

**Исследование механических свойств и оценка точности определения
глубины наклепанного слоя при обкатывании роликами**

Бутаков Б.И., профессор,

Марченко Д.Д., Артюх В.А., Зубехина А.В., ассистенты

(Николаевский государственный аграрный университет)

В статье приведены результаты исследований механических свойств поверхностного слоя после упрочнения их пластическим деформированием с помощью обкатывания роликами. Произведен статистический расчет глубины наклепа, определяемый по изменению условного предела текучести и твердости по Виккерсу с помощью регрессионного анализа. Выполнена оценка точности определения глубины наклепа по изменениям условного предела текучести и твердости по Виккерсу.

При изготовлении и эксплуатации деталей машин на их поверхностях образуются неровности и микронеровности, а слой металла, непосредственно прилегающий к поверхности, имеет нередко новую структуру, фазовый и химический состав по сравнению с сердцевиной, в нем возникают остаточные напряжения [1]. В условиях эксплуатации этот слой подвергается наиболее сильному физико-химическому воздействию: механическому, тепловому, магнитоэлектрическому, световому, химическому и др. [2 – 4]. Часто разрушение деталей начинается с поверхности, например при изнашивании, эрозии, кавитации, усталости, контактной усталости и многих других случаях. Поэтому к поверхностному слою предъявляются более высокие требования, чем к глубинным слоям детали.

Одним из эффективных и простых методов упрочнения поверхностного слоя является метод поверхностного пластического деформирования (ППД) [5],

который позволяет рассматривать его не только как метод получения деталей требуемой формы, точности и микрогеометрии поверхности, но и как способ упрочнения деталей, существенно влияющих на их эксплуатационные характеристики. Характер изменения физико-механических свойств по глубине детали после любых способов поверхностной обработки или упрочнения позволяет оценить влияние так называемой технологической наследственности на формирование окончательных свойств изделий.

Наиболее доступным экспериментальным методом исследования глубины и степени наклепа при ППД является измерение твердости по Виккерсу в поперечном или наклонном сечениях упрочненной детали. Однако большой разброс значений твердости, особенно в переходной зоне между упрочненным слоем и исходным металлом не позволяет с достаточной точностью определить глубину наклепа. Более полное представление о механических свойствах поверхностного слоя можно получить на основе испытания на разрыв образцов, вырезанных из детали на различном расстоянии от поверхности. Такие испытания малых плоских образцов (рис. 1) толщиной 0,2...0,4 мм были выполнены на машине П. Шевенара [6], на которой проводилась оптическая диаграммная запись на фотопленке зависимости деформации образца от нагружения. Образцы изготавливались по следующей технологии. Обкатанный вал разрезался на цилиндрические отрезки соответственно количеству исследуемых режимов. Каждый такой отрезок, обкатанный с определенным режимом, подрезали по торцу в зоне стабильного процесса обкатывания и эксцентрично обтачивали на длине, соответствующей размеру микрообразцов.

Величину эксцентриситета выбирали так, чтобы вновь образованная поверхность с одной стороны осталась касательной к обкатанной поверхности, а на другой стороне диска углубилась заведомо ниже деформированного слоя (рис. 2). Вновь образованная таким образом при обточке цилиндрическая поверхность сохраняет обкатанную полоску шириной 10 – 12 мм. Затем вал растачивали на глубину, равную длине обточки, до тех пор, пока не останется тонкое кольцо, из которого и вырезали микрообразцы для механических

испытаний. Из каждого обкатанного участка вырезали по два кольца – одно шириной 27,5 мм для продольных (осевых) и второе шириной 9 мм для поперечных (круговых) образцов. Половина широкого кольца после разметки и нанесения маркировки разрезалась на 30 темплетов, которые затем равномерно шлифовали с двух сторон на плоскошлифовальном станке до выведения следов предыдущей обточки.

