

**Бутаков Б.И.,
Артюх В.А.**

Николаевский национальный аграрный
университет,
г. Николаев, Украина

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАРЫ ТРЕНИЯ ПОСЛЕ ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКАМИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ РАБОЧЕГО УСИЛИЯ

Введение

Для упрочнения поверхностного слоя металлических деталей ответственного назначения находят применение поверхностное пластическое деформирование (ППД) обкатываниями роликами или чеканкой бойками. Для улучшения внешнего товарного вида и повышения износостойкости поверхностного слоя применяется чистовое ППД, а с целью повышения усталостной прочности деталей – упрочняющая обработка.

Современная техника для упрочнения поверхностных слоев, которые в большинстве случаев определяют служебные характеристики деталей машин, включает целый ряд методов: химико-термическую обработку, закалку ТВЧ, лазерную обработку и т. д. Для массового производства широкое применение для упрочнения поверхностных слоев деталей машин нашло обкатывания роликом.

При осуществлении технологического процесса обкатывания наиболее широко применяются сферические или торообразные ролики и при больших углах вдавливания ролика в направлении его подачи на обкатанной поверхности детали появляется волнистость с шагом, отличным от величины подачи.

Основной причиной появления волнистости многие исследователи считают наличие торцевого биения ролика, приводящего к переменной подаче обкатывания [1]. Для предотвращения появления волнистости при чистовом обкатывании рекомендуют принимать угол вдавливания, значением $2 - 3^\circ$ что, 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 [2].

Основной материал

С помощью универсального динамометра УДМ конструкции ВНИИ были измерены составляющие усилия P обкатывания торообразным роликом валов диаметром 100 - 200 мм из стали 40 (200 НВ) на токарном станке с помощью устройства, показанного на рис. 1, а. Ролик 1 установлен через подшипники 8 на оси 9. Усилие пружины 3 через тягу 4, ось 7 и рычаг 2 передается на ролик 1 и прикладывается к детали. Рычаг 2 установлен на оси 11 с помощью игольчатого 6 и упорных 5 подшипников и легко поворачивается относительно корпуса 10. В устройстве вместо подшипников качения 5 и 6 могут быть установлены подшипники скольжения.

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:

$$P_{np} = j_{np} \times f_{np}, \quad (1)$$

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

Усилие P обкатывания на ролике в кН определяют по зависимости:

$$P = P_{np} \times 60 / 38 = f_{np} \times 0,472 \times 60 / 38 = 0,745 f_{np}, \quad (2)$$

где 60 и 38 величины плеч усилия пружины и усилия на ролике соответственно в миллиметрах. На рис. 2 представлена схема воздействия составляющих сил обкатывания на деталь.

Номинальное значение усилия поджима ролика к детали, $P_{yn} = 5$ 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.

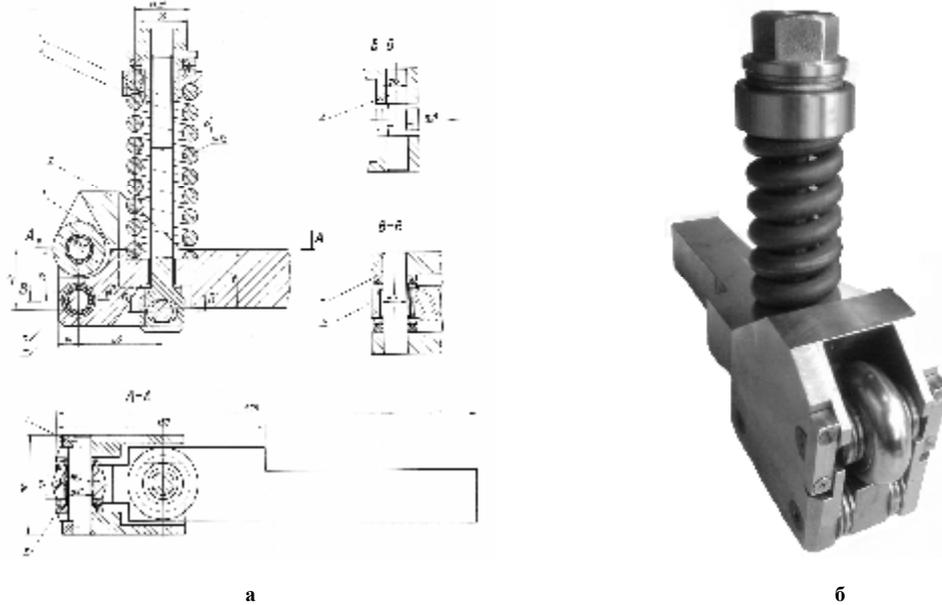


Рис. 1 – Устройство для обкатывания деталей торообразным роликом со стабилизацией усилия обкатывания:
а – конструктивная схема;
б – общий вид

