. \quad (5)$$

Формулу (4) преобразуем с учетом (5):

$$P = 4m D_u^{n-2} \sin^{n-2} \varphi \sin^2 \varphi_a \frac{v}{a} r_p^2. \quad (6)$$

Основным параметром, который определяет чистовой или упрочняющий режим обкатывания, является усилие вдавливания ролика.

С целью проверки применимости формулы (3) в зависимости Мейера (формула 1), для значительно вытянутых отпечатков, когда  $a \gg b$  осуществлено экспериментальное вдавливание шариков, торообразных, бочкообразных и цилиндрических роликов в стальные образцы с разными усилиями на прессе Бринелля.

При вдавливании цилиндрических роликов с целью получения равномерной деформации металла по длине роликов была обеспечена их самоустановка по поверхности образца. Для того, чтобы уменьшить влияние концентрации напряжений вблизи концов цилиндрических роликов на величину напряжений в средней части отпечатка, где происходило измерение его ширины, длина цилиндрических роликов была принята равной ширине образцов и в несколько раз превышала диаметр роликов.

После вдавливания роликов размеры отпечатков измерены на инструментальном микроскопе с точностью 0,005 мм и рассчитывалось среднее давление  $P$  (в МПа). Это значение, умноженное для круговых отпечатков на  $10^3$ , является твердостью по Мейеру  $HM$ . Зависимость  $HM$  от угла  $\varphi$  (в интервале  $2 - 25^\circ$ ) для сталей различной твердости аппроксимировали зависимостью,  $HM = \gamma e^{\beta_1 \cdot \varphi} \varphi^{\beta_2}$ , где  $e$  – основание натуральных логарифмов, значения  $\gamma$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $\gamma$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$

$HB$	$\gamma$ , НМ/град	$\beta_1$ , град <sup>-1</sup>	$\beta_2$
128	33,4	-0,0137	0,53
176	56,7	-0,017	0,49
202	86,7	-0,019	0,42
341	190,2	-0,02	0,21

Прологарифмировав уравнение регрессии, получим:

$$\lg HM = \lg \gamma + \beta_1 \varphi \lg e + \beta_2 \lg \varphi.$$

Введя обозначения  $y = \lg HM$ ;  $\epsilon_1 = \beta_1 \lg e$ ;  $\epsilon_2 = \beta_2$ ;  $a_1 = \lg \gamma$  имеем:

$$y = a_1 + \epsilon_1 \varphi + \epsilon_2 \lg \varphi, \quad (7)$$

где  $y$  – среднее давление в отпечатке;  $\varphi$  – средний угол вдавливания.

Оценки коэффициентов  $a_1$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  линейной регрессии определяются в соответствии с методом наименьших квадратов [5] по формулам:

$$a_1 = \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad (8)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (\varphi_i - \bar{\varphi}) \cdot \sum_{i=1}^n (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i}) \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi}) (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i})}{D_{\varphi, \lg \varphi_i}};$$

(9)

$$\epsilon_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi}) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i}) - \sum_{i=1}^n (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i}) \cdot (\varphi_i - \bar{\varphi}) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (\varphi_i - \bar{\varphi})}{D_{\varphi, \lg \varphi_i}}; \quad (10)$$

$$D_{\varphi, \lg \varphi_i} = \sum_{i=1}^n (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2 - \left( \sum_{i=1}^n (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i}) \cdot (\varphi_i - \bar{\varphi}) \right)^2,$$

где  $\bar{\varphi}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i$ ;  $\overline{\lg \varphi_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \varphi_i$ .