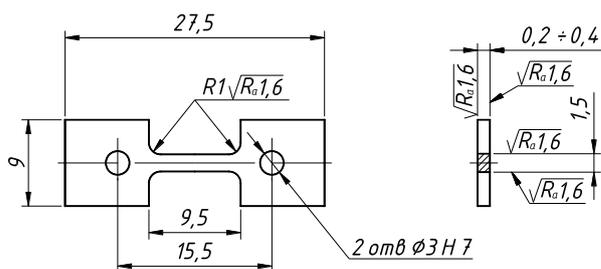


Рис. 1. Образец для микроиспытаний на разрыв

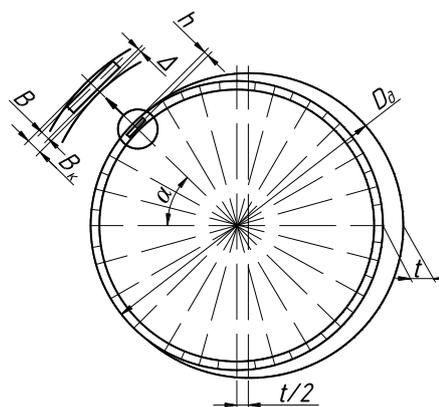


Рис. 2. Схема вырезки образцов

На узком кольце, после разметки и маркировки, с использованием делительной головки шлифовали 24 лыски длиной 6 – 7 мм. Это обеспечивает необходимое прилегание темплетов, вырезанных в дальнейшем из кольца, к поверхности магнитной плиты при их последующем шлифовании. Затем в специальном кондукторе сверлили и развертывали два отверстия диаметром 3Н7 для крепления будущих образцов в захватах испытательной машины. Эти отверстия служат также базой для последующего шлифования профиля образцов, при котором пакет из нескольких образцов закрепляли во втором кондукторе.

После шлифования их полировали тонкими шкурками зернистостью МЗ до выведения следов предыдущей обработки. Шероховатость шейки образца должна быть $R_a = 0,08...0,16$ мкм, что соответствует требованиям, высказанным в [7].

Ширина и толщина шейки образцов измерялась рычажным микрометром с

ценой деления шкалы 0,002 мм. Расстояние осевых сечений образцов от поверхности определяли угловым расположением образцов относительно центра кольца:

$$h = \frac{D_o}{2} - \sqrt{\frac{D_o^2}{4} - (D_o t - t^2) \sin^2 \frac{\alpha}{2}} + b_k - \frac{b}{2} - \Delta,$$

где D_o – диаметр детали; t – полная толщина исследуемого слоя; α – координатный угол образца; b_k – толщина кольца; Δ – припуск на шлифование с внутренней стороны кольца.

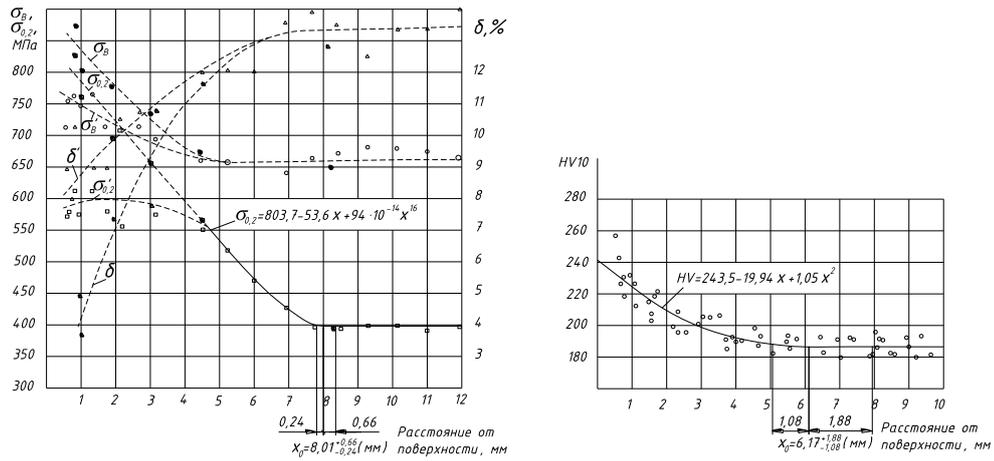
При разрезке кольца на n заготовок равной ширины

$$\alpha = \frac{2\pi}{n}(N-1),$$

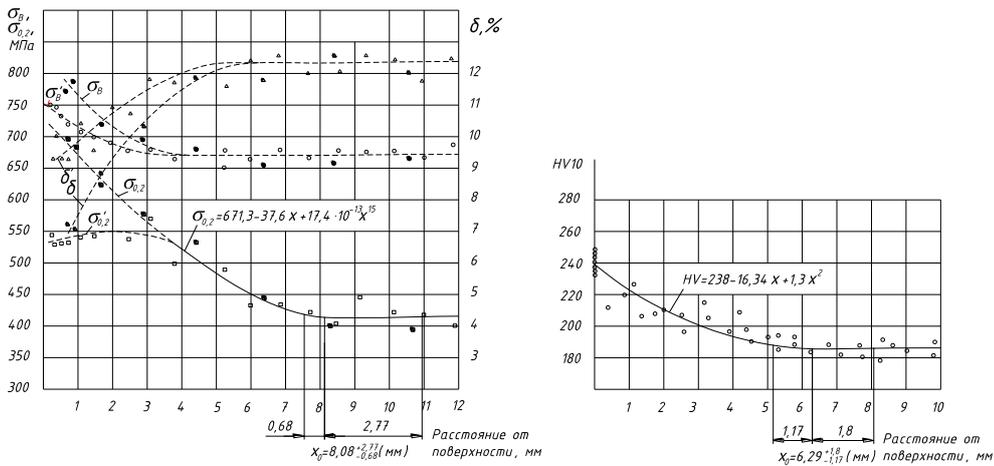
где N – номер образца от 1 до n .