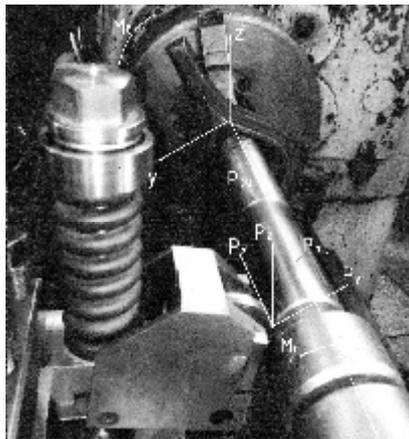


Рис. 2 – Схема воздействия составляющих усилия обкатывания на деталь

На рис. 3 показана осциллограмма составляющих усилия P , полученная при установке роликового узла на опоры скольжения, т.е. применительно к конструкции устройств, используемых на заводах для упрочняющего или чистового обкатывания стальных деталей.

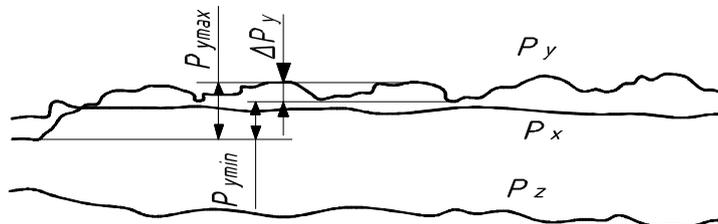


Рис. 3 – Осциллограмма составляющих усилия P обкатывания:
 P_x – касательное усилие качения ролика;
 P_y – нормальное усилие поджима ролика к детали;
 P_z – усилие подачи

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 подшипни-

ках 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 [2, 3].

Рассчитаем шаг волны S_w при некратных отношениях D_o/D_p , где D_o , D_p соответственно диаметры детали и ролика. Точками на развертке следа ролика при качении его по детали отмечены места максимального значения усилия P (рис. 4).

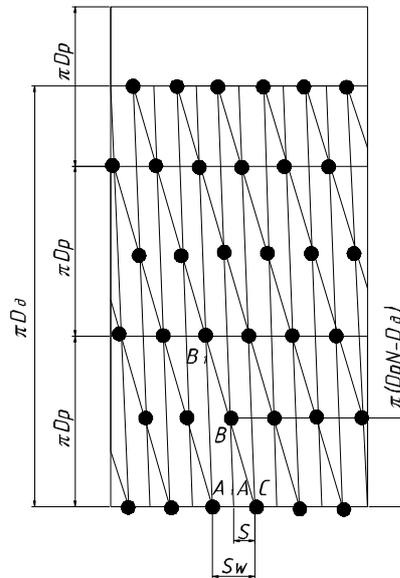


Рис. 4 – Схема расчета шага S_w волны при обкатывании роликами

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:

$$S_w = D_p S / (D_p N - D_o), \quad (3)$$

где $N = D_o/D_p + 1$ (здесь D_o/D_p – целая часть отношения). Данное выражение справедливо для случая, исключающего 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 .

Стабилизируя с помощью установки роликового узла на подшипниках качения усилие P можно исключить появление волнистости при больших углах вдавливания, которые свойственны даже упрочняющему обкатыванию. При этом удастся получить шероховатость поверхности $R_a = 0,08 - 0,32$ мкм при исходной $R_z = 80 - 160$ мкм, и кроме того, совместить чистовое и упрочняющее обкатывания.

Результаты экспериментальных исследований

С помощью изготовленного устройства произведено обкатывания вала из стали 40 диаметром 50 мм (рис. 5).

Вал был установлен в центрах и поводковый патрон, а устройство было зажато в резцедержатель станка.

Обкатывания производилось по двум режимам, чистовой – с усилием обкатывания 0,75 кН и упрочняющий – с усилием 3 кН. Усилие было подобрано по номограмме [3] и осуществлялось с помощью сжатия пружины устройства.

