

РОЗРАБОТКА СПОСОБА ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКАМИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ С
ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ КОНТАКТНОЙ ПРОЧНОСТИ

BORIS BUTAKOV, DMITRIY MARCHENKO

Mykolayiv State Agrarian University, Ukraine
etcmtmp@yandex.ru

Аннотация. В статье описаны способ и технология обкатывания клиновым роликом рабочего профиля канатных блоков с целью снижения смятия канатами их поверхностного слоя. Представлены результаты исследования диффузии химических элементов Cr и C из основного металла в поверхностный слой в процессе поверхностного пластического деформирования.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, смятие поверхностного слоя, диффузия, канатный блок.

Детали, воспринимающие контактные нагрузки, относятся к наиболее ответственным элементам машин. Прочность таких деталей часто определяет надежность работы узла или машины в целом. Значительные рабочие усилия при наличии перекосов сопрягаемых деталей нередко приводят к смятию («подбивке») рабочих поверхностей, искажению их формы, изменению расчетных зазоров между деталями. В результате этого сокращается долговечность работы узла. В таких условиях работают, например, канатные блоки при разбивке поверхности их рабочего профиля канатами, валы, на которые установлены подшипники качения.

Применение термических или химико-термических методов упрочнения при изготовлении крупных деталей ограничено их габаритными размерами и массой. Наиболее простым и доступным, а часто и единственно возможным методом упрочнения таких деталей, является обработка поверхностей холодным пластическим деформированием [Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. 1995]. В статье представлены результаты исследования влияния поверхностного упрочнения обкатыванием роликами на контактную прочность сталей 20, 25Л, 35Л, 40 и 34ХН1М, работающих в условиях контактного смятия вблизи кромки.

Для испытаний использовали стандартную машину износа МИ и карусельный станок. При обычном использовании испытательных машин с параллельными осями вращения цилиндрических или конических роликов необходимым условием является полное прилегание контактирующих поверхностей. Для воспроизведения условий работы материала при кромочном контакте была предложена новая методика испытаний.

Цилиндрический ролик-образец контактировал с коническим роликом-эталоном с углом при вершине $\alpha = 4^\circ$. Величина угла выбрана из условий возможных перекосов реальных деталей машин при эксплуатации. В процессе испытания смятие кромки

приводит к образованию на цилиндрической поверхности испытуемого ролика-образца фаски, ширина которой обратно пропорциональна способности материалов сопротивляться смятию и измерялась с помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 с точностью 0,05 мм без снятия образца с машины после ее остановки. Эталонные конические ролики изготавливались из стали ХВГ твердостью *HRC* 58-62.

Принятый угол $\alpha/2 = 2^\circ$ обеспечивался шлифованием и выполнялся для серии образцов при одной настройке шлифовального станка. Ролики-образцы изготавливались из сталей 20, 25Л, 35Л, 40 и 34ХНМ. Для образцов из сталей 20, 40 и 34ХНМ использовался прокат в состоянии поставки, а заготовки для образцов из сталей 25Л и 35Л вырезали из отливок после их термообработки.

Обкатывались образцы на токарном станке однороликовым (диаметр ролика равен 60 мм) пружинным приспособлением при скорости 12 м/мин за один проход. Режимы обкатывания роликами выбирались по методике, описанной в работе [Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. 1995].

Перед испытаниями образцы подвергались металлографическому исследованию для определения микроструктуры. Структура сталей 20, 25Л и 40 представляет собой перлит на ферритной основе. В результате обкатывания зерна имеют вытянутую форму (волоконистость). Вблизи поверхности отчетливо видны следы пластической деформации. Структура стали 34ХНМ – сорбит и продукты распада аустенита во второй ступени без заметных следов пластической деформации. Этим объясняется незначительное повышение твердости таких образцов после упрочнения.

Твердость образцов измерялась по методу Виккерса прибором ХПО-250 при нагрузке 0,10 кН на их торцовых поверхностях после тонкой доводки. Ниже приведены относительное повышение поверхностной твердости и глубина распространения пластической деформации.