На рис. 3 и 4 приведены результаты определения глубины наклепа по изменениям твердости $HV10$ и условного предела текучести металла наклепанного слоя. Из графиков видно, что обкатывание по обычной технологии роликами диаметром $D_p = 105$ мм повышает поверхностную твердость $HV10$ от 185 до 230 – 270 (в зависимости от профильного радиуса r_p), т.е. на 23 – 50%.

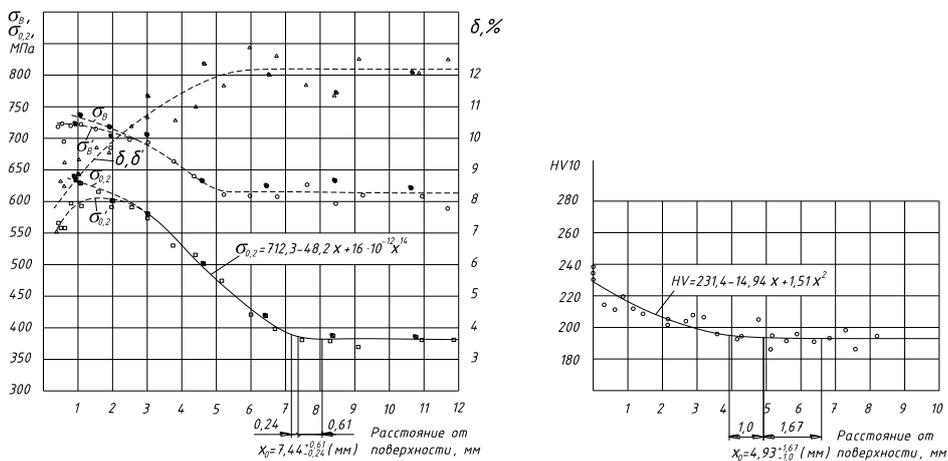
Применение цилиндрических роликов малого диаметра увеличивает степень наклепа за счет большой кривизны ролика в поперечном сечении. Зависимость степени наклепа по приращению твердости $HV10$ от приведенной кривизны ролика и детали ΣK близка линейной (см. рис. 5, а). Условный предел текучести и предел прочности поверхностного слоя при обкатывании роликами повышаются, а относительное удлинение соответственно снижается. Наибольшее изменение претерпел предел текучести, который возрос на образце, обкатанном роликом ($r_p = 10$, $D_p = 105$), вдвое (400 – 820 МПа) при соответствующем приросте твердости лишь на 40% (185 – 260). Предел прочности увеличился в меньшей степени, его повышение соответствует росту твердости. В большей степени снижается пластические свойства поверхностного слоя обкатанных валов. Относительное удлинение снизилось в 2 – 3 раза.