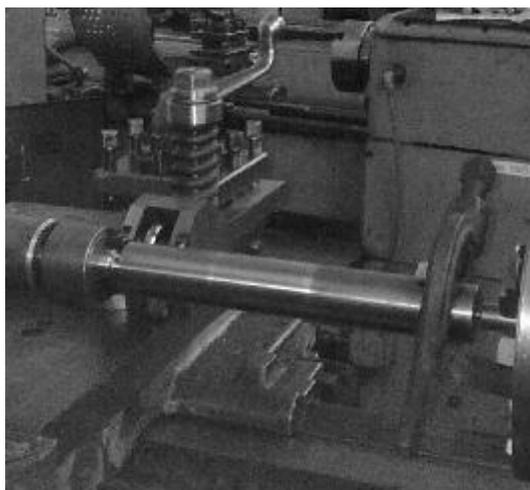


Рис. 5 – Обкатывания вала роликом на токарно - винторезном станке 1К62

Обкатывания выполнялось с частотой вращения детали 315 об/мин и подачей 0,07 мм/об. Перед обкатываниям вал смазывался индустриальным маслом И-20. После обкатывания вал был порезан на образцы шириной 11 мм. По периметру образец, перед тем как его полировать, заливался самотвердеющей пластмассой “ПРОТАКРИЛ-М”, для того чтобы не завалить торцы при полировке (рис. 6).



Рис. 6 – Образцы, подготовленные для исследования микротвердости

Для изучения микроструктуры экспериментальных образцов их протравили 3 % раствором азотной кислоты. Микроструктура экспериментальных образцов до обкатывания была одинаковою по глубине и состоит из перлитных и ферритных зерен (рис.7, а). После обкатывания устройством из стабилизацией рабочего усилия, которое составляло 3 кН, изменения в микроструктуре на оптических микрофотографиях удалось определить только в поверхностном слое экспериментальных образцов, которые обкатывались роликом из радиусом кривизны 6 мм (рис. 7, б). Эти изменения заключались в значительном вытягивании в круговом направлении как ферритных так и перлитных зерен.

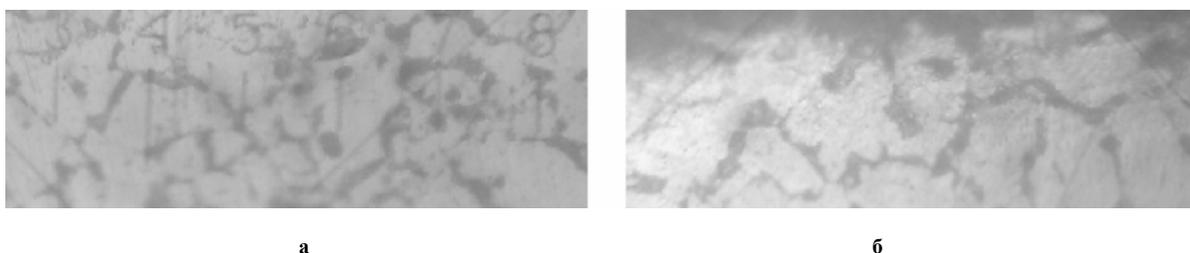


Рис. 7 – Микроструктура поверхностного слоя вала из стали 40 ($\times 500$):
а – до обкатывания;
б – после обкатывания с усилием 3 кН

На микроскопических снимках перлит имеет вид в виде темных полос, которые чередуются, а более светлые, феррит. Ферритные пластинки не имеют дислокаций, только в некоторых районах наблюдаются единичные дислокации на поверхности разделения феррит – перлит.

При рассмотрении микроструктуры слоя, который размещен ближе к поверхности, следует отметить увеличение плотности дислокаций в феррите.

Исследования микроструктуры образцов по глубине в поперечном разрезе, показало, что обкатывания валов с усилием 3 кН приводит к наклепу поверхностного слоя на глубину 3 мм при тороидальной форме ролика.

Из двух структурных составляющих стали феррита и перлита, первым воспринимает пластическую деформацию более мягкий феррит. Это приводит к формированию в зернах избыточного феррита ячеистой структуры, в которой плотность дислокаций та микроразориентация по зерну увеличивается по мере приближения к поверхности вала.

Возникновение дислокаций в ферритных прослойках перлита происходит возле поверхности раздела феррит – перлит, что согласовывается с выводом про то, что основным источником дислокаций являются границы.

Также были проведены исследования микротвердости в поперечном сечении образца. Измерения микротвердости выполнялось на приборе ПМТ – 3 по глубине через 0,2 мм. Изображение отпечатков микротвердости приведено на рис. 8. Это важно для материалов, имеющих очень неоднородную микроструктуру.