Марка стали	20	25Л	25Л	35Л
Усилие обкатывания в кН	12,00	12,00	1,20	10,00
Поверхностная твердость <i>HV</i> 10:				
исходная	158	151	151	188
после обкатывания роликами	235	266	198	272
Относительное повышение твердости в %	48	76	31	45
Глубина распространения пластической деформации:				
расчетная	4,4	4,47	1,41	3,9
фактическая	5,0	6,0	1,76	4,4
Марка стали	35Л	40	40	34ХНМ
Усилие обкатывания в кН	1,80	8,00	0,50	12,00
Поверхностная твердость <i>HV</i> 10:				
исходная	188	200	200	366
после обкатывания	232	253	236	405
Относительное повышение твердости в %	22	27	18	11
Глубина распространения пластической деформации:				
расчетная	1,64	3,27	0,82	2,32
фактическая	2,3	4,0	0,9	3,0.

Наибольшее относительное повышение твердости наблюдается у сталей, имеющих ферритно-перлитную структуру. Испытания проводились в условиях фрикционного

качения при ведущем ролике-эталоне. Скорость вращения ролика-образца 31,4 м/мин (200 циклов в минуту); усилие на образце 1,00 кН; смазка – машинным маслом. За критерий оценки контактной прочности образцов на смятие кромки принято количество циклов испытаний, при котором ширина контактного пояса достигает заданной величины.

В нашем случае испытания заканчивались при достижении ширины пояса 5,5 мм не менее чем в трех измеряемых точках. Результаты испытаний образцов, обкатанных с различными режимами и числом циклов N , приведены на рис. 1. Образцы, обкатанные с чистовым режимом (кривые 3, 5 и 7), показывают незначительное повышение их контактной прочности на смятие по сравнению с необкатанными. Это объясняется малым повышением твердости таких образцов и недостаточной глубиной распространения пластической деформации. Образцы, обкатанные с упрочняющим режимом, показали значительное повышение долговечности при работе на смятие по сравнению с неупрочненными. Очевидна связь эффективности упрочнения образцов с приростом их твердости при обкатывании. Так, образцы из стали 25Л (рис. 1, б), получившие наибольший прирост твердости, показали повышение долговечности в 4 раза, а образцы из стали 40 (рис. 1, з) – с меньшим приростом твердости – только в 1,9 раза.

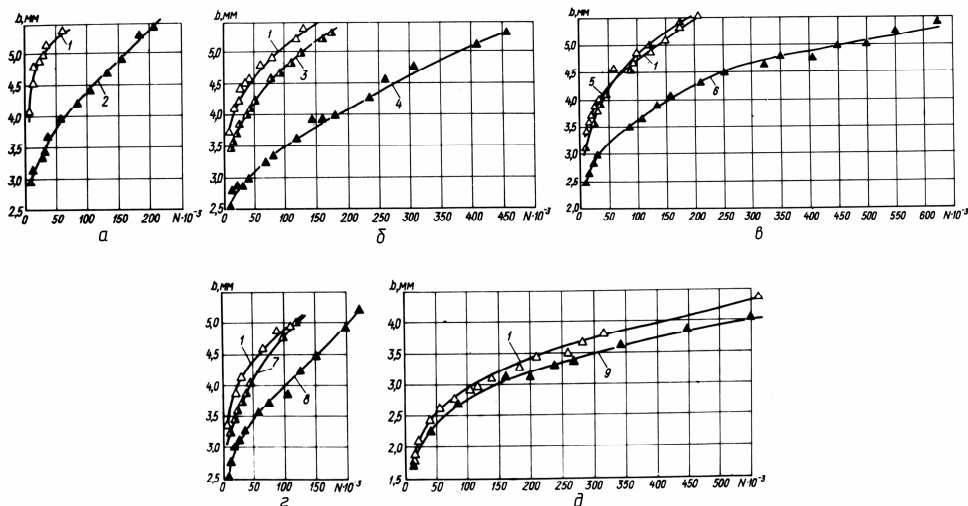


Рис. 1. Результаты испытания образцов на машине износа МИ:

а - из стали 20; б - из стали 25Л; в - из стали 35Л; з - из стали 40; д - из стали 34ХНМ; 1 - без обкатывания; 2 - обкатанный с усилием $P = 12,00$ кН, профильный радиус ролика $r_p = 5$ мм, подача $s = 0,15$ мм/об; 3 - $P = 1,20$ кН, $r_p = 16$ мм, $s = 0,23$ мм/об; 4 - $P = 12,00$ кН, $r_p = 5$ мм, $s = 0,15$ мм/об; 5 - $P = 1,80$ кН, $r_p = 20$ мм, $s = 0,34$ мм/об; 6 - $P = 10,00$ кН, $r_p = 5$ мм, $s = 0,15$ мм/об; 7 - $P = 0,50$ кН, $r_p = 5$ мм, $s = 0,07$ мм/об; 8 - $P = 8,00$ кН, $r_p = 5$ мм, $s = 0,15$ мм/об; 9 - $P = 12,00$ кН, $r_p = 8$ мм, $s = 0,15$ мм/об