a



б

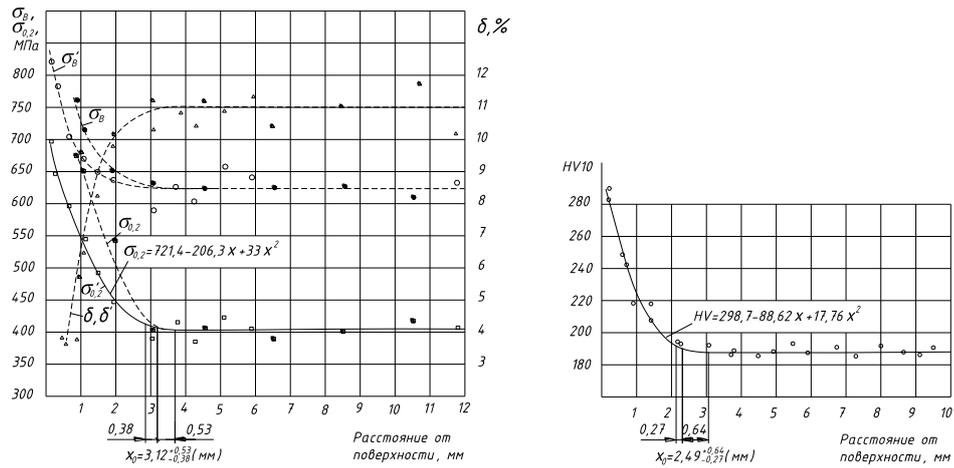


в

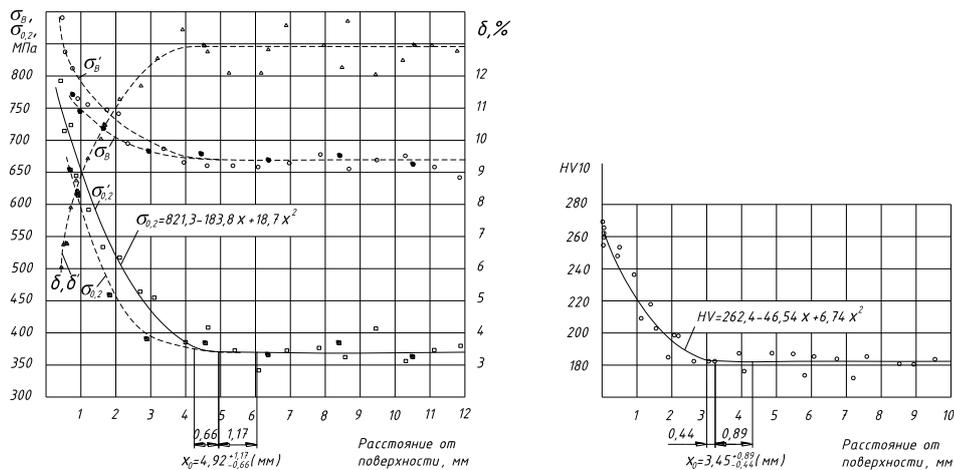
Рис. 3 – Механические свойства поверхностного слоя валов, обкатанных торообразными роликами:

а – диаметром $D_p = 105$ мм, с профильным радиусом $r_p = 10$ мм; б – $D_p = 105$ мм, $r_p = 18$ мм; в – $D_p = 105$ мм, $r_p = 100$ мм;

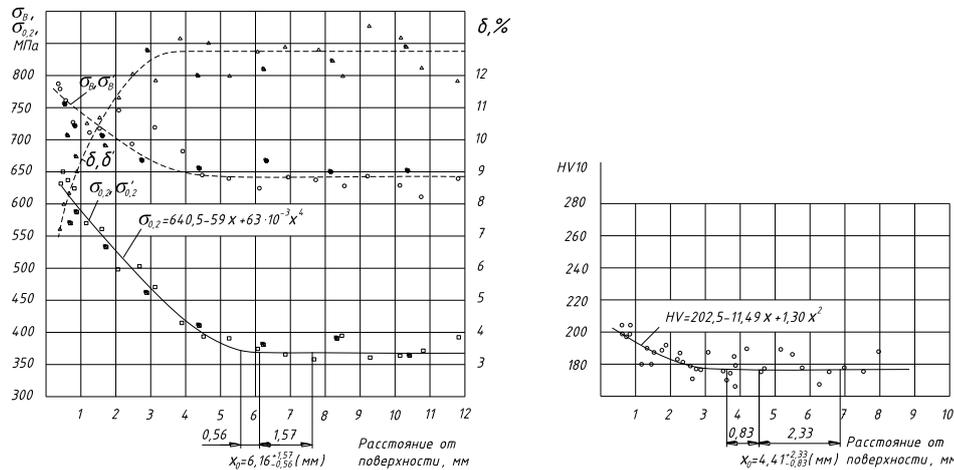
$\sigma_B, \sigma_{0,2}, \delta$ – свойства в круговом направлении; $\sigma'_B, \sigma'_{0,2}, \delta'$ – свойства в осевом направлении



a



b



b

Рис. 4 – Механические свойства поверхностного слоя валов, обкатанных цилиндрическими роликами:

a – диаметром $D_p = 5$ мм; б – $D_p = 12$ мм; в – $D_p = 32$ мм;

$\sigma_B, \sigma_{0.2}, \delta$ – свойства в круговом направлении;

$\sigma'_B, \sigma'_{0.2}, \delta'$ – свойства в осевом направлении

Следует подчеркнуть, что на образцах, обкатанных торообразными роликами (см. рис. 3, *a - в*), при приближении к обкатываемой поверхности наблюдается некоторый спад $\sigma_{0,2}$, измеренного в осевом направлении, что подтверждает точку зрения о максимуме остаточных напряжений в подслоной области, в зоне «глубинной текучести» [8].