Оценки дисперсий коэффициентов определяются:

$$S_a^2 = \frac{S^2}{n}; \quad (11)$$

$$S_{\epsilon_1}^2 = S^2 \frac{\sum_{i=1}^n (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i})^2}{D_{\varphi_i \lg \varphi_i}}; \quad (12)$$

$$S_{\epsilon_2}^2 = S^2 \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \overline{\varphi_i})^2}{D_{\varphi_i \lg \varphi_i}}; \quad (13)$$

$$S_{\epsilon_1 \epsilon_2} = -S^2 \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \overline{\varphi_i}) \cdot (\lg \varphi_i - \overline{\lg \varphi_i})}{D_{\varphi_i \lg \varphi_i}}; \quad (14)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-3} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i + \epsilon_1 \cdot \varphi_i + \epsilon_2 \cdot \lg \varphi_i - y_i)^2. \quad (15)$$

После статистической обработки результатов получена зависимость среднего давления на отпечатке от среднего угла вдавливания для сталей различной твердости показана на рис. 2.

Значение  $P$ , умноженное на  $10^3$  для торообразных, бочкообразных и цилиндрических роликов, вычисленное при различных углах вдавливания  $\varphi$ , рассчитанных по формуле (3), отклоняется от твердости по Мейеру не более чем на 7%. Это позволяет принять при расчете усилия обкатывания  $P$  торообразными, бочкообразными и цилиндрическими роликами в качестве условия подобия постоянство угла вдавливания  $\varphi$ .

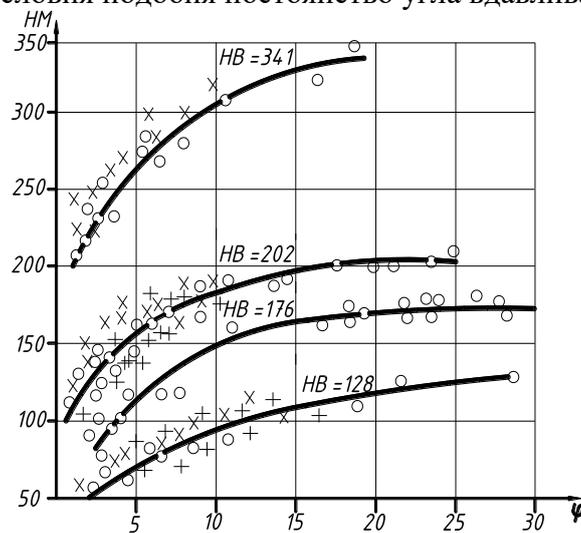


Рис. 2 – Зависимость среднего давления на отпечатке от среднего угла вдавливания:  
 о – отпечатки шариков; х – отпечатки торообразных и бочкообразных роликов; + – отпечатки цилиндрических роликов

При обкатывании деталей бочкообразными роликами малого диаметра, дающими вытянутые отпечатки, а также торообразными роликами, с установкой роликового узла на опорах качения [6], усилие  $P$  и угол  $\varphi_a$  могут быть увеличены, а при отношении осей отпечатка  $v/a < 0,25$  должны быть уменьшены во избежание шелушения обкатанной поверхности в результате перенаклепа. Начало шелушения обкатанной поверхности зависит от механических свойств обкатываемого материала, формы микронеровностей, условий смазки и режима обкатывания. Ограничивая средний угол вдавливания  $\varphi = 5^0$  можно предотвратить шелушение при большем или меньшем числе проходов.

Подставив в формулу (3) значения полуосей  $a$  и  $b$ , записанные с учетом малости углов  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$  в виде выражений:

$$\left. \begin{aligned} a &= r_p \varphi_a; \\ b &= \frac{\varphi_b}{\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

получим:

$$P = \frac{4 m D_u^{n-2} \varphi^{n-2} r_p \varphi_a \varphi_b}{\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}}. \quad (17)$$

Определим значения углов  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$ . Отношение полуосей эллипса отпечатка с учетом (16)

$$\frac{b}{a} = \frac{\varphi_b}{\left(\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}\right) r_p \varphi_a}. \quad (18)$$

Из совместного решения уравнений (3) и (17) относительно  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$  имеем:

$$\varphi_a = \frac{2\varphi}{1 + \frac{b}{a} r_p \left(\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}\right)}; \quad (19)$$

$$\varphi_b = \frac{2 \frac{b}{a} r_p \left(\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}\right) \varphi}{1 + \frac{b}{a} r_p \left(\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}\right)}. \quad (20)$$