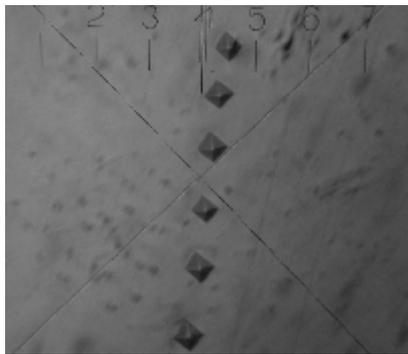


Рис. 8 – Измерение отпечатков микротвердости на приборе ПМТ-3 ($\times 500$)

По результатам измерения микротвердости были построены графики изменения микротвердости по глубине (рис. 9).

Глубина упрочненного слоя вала, обкатанного при усиллии 3 кН, составляет 2,1 ... 2,5 мм, а вала, обкатанного при усиллии 0,75 кН, составляет 1 ... 1,2 мм.

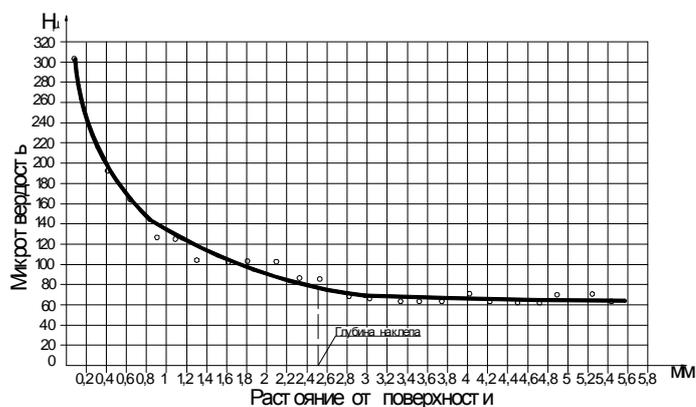
Глубина наклепа определяется по формуле Хейфеца:

$$t = \sqrt{\frac{P \cdot 10^3}{2\sigma_m}}, \quad (4)$$

где P – усилие обкатывания, кН;

σ_m – предел текучести стали, МПа.

Твердость на глубине достаточно резко начинает снижаться, что является свидетельством малой ширины переходной зоны.



а

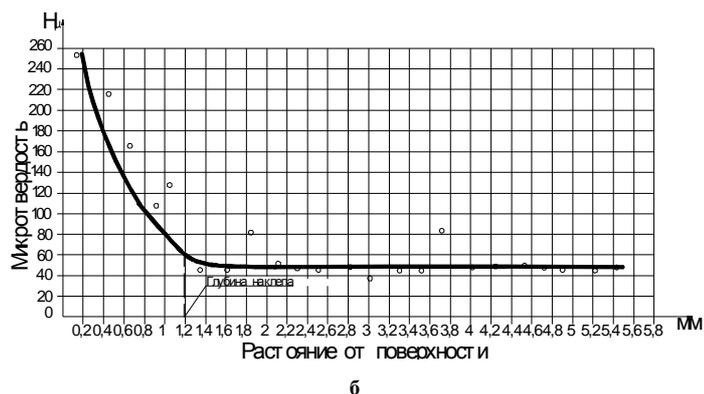


Рис. 9. Изменение микротвердости по глубине:
а – образец, обкатанный с упрочняющим режимом при усилии 3 кН;
б – образец, обкатанный с чистовым режимом при усилии 0,75 кН

После проведения исследований шероховатости поверхности были представлены профилограммы поверхности образцов, которые сняты после пути трения 20000 и 40000 м (рис. 10, 11, 12, 13).

Измерение шероховатости и снятие профилограмм поверхности производилось на профилографе-профилометре завода "Калибр".