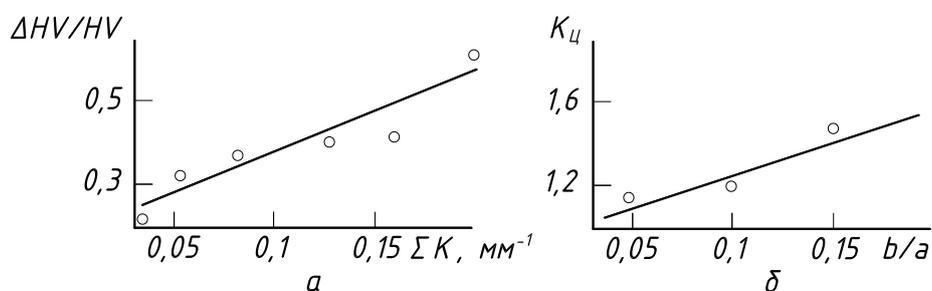


Рис. 5 – Зависимости степени наклепа по твердости от приведенной кривизны (*a*) и отношения экспериментальной глубины наклепа к теоретической от формы прямолинейного отпечатка (*б*):

Результаты исследований, помещенные на рис. 3 и 4, статистически обработаны по критерию Колмогорова [9] и методом малых выборок. Выборки объемом 5 – 10 замеров были взяты с интервалом 0,5 мм по глубине от поверхности детали. Однородность механических свойств по глубине проверена гипотезой равенства дисперсий выборок с помощью критерия Фишера [10]. Однородность дисперсий выборок проверена с помощью критерия Бартлета [11]. Гипотезы равенства и однородности дисперсий выборок всех исследованных образцов подтверждены с вероятностью $P = 0,95$. При определении глубины наклепа по началу изменения HV_{10} и $\sigma_{0,2}$ деформированного слоя и оценке точности определения его глубины применен нелинейный регрессионный анализ.

В качестве линий регрессии взяты функции [12]

$$y = a_1 + b_1x + b_2x^m \text{ И } y = a_1 + b_1x + b_2 \lg x,$$

где y – твердость или предел текучести; x – расстояние точки замера от поверхности детали.

Коэффициенты a_1 , b_1 , b_2 линий регрессии оценивались в соответствии с методом наименьших квадратов [13].

В качестве глубины изменения механических характеристик принята абсцисса точки экстремума линии регрессии (точки сопряжения линии регрессии с горизонталью на уровне исходных механических свойств), для которой рассчитаны доверительные интервалы. Значение абсциссы точки экстремума x_0 для случая параболической линии регрессии определится из условия

$$\frac{dy}{dx} = b_1 + mb_2 x^{(m-1)} = 0, \quad x = x_0 = \sqrt[m-1]{-\frac{b_1}{mb_2}}. \quad (1)$$

Можно считать, что $Z = b_1 + mb_2 \xi^{(m-1)}$ распределяется нормально со средним значением $\bar{Z} = 0$ и дисперсией

$$S_Z^2 = S_{b_1}^2 + S_{b_2}^2 m^2 \xi^{2(m-1)} + 2S_{b_1 b_2} m \xi^{(m-1)},$$

так что отношение Z/S_Z имеет t -распределение с $k = n - 3$ степенями свободы [13]. Здесь ξ – теоретическая абсцисса максимума; n – число пар значений y и x . С учетом предыдущего запишем неравенство

$$\frac{|Z|}{S_Z} < A, \quad (2)$$

где число A представляет собой двухстороннюю 95 %-ную границу для t -распределения Стьюдента с k степенями свободы [10].

Подставив значения Z и S_Z в неравенство (2), получим

$$\frac{|b_1 + mb_2 \xi^{(m-1)}|}{\sqrt{S_{b_1}^2 + S_{b_2}^2 m^2 \xi^{2(m-1)} + 2S_{b_1 b_2} m \xi^{(m-1)}} < A. \quad (3)$$

Решение неравенства (3), приводящее к уравнению 2 $(m - 1)$ степени относительно ξ , дает доверительные границы для ξ :

$$(m^2 b_2^2 - A^2 m^2 S_{b_2}^2) \xi^{2(m-1)} + (2b_1 b_2 m - 2A^2 S_{b_1 b_2} m) \xi^{(m-1)} + b_1^2 - A^2 S_{b_1}^2 = 0,$$

откуда имеем

$$\xi_{1,2} = \sqrt[m-1]{\frac{A^2 S_{b_1 b_2} - b_1 b_2 \pm \sqrt{(b_1 b_2 - A^2 S_{b_1 b_2})^2 - (b_2^2 - A^2 S_{b_2}^2)(b_1^2 - A^2 S_{b_1}^2)}}{m(b_2^2 - A^2 S_{b_2}^2)}}. \quad (4)$$

Приближенно стандартное отклонение глубины изменения механических свойств с учетом (1) можно рассчитать по формуле [13]

$$\left(\frac{S_{x_0}}{x_0}\right) \approx \left(\frac{S_{b_1}}{b_1}\right)^2 \left(\frac{1}{m-1}\right)^2 + \left(\frac{S_{b_2}}{b_2}\right)^2 \left(\frac{1}{m-1}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{m-1}\right)^2 \frac{S_{b_1 b_2}}{b_1 b_2}$$