С учетом этих значений углов формула (17) примет вид:

$$P = \frac{16 m D_u^{n-2} \varphi^n r_p^2 \frac{b}{a}}{\left[1 + \frac{b}{a} r_p \left(\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}\right)\right]^2}, \quad (21)$$

где в круглых скобках знак «+» относится к обкатыванию валов, а знак «-» – к раскатыванию отверстий; значение угла  $\varphi$  в радианах. После подстановки в выражение (21) экспериментальных значений  $n = 2,3$  и  $m = 0,44$  кН/мм<sup>2</sup> [4], например, для стали 20, при  $D_u = 60$  мм получим:

$$P_{20} = \frac{21 \varphi^{2,3} r_p^2 \frac{b}{a}}{\left[1 + \frac{b}{a} r_p \left(\frac{2}{D_p} \pm \frac{2}{D_o}\right)\right]^2}, \quad (22)$$

где  $P_{20}$  в кН.

Усилие обкатывания сталей различной твердости определяется произведением

$$P = K_p P_{20}, \quad (23)$$

где  $K_p$  – коэффициент, учитывающий твердость  $HВ$  обкатываемых сталей (табл. 2).

Выбор коэффициента усилия  $K_p$

$HВ$	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
$K_p$	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	1,9	2,20	2,45	2,70	3,00	3,30	3,60	4,00	4,40	5,00

Для построения графика зависимости усилия  $P_{20}$  от геометрических величин определим значение диаметра  $D_p$  и профильного радиуса ролика  $r_p$  [4], соответствующие фиксированному значению усилия  $P_{20}$ .

Для случая обкатывания плоскости, когда  $2/D_0=0$ , параметр  $\Omega$  имеет вид:

$$\Omega = \frac{\frac{2}{D_p} - \frac{1}{r_p}}{\frac{2}{D_p} + \frac{1}{r_p}}. \quad (24)$$

Преобразовав относительно  $r_p$  имеем:

$$r_p = \frac{(1 + \Omega) D_p}{2(1 - \Omega)}. \quad (25)$$

Подставив данные значения  $r_p$  в (22) при  $2/D_0=0$ , получим:

$$D_p = \frac{\sqrt{P_{20}} [1 - \Omega + \frac{6}{a}(1 + \Omega)]}{2,29 \varphi^{1,15} \sqrt{\frac{6}{a}(1 + \Omega)}}. \quad (26)$$

Задаваясь различными отношениями  $6/a$ , а также находя по графику (рис. 1.) соответствующие им значения  $\Omega$  для фиксированных  $P_{20}$  и  $\varphi$ , находим по формулам (25) и (26) размеры  $D_p$  и  $r_p$ . Исходя из этого следует считать для стальных деталей допустимым средний угол вдавливания  $\varphi = 5^\circ$ . При этом по мере вытягивания отпечатков ( $\Omega \rightarrow 1$ ) угол вдавливания в направлении обкатывания  $\varphi_6$  стремиться до  $10^\circ$ .

На рис. 3 приведен график зависимости приведенного усилия от геометрических размеров детали и ролика.