Fig. 1. Results of test of standards on the machine of wear of MI:

а - from the steel 20; б - from the steel 25Л; в - from the steel 35Л; з - from the steel 40; д - from the steel 34ХНМ; 1 - without rolling; 2 - rolling with the effort $P = 12,00$ kN, type radius of roller of $r_p = 5$ mm, serve of $s = 0,15$ mm/ob; 3 - $P = 1,20$ kN, $r_p = 16$ mm, $s = 0,23$ mm/ob; 4 - $P = 12,00$ kN, $r_p = 5$ mm, $s = 0,15$ mm/ob; 5 - $P = 1,80$ kN, $r_p = 20$ mm, $s = 0,34$ mm/ob; 6 - $P = 10,00$ kN, $r_p = 5$ mm, $s = 0,15$ mm/ob; 7 - $P = 0,50$ kN, $r_p = 5$ mm, $s = 0,07$ mm/ob; 8 - $P = 8,00$ kN, $r_p = 5$ mm, $s = 0,15$ mm/ob; 9 - $P = 12,00$ kN, $r_p = 8$ mm, $s = 0,15$ mm/ob

Особенно высокий эффект упрочнения обкатыванием роликами наблюдается у литых сталей 25Л и 35Л и низкоуглеродистой стали 20, что обусловливается повышением

прочности и твердости преобладающего в их структуре феррита. У литых сталей этот эффект увеличивается за счет уменьшения при упрочнении литейных пор и раковин. Незначительный эффект упрочнения для стали 34ХН1М (рис. 1, д) можно объяснить высокой исходной твердостью ($HB\ 329$) и мелкозернистой сорбитной структурой, не чувствительной к наклепу. Эта структура была получена в результате термической обработки стали.

При испытании образцов на машине износа МИ наружные поверхности вращения контактируют, тогда как в большинстве реальных случаев внутренние кромки втулок сминаются из-за перекоса более твердых валов. Испытания упрочненных раскатыванием роликами образцов-втулок из сталей 25Л и 34ХН1М были проведены на карусельном станке в условиях, близких к условиям эксплуатации валов и корпусов.

Ниже приведены данные по относительному повышению поверхностной твердости после раскатывания и глубине распространения пластической деформации:

Марка стали	25Л	34 ХН1М
Поверхностная твердость, $HV\ 10$:		
исходная	148	207
после упрочнения	215	248
Относительное повышение твердости в %	45	19
Глубина распространения пластической деформации в мм:		
расчетная	12,7	6,7
фактическая	13,5	7,0.

В кулачках карусельного станка закрепляется образец, а в резцедержателе – эталонный цилиндрический ролик, установленный в пружинящем корпусе требуемой жесткости. Прикладываемая нагрузка определяется прогибом корпуса и контролируется закрепленным на нем индикатором. Испытания проводились при усилии на ролике 20,80 и 30,00 кН и частоте вращения планшайбы 50 об/мин, со смазкой машинным маслом.

Перекося детали для создания кромочного контакта в данном случае имитируют наклоном оси ролика относительно образующей втулки на 2° . После каждого испытания приспособление с роликом выводят из втулки. Внутри втулки на специальной подставке устанавливают бинокулярный микроскоп МБС-1 для измерения ширины контактного пояса. Эффективность упрочнения оценивается по ширине контактного пояса на упрочненном образце по сравнению с неупрочненным при равном количестве циклов.