или

$$\frac{S_{x_0}}{x_0} \cong \frac{1}{m-1} \sqrt{\left(\frac{S_{b_1}}{b_1}\right)^2 + \left(\frac{S_{b_2}}{b_2}\right)^2 - 2\left(\frac{S_{b_1 b_2}}{b_1 b_2}\right)}. \quad (5)$$

Глубина изменения механических характеристик и ее доверительные интервалы для случая логарифмической линии регрессии определяются из выражений

$$\frac{dy}{dx} = b_1 + b_2 \frac{0,43429}{x} = 0, \quad x = x_0 = -\frac{b_2}{b_1} 0,43429. \quad (6)$$

Считаем, что $Z = b_1 + b_2 \frac{0,43429}{\xi}$ распределяется нормально со средним значением $\bar{Z} = 0$ и дисперсией

$$S_Z^2 = S_{b_1}^2 + S_{b_2}^2 \frac{0,43429^2}{\xi^2} + 2S_{b_1 b_2} \frac{0,43429}{\xi}.$$

Решение неравенства $|Z|/S_Z < A$ приводит к уравнению второй степени относительно ξ :

$$\frac{M^2}{\xi^2} (b_2^2 - A^2 S_{b_2}^2) + \frac{2M}{\xi} (b_1 b_2 - A^2 S_{b_1 b_2}) + (b_1^2 - A^2 S_{b_1}^2) = 0.$$

Отсюда следует

$$\xi_{1,2} = \frac{M(b_2^2 - A^2 S_{b_2}^2)}{A^2 S_{b_1 b_2} - b_1 b_2 \pm \sqrt{(A^2 S_{b_1 b_2} - b_1 b_2)^2 - (b_1^2 - A^2 S_{b_1}^2)(b_2^2 - A^2 S_{b_2}^2)}}. \quad (7)$$

Стандартное отклонение значения x_0 рассчитывается с учетом [13] по формуле

$$\left(\frac{S_{x_0}}{x_0}\right)^2 \cong \left(\frac{S_{b_1}}{b_1}\right)^2 + \left(\frac{S_{b_2}}{b_2}\right)^2 - 2\frac{S_{b_1 b_2}}{b_1 b_2}. \quad (8)$$

При регрессионном анализе значения коэффициентов уравнения линии регрессии и абсциссы точки экстремума первоначально рассчитывали по формулам метода наименьших квадратов, затем по (1) или (6) – с учетом механических характеристик, существенно отличающихся от исходных. После того, как точки замера исходных характеристик были сдвинуты в направлении оси x до совпадения их абсцисс с абсциссой точки экстремума линии регрессии, решение проводили

снова уже с учетом преобразованных таким образом замеров исходных механических характеристик. Решение повторяли до тех пор, пока разница между абсциссами точек экстремума двух последних линий регрессии не превышала наперед заданного числа, равного 0,01 мм. Коэффициент параболической линии регрессии принимал значения 2 – 25. Из всевозможных линий регрессии выбирали линию, имеющую наименьшую остаточную дисперсию s^2 . Лучшей линией регрессии оказалась параболическая зависимость.

Доверительные границы и стандартные отклонения глубины изменения механических характеристик рассчитывались соответственно по формулам (4), (7) и (5), (8). Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 1. Как видно, 95 %-ные доверительные интервалы на глубину наклепа, рассчитанные по результатам замеров условного предела текучести, составляют 11 – 36 % глубины наклепа, а по результатам измерений твердости, определяемой методом Виккерса, – 32 – 75 %. Для всех испытываемых образцов гипотеза равенства средних значений глубины наклепа, определенных по результатам замеров твердости и предела текучести, проверенная по критерию Стьюдента, не подтвердилась. Глубина наклепа, определенная по изменениям условного предела текучести, на 25 – 50 % больше глубины, определенной по изменениям твердости. Различие возрастает с уменьшением приведенной кривизны ролика и детали. Значения коэффициента $k_{\sigma_{0,2}}$, характеризующего это различие, приведены в табл. 1.

Различие глубины наклепа, определенной по $HV10$ и $\sigma_{0,2}$, обусловлено тем, что при одной и той же степени деформации условный предел текучести возрастает в большей степени, чем твердость, т. е. предел текучести является более чувствительной механической характеристикой для определения глубины пластической деформации, чем твердость.

Ранее установленное отношение толщины слоя со сжимающими остаточными напряжениями к глубине наклепа по твердости находится в пределах 1,2 – 1,5 [14], что соответствует значениям коэффициента $k_{\sigma_{0,2}}$. Можно считать, что глубина залегания сжимающих напряжений близка глубине

наклепа, определенной по пределу текучести.