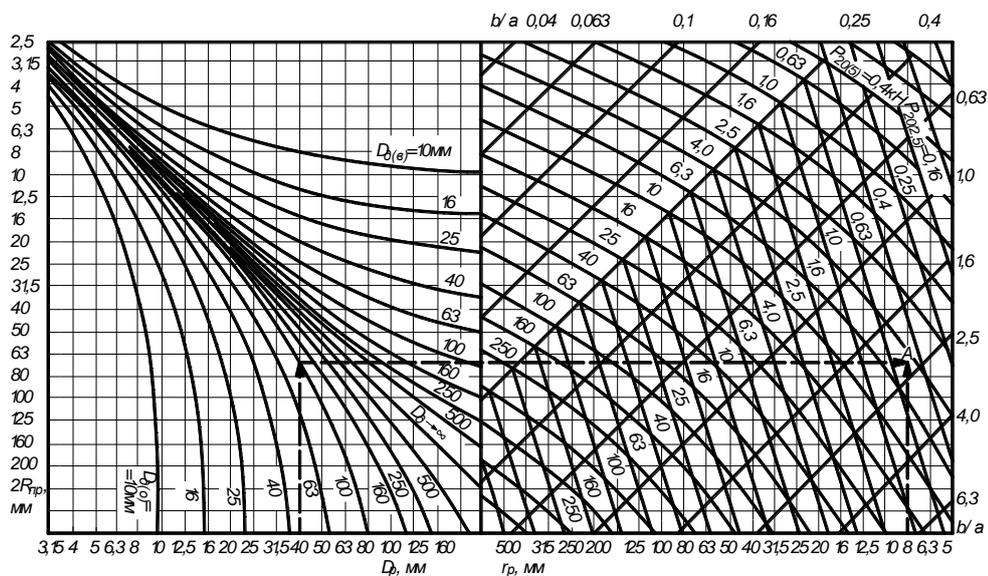


Рис. 3 – Зависимость усилия обкатывания от размеров детали и ролика

В левой части графика построено семейство кривых, представляющих собой зависимость удвоенного приведенного радиуса кривизны ( $2R_{np}$ ) в плоскости качения ролика от диаметра ролика и детали ( $2R_{np}=1/(1/D_p \pm 1/D_0)$ ) для обрабатываемых поверхностей разнообразной формы [3]. Семейство кривых разделено прямой  $D_0 \rightarrow \infty$ , которая

относится к случаю обработки плоских поверхностей; кривые, расположенные над этой прямой, относятся к обкатыванию валов, под ней – к раскатыванию отверстий.

В правой части номограммы кривые линии с использованием уравнений (25) и (26) соответствуют усилиям  $P_{20(5)}$  обкатывания роликами при установке роликовых узлов на подшипниках качения [3] и работе со средним углом вдавливания  $\varphi = 5^{\circ}$ , когда необходимо получить поверхность с параметром шероховатости  $0,08 \leq R_a \leq 0,32$  мкм и совместить чистовое и упрочняющее обкатывание.

Отрезки прямых, расположенные ниже наклонной прямой  $v/a = 0,25$ , соответствуют усилиям  $P_{20(2,5)}$  обкатывания с средним углом вдавливания  $\varphi = 2,5^{\circ}$  при чистовом режиме обкатывания. При расчете точек прямоугольных отрезков учтено влияние диаметра детали и этим ликвидирована погрешность, допускающаяся в пределах 10% при построении номограммы [2]. Представленную номограмму (рис. 3.) с использованием формулы (23) можно применять при обкатывании сталей других марок с разной твердостью до  $HB = 400$  с учетом значений  $K_p$  (см. табл. 2).

Производительность процесса при обкатывании деталей роликами определяется числом проходов, скоростью обкатывания и продольной подачей ролика. Как правило, обкатывание заканчивается за один продольный проход ролика. Повторные проходы приходится назначать лишь при обработке грубо подготовленных поверхностей. Шероховатость обкатанной поверхности практически не зависит от скорости обкатывания, поэтому всегда стремятся работать на высоких скоростях, предельно допускающиеся станком и конструкцией устройства для обкатывания. Установка рабочих роликов на надежных подшипниках качения позволяет, работать со скоростями 100 м/мин и больше. Ограничение скорости возникает при обкатывании крупных тяжелых валов в связи с недостаточной несущей способностью центров токарных станков.