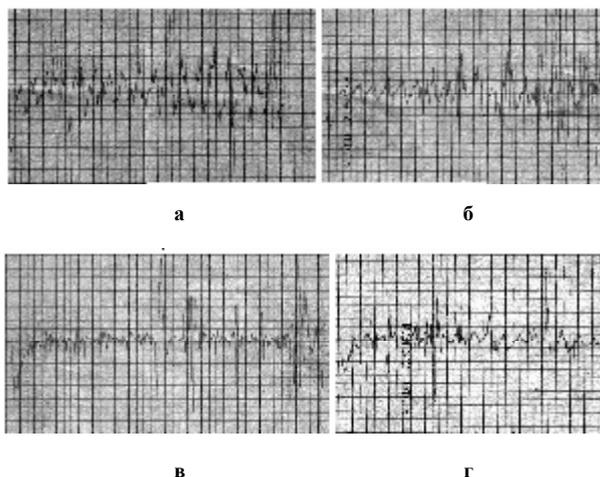


Рис. 10 – Профилограммы поверхности стальных образцов, снятые после пути трения 20000 м (по вертикали × 1000, по горизонтали × 10):
а – образец, обкатанный с усилием 3 кН после шлифования; **б** – шлифованный образец;
в – образец, обкатанный с усилием 0,75 кН после точения; **г** – образец, обкатанный с усилием 3 кН после точения

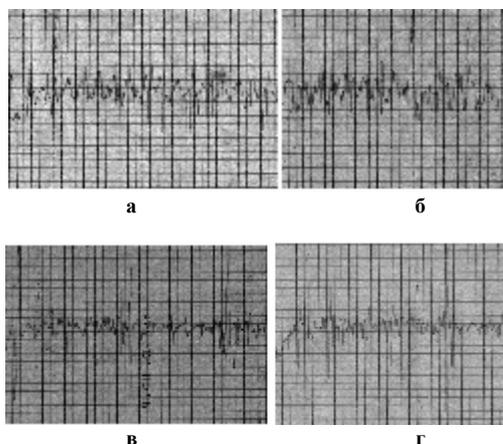


Рис. 11 – Профилограммы поверхности стальных образцов, снятые после пути трения 40000 м (по вертикали × 1000, по горизонтали × 10):
а – образец, обкатанный с усилием 3 кН после шлифования; **б** – шлифованный образец;
в – образец, обкатанный с усилием 0,75 кН после точения; **г** – образец, обкатанный с усилием 3 кН после точения

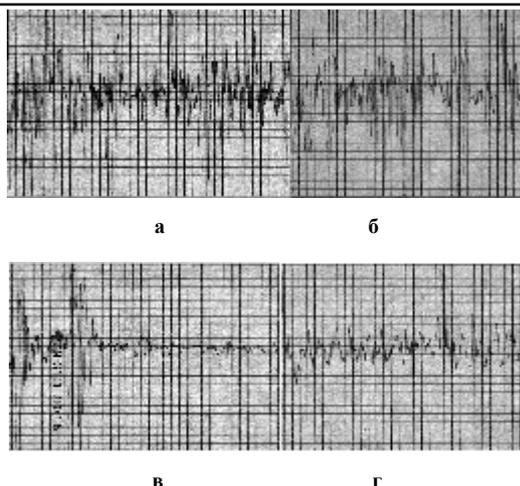


Рис. 12 – Профилограммы поверхности бронзовых образцов, снятые после пути трения 20000 м (по вертикали $\times 1000$, по горизонтали $\times 10$):
а – образец, работающий в паре с валом, обкатанным с усилием 3 кН после шлифования;
б – образец, работающий в паре со шлифованным валом;
в – образец, работающий в паре с валом, обкатанным с усилием 0,75 кН после точения;
г – образец, работающий в паре с валом, обкатанным с усилием 3 кН после точения

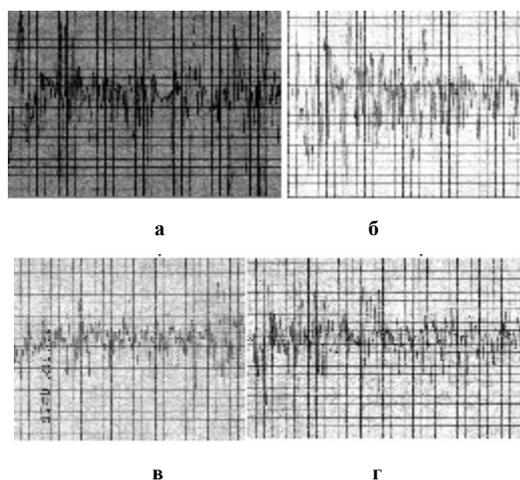


Рис. 13 – Профилограммы поверхности бронзовых образцов, снятые после пути трения 40000 м (по вертикали $\times 1000$, по горизонтали $\times 10$):
а – образец, работающий в паре с валом, обкатанным с усилием 3 кН после шлифования;
б – образец, работающий в паре со шлифованным валом;
в – образец, работающий в паре с валом, обкатанным с усилием 0,75 кН после точения;
г – образец, работающий в паре с валом, обкатанным с усилием 3 кН после точения

Как видно из профилограмм, шероховатость поверхности обкатанного вала меньше, чем шероховатость шлифованной поверхности, это ускоряет приработку деталей. Во всех случаях на поверхности вкладышей формируется новый рельеф. В таблице представлены параметры шероховатости стальных и бронзовых образцов, указанных выше на рисунках после пути трения 20000 и 40000 м.