Таблица 1. Результаты исследования глубины наклепа по изменениям механических свойств HV_{10} и $\sigma_{0,2}$ поверхностного слоя вала диаметром 220 мм, обкатанного с усилием 50 кН

№№ пп	r_p , мм	D_p , мм	Приведенная кривизна ΣK , мм ⁻¹	a , мм	b , мм	Найденная по изменению HV_{10}					
						Степень наклепа, $\frac{\Delta HV_{10}}{HV_{10}}$	Разброс исходной твёрдости HV , %	t , мм			95 %-ый доверительный интервал, %
								Номинальная χ_0	Наибольшая ζ_1	Наименьшая ζ_2	
1	10	105	0,128	4,3	2,15	0,40	14	6,18	8,0	5,0	48
2	18	105	0,0835	3,8	2,65	0,37	6,2	6,3	8,0	5,12	48
3	100	105	0,035	5,1	2,9	0,21	8,6	4,93	6,6	3,9	58
4	∞	5	0,2	12,5	1,2	0,61	12,4	2,49	3,05	2,22	32
5	∞	12,5	0,16	11,5	1,9	0,41	9,2	3,45	4,34	3,01	38
6	∞	32	0,053	12	2,65	0,32	11,3	4,41	6,75	3,58	75

Продолжение табл. 1

№№ пп	Найденная по изменению $\sigma_{0,2}$						$k_{\sigma_{0,2}}$	Теоретическая глубина наклепа, мм					
	Степень наклепа, $\Delta\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2}$	Разброс исходного $\sigma_{0,2}$, %	t , мм			95 %-ый доверительный интервал, %		по Хейфелю [15]	по Петушкову [16]	по Дрозду [17]	по Черному [18]	по Браславскому [14]	По теории средних касательных напряжений [19, 20]
			Номинальная χ_0	Наибольшая ζ_1	Наименьшая ζ_2								
1	1,05	12,5	8,01	8,67	7,77	11,2	1,3	7,88	5,1	7,15	8,83	7,2	7,8
2	0,80	14	8,08	9,80	7,40	29,7	1,28	7,8	4,2	6,55	8,73	7,2	7,7
3	0,67	9,5	7,44	8,05	7,20	11,4	1,5	8,12	2,87	5,95	9,1	6,8	7,2
4	1,30	13	3,12	3,62	2,74	30	1,25	-	-	-	-	3,4	3,2
5	1,13	13,6	4,82	6,05	4,26	36	1,35	-	-	-	-	3,3	4,07
6	0,90	11	6,16	7,73	5,6	36	1,40	-	-	-	-	2,1	3,8

При сравнении результатов расчета глубины наклепа по методикам [14 – 18] и по теории средних касательных напряжений (см. табл. 1) с результатами экспериментальной ее проверки получены следующие данные. Не обнаружено статистического различия по критерию Стьюдента между глубиной наклепа, рассчитанной по [15], и определенной экспериментально по пределу текучести для случая обкатывания вала торообразными роликами с профильными радиусами 10 и 18 мм, несмотря на то, что для этих случаев приведенная кривизна в контакте мала: соответственно 0,128 и 0,835 мм⁻¹. Нет различия также между глубиной наклепа по пределу текучести и по расчету в

соответствии с теорией средних касательных напряжений для всех торообразных и цилиндрического диаметром 5 мм роликов при соотношению полуосей пластического отпечатка в плоскостях качения и подачи ролика $b/a < 0,05$. Во всех остальных случаях различие существенно.

Значительное расхождение результатов расчета по теории средних касательных напряжений [19 – 20] для цилиндрических роликов диаметрами 12,5 и 32 мм при $b/a > 0,05$ объясняется тем, что в теории упругости при выводе зависимостей главных напряжений под прямоугольным отпечатком применен предельный переход, предполагающий, что в соприкосновении находятся цилиндры неограниченной длины. Вероятно, что при вдавливании короткого цилиндрического ролика, для которого $b/a = 1$, глубина пластической деформации будет незначительно отличаться от расчетной по [15] для сосредоточенной силы.

Различие глубины наклепа, определенной по $HV10$ и $\sigma_{0,2}$, обусловлено тем, что при одной и той же степени деформации условный предел текучести возрастает в большей степени, чем твердость, т. е. предел текучести является более чувствительной механической характеристикой для определения глубины пластической деформации, чем твердость.

Отношение глубины наклепа, определенной экспериментально по пределу текучести для прямолинейного отпечатка, к расчетной глубине обозначим символом k_u . Зависимость k_u от отношения полуосей пластического отпечатка b/a показана на рис. 5, б.