Повышение производительности обкатывания в этих случаях может быть достигнуто увеличением подачи ролика. Подачу и количество продольных проходов ролика кругового профиля при обкатывании определяют (см. табл. 3.) в зависимости от его профильного радиуса, ожидаемой и исходной шероховатости поверхности, а также количества роликов в устройстве [2]. Как видно из табл. 3, ограничение усилия обкатывания углом вдавливания  $\varphi = 2,5^{\circ}$  позволяет снизить шероховатость по параметру  $R_a$  с 10,0 до 1,25; 5,0 – 0,63 и 2,5 – 0,32 мкм. Последующее повышение усилия обкатывания в случае применения традиционных устройств, в которых роликовый узел установлен на опорах скольжения, приводит к появлению волнистости на обкатанной поверхности. Увеличение профильного радиуса ролика – один из путей повышения производительности обкатывания [4]. Однако увеличение радиуса влечет за собой рост рабочего усилия.

Например, для обкатывания вала диаметром 250 мм, изготовленного из малоуглеродистой стали (140 НВ), при диаметре ролика 100 мм с профильным радиусом 20 мм необходимо рабочее усилие 2,2 кН. Если радиус ролика увеличить в 2 раза (до 40 мм), усилие растёт до 6,3 кН, в 4 раза (80 мм) – 18 кН, в 8 раз (160 мм) – 50 кН.

Однако величина допустимого усилия как правило ограничивается. На токарных станках средних размеров допускаются радиальные усилия до 25,0 кН и на более больших – до 60,0 кН. Недостаточная жесткость детали может внести дополнительные ограничения рабочего усилия.

Кроме того, реализация больших рабочих усилий нуждается в применении сложных и тяжелых устройств для обкатывания. Все это приводит к тому, что увеличение радиуса ролика  $r_p$  при сохранении последних параметров процесса обкатывания позволяет повышать производительность лишь в очень узких пределах.

Подачи  $S$ , мм/об при обкатывании стальных деталей роликами кругового профиля при  $\varphi = 2,5^\circ$

Профильный радиус ролика $r_p$ , мм	Необходимая $R_a$ , мкм						
	1,25		0,63		0,16-0,32		
	Исходная $R_a$ , мкм						
	10,0	5,0	2,5	5,0	2,5	2,5	1,25
5	0,07	0,15	0,3	0,07	0,15	0,07	0,15
6,3	0,09	0,18	0,36	0,09	0,18	0,09	0,17
8	0,12	0,23	0,46	0,12	0,23	0,12	0,19
10	0,15	0,29	0,56	0,15	0,29	0,15	0,21
12,5	0,18	0,37	0,64	0,18	0,34	0,18	0,24
16	0,23	0,47	0,72	0,23	0,39	0,23	0,27
20	0,29	0,58	0,80	0,29	0,42	0,29	0,30
25	0,37	0,83	0,88	0,37	0,48	0,35	0,35
32	0,47	0,94	1,00	0,47	0,54	0,39	0,39
40	0,58	1,12	1,12	0,58	0,60	0,43	0,43
50	0,74	1,24	1,24	0,66	0,66	0,48	0,48
63	0,92	1,40	1,40	0,72	0,72	0,54	0,54
80	1,17	1,60	1,60	0,84	0,84	0,60	0,60
100	1,45	1,80	1,80	0,96	0,96	0,66	0,66
125	1,8	2,0	2,0	1,05	1,05	0,75	0,75
160	2,25	2,25	2,25	1,23	1,23	0,85	0,85
200	2,55	2,55	2,55	1,35	1,35	0,95	0,95
250	2,9	2,9	2,9	1,55	1,55	1,1	1,1
320	3,2	3,2	3,2	1,7	1,7	1,2	1,2
400	3,6	3,6	3,6	1,9	1,9	1,4	1,4
500	4,0	4,0	4,0	2,2	2,2	1,55	1,55
630	4,6	4,6	4,6	2,4	2,4	1,7	1,7

Дополнительные возможности увеличения степени пластической деформации при малом значении  $\varphi$ , предотвращающем появление волнистости, - уменьшение диаметра ролика. Диаметр ролика не определяет непосредственно величину продольной подачи при обкатывании, но от него зависит рабочее усилие.