Как видно из таблицы, у обкатанных образцов возрастает опорная поверхность t_p за счет снижения шероховатости поверхности, которая в процессе приработки с бронзовым вкладышем формируется в виде нового рельефа.

Для испытания на износ образцов на машине трения СМЦ – 2 применялся образец из стали 40 ГОСТ 1050 – 88 диаметром 50 мм в паре с образцом из оловянистой бронзы Бр. ОЦС 8-21 (рис. 14, а).

Стальные образцы были обработаны по четырем вариантам: шлифованные (шероховатость поверхности $R_a = 0,25$ мкм); обкатанные роликом с чистовым режимом при усилии $P = 0,75$ кН после точения (шероховатость поверхности $R_a = 0,15$ мкм); обкатанные роликом с упрочняющим режимом при $P = 3$ кН после шлифования (шероховатость поверхности $R_a = 0,12$ мкм) и обкатанные роликом с упрочняющим режимом при $P = 3$ кН после точения (шероховатость поверхности $R_a = 0,17$ мкм). Поверхность вкладышей (втулок) после растачивания имела шероховатость $R_a = 0,36$ мкм.

Параметры шероховатости поверхности экспериментальных образцов

Образец	R_a , МКМ	n^*	H_{\max}^* , МКМ	H_{\min} , МКМ	t_p^* , %
Стальные образцы					
После пути трения 20000 м					
Образец, обкатанный с усилием 3 кН после шлифования	0,28 - 0,29	5 - 7	5,3	6,79	91,1
Шлифованный образец	0,44 - 0,45	6 - 8	7,4	8,1	55
Образец, обкатанный с усилием 0,75 кН после точения (чистовой режим)	0,16 - 0,20	3 - 4	4,8	3,2	95
Образец, обкатанный с усилием 3 кН после точения (упрочняющий режим)	0,18 - 0,25	5 - 6	4,7	2,5	97
После пути трения 40000 м					
Образец, обкатанный с усилием 3 кН после шлифования	0,20 - 0,21	5 - 7	5,3	1,9	94
Шлифованный образец	0,27 - 0,28	10 - 11	7,9	4,85	54
Образец, обкатанный с усилием 0,75 кН после точения (чистовой режим)	0,16 - 0,21	1 - 3	2,3	8,1	96
Образец, обкатанный с усилием 3 кН после точения (упрочняющий режим)	0,17 - 0,22	3 - 4	2,8	1,3	97,5
Бронзовые образцы					
После пути трения 20000 м					
Вкладыш, работающий с образцом, обкатанным с усилием 3 кН после шлифования	0,50 - 0,51	11 - 13	4,96	6,78	82
Вкладыш, работающий со шлифованным образцом	0,61 - 0,62	12 - 16	6,76	7,73	51
Вкладыш, работающий с образцом, обкатанным с усилием 0,75 кН после точения (чистовой режим)	0,39 - 0,51	9	4,81	2,46	95
Вкладыш, работающий с образцом, обкатанным с усилием 3 кН после точения (упрочняющий режим)	0,35 - 0,36	9	4,85	2,10	95
После пути трения 40000 м					
Вкладыш, работающий с образцом, обкатанным с усилием 3 кН после шлифования	0,30 - 0,31	8	5,48	1,64	82
Вкладыш, работающий со шлифованным образцом	0,58 - 0,60	11	6,85	4,65	51,6
Вкладыш, работающий с образцом, обкатанным с усилием 0,75 кН после точения (чистовой режим)	0,18 - 0,19	9	1,14	7,62	95
Вкладыш работающий с образцом, обкатанным с усилием 3 кН после точения (упрочняющий режим)	0,26 - 0,27	9	1,04	0,88	95,4

Примечание: * n – число шагов неровностей в пределах длины трассы;

* H_{\max} – высота наибольшего выступа профиля;

* H_{\min} – глубина наибольшей впадины профиля;

* t_p – относительная опорная длина профиля.