Итак, при обкатывании цилиндрическими роликами большой длины, когда $b/a < 0,05$, глубину наклепа можно рассчитывать по формулам теории упругости для прямоугольного отпечатка. С уменьшением длины прямолинейной образующей ролика $2a$, когда $b/a > 0,05$, расчетную глубину наклепа необходимо умножить на k_u . Полуширина пластического отпечатка b определяется экспериментально вдавливанием ролика или рассчитывается по формуле $b = D_p \varphi$, в которой средний угол вдавливания φ в зависимости от требуемого эффекта обкатывания можно принять равным 2,5 или 5°,

соответственно для чистового и упрочняющего обкатывания.

Список литературы:

1. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л. Г. Одинцов. — М. : Машиностроение, 1987. — 328 с.
2. Власов В. М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей / В. М. Власов. — М. : Машиностроение, 1987. — 304 с.
3. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. — М. : Машиностроение, 1985. — 424 с.
4. Фролов К. В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения / К. В. Фролов. — М. : Машиностроение, 1984. — 224 с.
5. Бутаков Б. И. Основные принципы технологии импульсного и малоскоростного воздействия на структуру и свойства металлов и сплавов: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.02.01 / Бутаков Борис Иванович. — К., 1992. — 533 с.
6. Бутаков Б. И. Оценка точности определения глубины наклепа при поверхностном пластическом деформировании / Б. И. Бутаков // Вестник машиностроения. — 1982. — № 11. — С. 22—24.
7. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. — М. : Оборонгиз, 1952. — 556 с.
8. Кобрин М. М. Эпюры остаточные напряжений при контактной и контактно-сдвиговой схеме поверхностного пластического деформирования / М. М. Кобрин // Вестн. машиностроения. — 1963. — № 1. — С. 56—60.
9. Солонин И. С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И. С. Солонин. — М. : Машиностроение, 1972. — 216 с.
10. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Борковский — М. : Наука, 1969. — 512 с.
11. Степнов М. Н. Статистическая обработка результатов механических

испытаний / М. Н. Степнов. — М. : Машиностроение, 1972. — 232 с.

12. Бутаков Б. И. Статистическая оценка точности определения глубины изменения механических свойств упрочненного поверхностного слоя / Б. И. Бутаков // Оборудование и технологии высоковольтного разряда в жидкости. — К. : Наук. думка, 1987. — С. 48—53.

13. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями / А. Хальд — М. : Изд-во иностр. литературы, 1956. — 664 с.

14. Браславский В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. — М. : Машиностроение, 1975. — 160 с.

15. Хейфец С. Г. Аналитическое определение глубины наклепанного слоя при обкатке роликами стальных деталей / С. Г. Хейфец // Сб. ЦНИИТМАШа. — М.: Машгиз, 1952. — кн. 49. — С. 7—17.

16. Кудрявцев И.В. Влияние кривизны поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом / И.В. Кудрявцев, Г.Е. Петушков // Вестник машиностроения. — 1966. — № 7. — С. 41—43.

17. Дрозд М.С. Расчет глубины распространения пластической деформации в зоне контакта тел произвольной кривизны / М.С. Дрозд, А.В. Федоров, Ю.И. Сидякин // Вестник машиностроения. — 1972. — № 1. — С. 54—57.

18. Черный А.Г. Исследование зависимости пределов выносливости упрочненных валов от характеристик поверхностного пластически деформированного слоя и параметров процессов упрочнения: дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук: 05.02.01 / Черный Александр Григорьевич. — М., 1971. — 215 с.

19. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х томах. Т. 2. Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко — М. : Машиностроение, 1968. — 463 с.

20. Беляев Н. М. Местные напряжения при сжатии упругих тел / Н. М. Беляев // Инженерные сооружения и строительная механика. — Л., 1924. — С. 20—32.

Анотація

Дослідження механічних властивостей і оцінка точності визначення глибини наклепаного шару при обкатуванні роликками

Бутаков Б.І., Марченко Д.Д., Артюх В.О., Зубехіна О.В.

У статті приведені результати досліджень механічних властивостей поверхневого шару після зміцнення їх пластичною деформацією за допомогою обкатування роликками. Зроблений статистичний розрахунок глибини наклепу, визначуваний по зміні умовної межі текучості і твердості по Віккерсу за допомогою регресійного аналізу. Виконана оцінка точності визначення глибини наклепу по змінах умовної межі текучості і твердості по Віккерсу.

Abstract

Research of mechanical properties and estimation of exactness of depth-finding of peening layer are at rolling-off rollers

Butakov B.I., Marchenko D.D., Artyukh V.A., Zubekhina A.V.

In the article the brought results over of researches of mechanical properties of superficial layer, after strengthening of them by a flowage by means of rolling-off rollers. Done statistic calculation of depth of slander, determined on the change of conditional limit of fluidity and hardness for Vickersy, by means of regressive analysis. The executed estimation of exactness of depth-finding of slander is on the changes of conditional limit of fluidity and hardness for Vickersy.