Ролики еще меньших диаметров можно применять в самоустанавливающейся роликовой головке с помощью устройства [6], цилиндрическая пружина которого регулируется в пределах 17,0 кН. Для этого устройства подходят станки типа 1К62. При проходах 1, 4, 8 и 16 раз появляется возможность обкатывать валы диаметром 50 мм, проточенные с подачами 0,26 и 0,43 мм/об.

С целью определения влияния рабочего диаметра ролика и усилия обкатывания на шероховатость поверхности, были проведены исследования обкатывания стального вала роликами диаметром 3,2; 5; 8; 12,5; 20; 32 мм с разными рабочими усилиями с последующим замером шероховатости поверхности, соответственно после 1, 2, 4, 8, 16 проходов. Считая, что оптимальное рабочее усилие в случае обкатывания валов должно обеспечивать снижение шероховатости поверхности до  $R_a = 0,63 \dots 1,25$  мкм, по данным проведенных исследований построены зависимости погонного усилия обкатывания  $q$  (усилие, отнесенное к длине пятна контакта ролика на детали) от рабочего диаметра ролика (рис. 4).

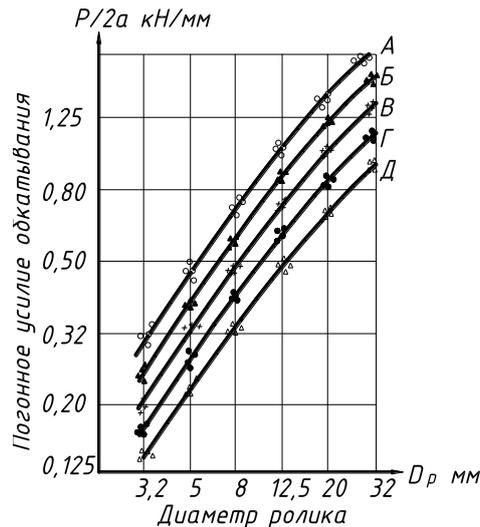


Рис. 4 – Зависимость погонного усилия обкатывания от диаметра ролика:  
 А – после одного прохода; Б – двух проходов; В – четырех проходов; Г – восьми проходов; Д – шестнадцати проходов

Погонное усилие обкатывания  $q$ , рассчитанное по (28) с учетом (22), удовлетворительно совпадает с данными, приведенными на рис. 3. При установке роликовых узлов на опорах качения, когда при средних углах вдавливания роликов  $\varphi$ , равных пяти градусам, волнистости на обкатываемой поверхности не возникает, а ось отпечатка в направлении подачи растет в 2 раза и больше, подачи обкатывания могут быть увеличены в 2 раза по отношению к рекомендациям в табл. 3.

На этом графике указаны усилия, позволяющие получить шероховатость поверхности  $R_a = 0,6 \dots 1,25$  мкм за 1; 2; 4; 8 и 16 приведенных проходов. Под приведенным числом проходов понимается отношение ширины контакта ролика с деталью к величине продольной подачи ролика. Погонное усилие обкатывания изменяется пропорционально приведенной кривизне контакта ролика с деталью в плоскости обкатывания. При обкатывании роликами малого диаметра, когда приведенная кривизна определяется в основном кривизной ролика, погонное усилие пропорционально диаметру ролика.

Ролики малого диаметра с прямолинейным профилем, закругленным около торцов радиусами 30 – 50 мм, позволяют применять увеличенные продольные подачи, которые достигают 6 – 16 мм/об детали. Волнистость на обкатанной поверхности отсутствует. Для случаев обработки деталей цилиндрическим роликом относительно малого диаметра ( $D_p \leq D_d$ ) средний угол вдавливания можно выразить в радианах, используя соотношение

$$\varphi = \frac{\varphi_e}{2} = \frac{\epsilon}{D_p} \quad (27)$$

Нагрузка на единицу длины контакта ролика с обрабатываемой поверхностью с учетом (27) будет равняться:

$$q = 0,02HM2\epsilon \quad (28)$$

где  $q$  – измеряется в кН/мм; 0,02 – коэффициент соответствия размерностей  $q$  и  $HM$ ;  $HM$  – в единицах твердости по Мееру;  $D_p$  – в мм;  $\varphi$  – в рад (чтобы избежать шелушения от перенаклепа рекомендуется применять  $\varphi \leq 5^\circ$  или 0,0873 рад).