Схема подачи смазки в зону трения та нагружения экспериментальных образцов представлено на рис. 14, а, а общий вид образцов для изнашивания на рис 14, б.

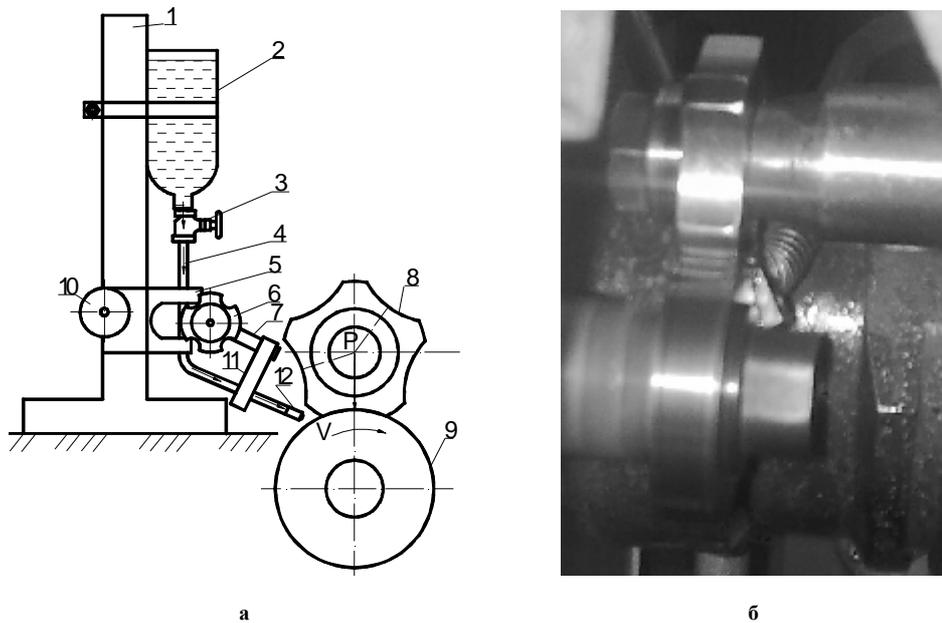


Рис. 14 – Схема нагружения экспериментальных образцов и подачи масла в зону трения (а) и общий вид образцов для изнашивания (б)

Испытания пары трения выполнялись при номинальной удельной нагрузке 5 МПа и окружной скорости 79 м/мин; образцы обильно смазывались моторным маслом фирмы “Castrol Magnatec” 10W – 40.

Для каждой пары образцов заливалась новая порция масла в емкость 2 л, которая закреплена на штативе 1. С помощью запорной арматуры 3 дозировалась подача масла в зону контакта, которое транспортировалось по трубке 4. С помощью выносного рычага 7 зажима насадки 11 имеется возможность выставить коническую насадку 12 в оптимальном месте для смазывания пары трения. Выносной рычаг фиксируется от продольного перемещения зажимной гайкой 6, а с помощью зажима 10 кронштейн рычага фиксируется от поперечного перемещения. Масло подавалось в количестве достаточном для граничного трения.

На рис. 15 и 16 приведены графики зависимости износа бронзовых и стальных образцов от пути трения. При проведении испытаний образцы взвешивались через каждые 1000 м пути трения на аналитических весах ВЛР – 200, испытания проводились на основании 16 пар образцов, а в дальнейшем – четырех пар для каждого варианта обработки.

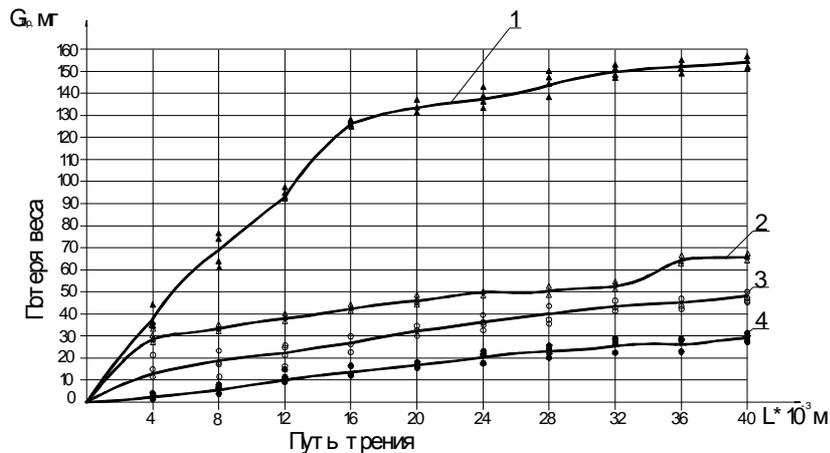


Рис. 15 – График износа бронзовых вкладышей
 1 – бронзовый вкладыш в паре со шлифованным валом;
 2 – бронзовый вкладыш в паре с валом, обкатанным при усилии 0,75 кН после точения;
 3 – бронзовый вкладыш в паре с валом, обкатанным при усилии 3 кН после шлифования;
 4 – бронзовый вкладыш в паре с валом, обкатанным при усилии 3 кН после точения