Результаты испытаний представлены на рис. 2. Наибольшая скорость расширения контактного пояса наблюдается в течение первых $4,5 \times 10^3$ циклов в минуту, когда напряжения в зоне контакта особенно высоки. Затем ширина стабилизируется или изменяется незначительно. Ниже приведено относительное уменьшение деформации образцов в зависимости от числа циклов и нагрузки при испытании:

Марка стали	25Л	25Л	25Л	25Л
Количество циклов	$4,5 \times 10^3$	$4,5 \times 10^3$	35×10^3	35×10^3
Нагрузка при испытании в кН	20,80	30,00	20,80	30,00
Ширина пояса в мм:				
без упрочнения	11,2	15,0	13,3	16,8
с упрочнением	9,8	11,7	10,7	12,1
Относительно уменьшенная деформация в %	14	28	24	39

Марка стали	34 ХН1М	34 ХН1М	34 ХН1М	34 ХН1М
Количество циклов	$4,5 \times 10^3$	$4,5 \times 10^3$	35×10^3	35×10^3
Нагрузка при испытании в кН	20,80	30,00	20,80	30,00
Ширина пояска в мм:				
без упрочнения	6,7	8,4	8,0	10,2
с упрочнением	6,0	7,2	7,3	9,4
Относительно уменьшенная деформация в %	12	17	10	8.

Эффективность упрочнения стали 25Л (по принятому критерию) повышается с увеличением нагрузки и числа циклов испытаний (рис. 2, а), тогда как у стали 34ХН1М (рис. 2, б) при увеличении числа циклов испытаний с $4,5 \times 10^3$ до 35×10^3 при нагрузке 30,00 кН эффективность несколько снизилась (с 17 до 8%). Это объясняется предельным наклепом такой стали в ходе самих испытаний. При оценке эффективности упрочнения деталей в эксплуатации следует учитывать, что даже незначительное уменьшение деформации зоны контакта (в пределах 10-20%) многократно увеличивает их долговечность. Так, для стали 25Л при нагрузке испытаний 30,00 кН ширина контактного пояска упрочненной втулки через 35 тыс. циклов составляет 12 мм (рис. 2, а), неупрочненная втулка уже через 2,5 тыс. циклов имеет такую же деформацию, т.е. долговечность упрочненной поверхности возрастает в 14 раз. Аналогичная зависимость наблюдается и для стали 34ХН1М.

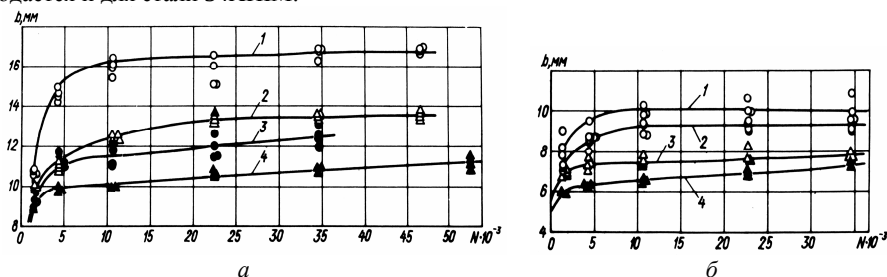


Рис. 2. Результаты испытаний образцов-втулок на карусельном станке:
а – сталь 25Л; б – сталь 34ХН1М; 1 – без обкатывания, усилие при испытании 30,00 кН; 2 – то же, 20,80 кН; 3 – раскатанных, усилие при испытании 30,00 кН; 4 – то же, 20,80 кН

Fig. 2. Results of tests of standards-hobs on a merry-go-around machine-tool:
а – the steel 25Л; б – the steel 34ХН1М; 1 – without rolling, effort at the test 30,00 kN; 2 – the same, 20,80 kN; 3 – rolled, effort at the test 30,00 kN; 4 – the same, 20,80 kN

Проведенные исследования показали, что обкатывание роликами поверхностей, работающих на смятие, является эффективным средством повышения их долговечности. Особенно высок эффект упрочнения литых сталей, деформация которых сопровождается устранением несовершенств их структуры (пор, раковин и т.п.), которые часто бывают в поверхностном слое канатных блоков и корпусных деталей.

Для оценки степени упрочнения сталей с помощью обкатывания роликами образцы из сталей 40, 45 и армостали были обкатаны на токарном станке с помощью устройства с торообразным роликом. Профильный радиус ролика r_p был принят равным 2,5 мм и 5 мм. Средний угол вдавливания ролика φ_{cp} в зависимости от усилия обкатывания P изменяется для разных образцов в пределах от $2,5^\circ$ до 5° , а также $\varphi_{cp} = 10^\circ$, для того чтобы превысить рекомендуемый для совмещенного чистового и упрочняющего обкатывания $\varphi_{cp} = 5^\circ$ и получить значительную степень деформации металла. Обкатыванию подвергались

конические образцы диаметром 200 мм. С целью моделирования процесса обкатывания роликом боковой поверхности ручья канатного блока, образующая которой составляет с перпендикуляром к оси вращения блока угол $22,5^\circ$, угол α_m у основания конуса образцов равен $75^\circ 45'$.