**Вывод.** С целью предотвращения перенаклепа и шелушения обкатываемого металла, введено ограничение усилия обкатывания средним углом вдавливания, который не превышает  $5^\circ$ . Экспериментально установлена зависимость погонного усилия от диаметра ролика и количества проходов, при которой будет создаваться шероховатость поверхности валов  $R_a = 0,63 - 1,25$  мкм.

### Литература:

1. Шнайдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением / Ю.Г. Шнайдер. – М.: Машгиз, 1963. – 272 с.
2. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В.М. Браславский. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
3. Бутаков Б.И. Усовершенствование процесса чистового обкатывания деталей роликами / Б.И. Бутаков. – Вестник машиностроения. – 1984. – №7. – С. 50-53.
4. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев. – К.: Наукова думка, 1995. – 255 с.
5. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями / А. Хальд. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956. – 664 с.
6. Пат. 71119 Україна, МРК V24V 39/00 Пристрій для зміцнюючого та чистового обкатування поверхні обертання зі стабілізацією робочого зусилля / Б.І. Бутаков, В.О. Артюх; заявник і власник Бутаков Б.І. – № u201112463, заяв. 24.10.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13.

### Summary

**Artyukh V., Marchenko D.** Optimization of modes of rolling parts with rollers

*Research on the choice of optimum effort of rolling-off, is it set that value of middle pressure, for torovivid, barrel-type and cylindrical rollers, certain at the different middle corners of pressing  $\phi$ , deviates from hardness on Meyer no more than on 7%. Does it allow to accept at some calculation efforts of rolling toroidal, by barrel-type and cylindrical rollers as a condition of similarity constancy of middle corner of pressing  $\phi$ , and also the optimum corners of pressing are set for the clean and consolidating mode of rolling-off and optimum linear effort of rolling-off from the diameter of roller is experimentally certain which will provide the roughness of surface on the treated detail of  $R_a = 0,63 - 1,25$  mkm.*

**Keywords:** rolling, roller, middle angle of indentation, hardness, stabilization of force, reduced curvature, linear force.

### References

1. Shnajder Yu.G. Chistovaya obrabotka metallov davleniem / Yu.G. Shnajder. – М.: Mashgiz, 1963. – 272 s.
2. Braslavskij V.M. Tehnologiya obkatki krupnyh detalej rolikami / V.M. Braslavskij. – 2-e izd. – М.: Mashinostroenie, 1975. – 160 s.
3. Butakov B.I. Usovershenstvovanie processa chistovogo obkatyvaniya detalej rolikami / B.I. Butakov. – Vestnik mashinostroeniya. – 1984. – №7. – S. 50-53.
4. Babey Yu.I. Poverhnostnoe uprochnenie metallov / Yu.I. Babey, B.I. Butakov, V.G. Sysoev. – К.: Naukova dumka, 1995. – 255 s.
5. Hald A. Matematicheskaya statistika s tehniceskimi prilozheniyami / A. Hald. – М.: Izdatelstvo inostranoj literatury, 1956. – 664 s.
6. Pat. 71119 Ukrayina, MRK V24V 39/00 Pristriy dlya zmichnyuyuchogo ta chistovogo obkatuvannya poverhni obertannya zi stabilizaciyeyu robochogo zusillya / B.I. Butakov, V.O. Artyuh; zayavnik i vlasnik Butakov B.I. – № u201112463, zayav. 24.10.2011; opubl. 10.07.2012, Byul. №13.