Как видно из графиков, в момент интенсивной притирки $L = 20000$ м наблюдается значительное повышение износа вкладыша, работающего в паре со шлифованным валом, приводящее к значительному повышению температуры экспериментальных образцов по сравнению с вкладышами, работающими с валом, обкатанным при усилиии 0,75 и 3 кН после точения и шлифования. Коэффициент трения f в начале испытаний составлял для шлифованных образцов 0,127, а для образцов, обкатанных при $P = 0,75$ кН и $P = 3$ кН после точения и шлифования, соответственно 0,047 и 0,12. В дальнейшем, коэффициент трения достиг минимума ($f = 0,016$) для образцов, обкатанных при $P = 3$ кН после точения.

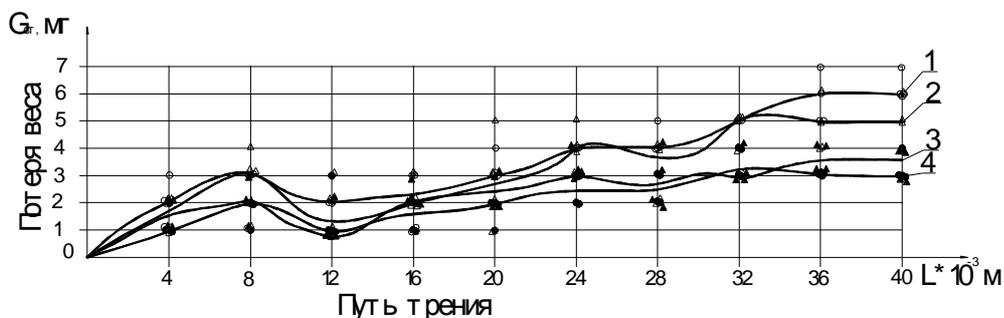


Рис. 16 – График износа образцов из стали 40

- 1 – стальной шлифованный образец;
 2 – образец, обкатанный при усилиии 0,75 кН после точения;
 3 – образец, обкатанный при усилиии 3 кН после шлифования;
 4 – образец, обкатанный при усилиии 3 кН после точения

Как видно на рис. 15, 16 приработка бронзовых вкладышей в паре с обкатанными стальными образцами происходит в несколько раз быстрее, чем шлифованных; при этом износ шлифованных образцов за значительный период работы в 3 - 3,5 раза больше, чем обкатанных.

Минимальный износ имели образцы, обкатанные роликом при $P = 3$ кН после точения; это обусловлено не только упрочняющим эффектом и увеличением твердости, но и обеспечением оптимальной шероховатости при данном методе обработки. Опорная площадь поверхности обкатанных образцов в верхних слоях в 1,5 - 2, а в нижних слоях – в 1,1 - 1,2 раза больше, чем шлифованных, высота неровностей обкатанной поверхности уменьшилась в 1,5 - 1,8 раза, а шлифованной – в 1,2 раза. На обкатанных поверхностях возникающая при их износе шероховатость образуется в основном за счет сглаживания вершин выступов без существенного изменения шероховатости в нижних ее сечениях. Благодаря этому различие в величине опорной площади между шлифованной и обкатанной поверхностями в процессе изнашивания возрастает еще больше.

Вывод

Способ обкатывания деталей роликами со стабилизацией усилия обкатывания позволяет получать при упрочняющем режиме упрочненный слой значительной толщины с достаточно высокой и однородной твердостью, а также повышенной износостойкостью.

Литература

1. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами / Браславский В.М. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
2. Бутаков Б.И. Усовершенствование процесса чистового обкатывания деталей роликами / Б.И. Бутаков. Вестник машиностроения. – 1984. – № 7. – С. 50-53.
3. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев – К.: Наукова думка, 1995. – 255 с.

Надійшла 10.10.2012