Величина угла α_m определена из условия равенства окружного проскальзывания на поверхности контакта ролика с деталью при обкатывании профиля канатного блока и конусной модели.

После обкатывания с разными режимами (см. табл. 1) образцы разрезались и в поперечном сечении измерялась микротвердость H_μ с нагрузкой на пирамиду 1,0 Н.

Распределение микротвердости H_μ по глубине 4-х образцов показано на рис. 3.

На графиках (рис. 3, б - г) для стальных образцов из сталей 45 и 40Х выявлено снижение микротвердости $H_{\mu(n.z.)}$ в переходной зоне между упрочненным слоем и исходным металлом, микротвердостью $H_{\mu(u.)}$. Средние значения $H_{\mu(n.z.)}$ и $H_{\mu(u.)}$ нормально распределенных величин сравним с помощью t -критерия Стьюдента [Степнов М.Н. 1972, Степнов М.Н. 1985].

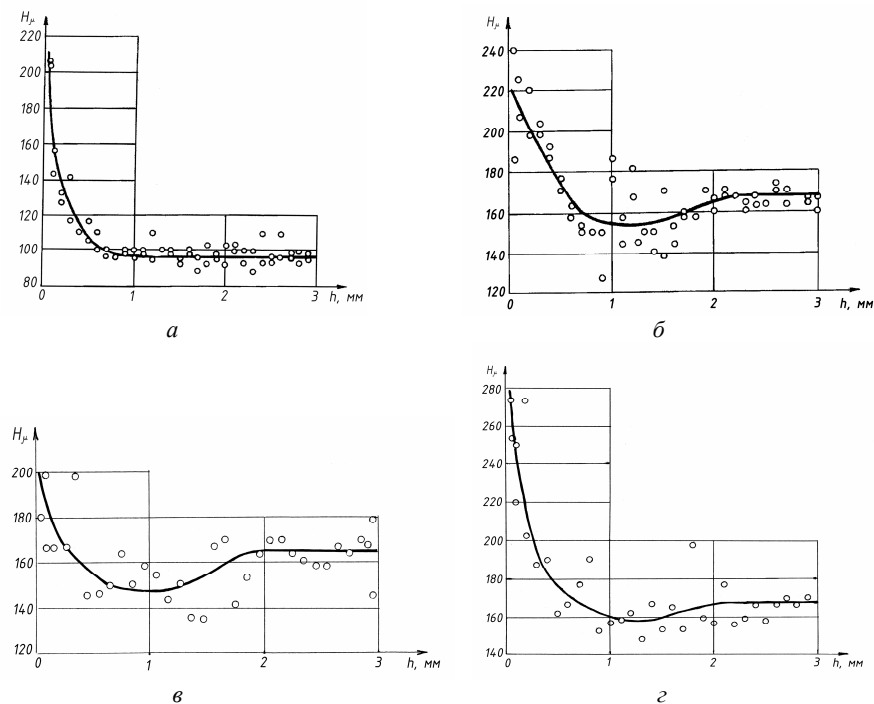


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя:
а – армкожезецо, $r_p = 2,5$ мм, $P = 1,5$ кН; б – сталь 45, $r_p = 2,5$ мм, $P = 4,5$ кН; в – сталь 45, $r_p = 5$ мм, $P = 5$ кН; г – сталь 40Х, $r_p = 2,5$ мм, $P = 5,5$ кН

Fig. 3. Distributing of microscopic hardness on the depth of the consolidated layer:

а – armkogezezo, $r_p = 2,5$ мм, $P = 1,5$ кН; б – steel 45, $r_p = 2,5$ мм, $P = 4,5$ кН; в – steel 45, $r_p = 5$ мм, $R = 5$ кН; г – steel 40Х, $r_p = 2,5$ мм, $R = 5,5$ кН

Для этого определяем сводную дисперсию

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}, \quad (1)$$

и

$$t = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (2)$$

где:

n_1, n_2 - число замеров H_μ в переходной зоне и в исходном металле соответственно;

S_1^2, S_2^2 - дисперсии значений $H_{\mu(n.з.)}$ и $H_{\mu(u.)}$ соответственно;

$\overline{X_1}, \overline{X_2}$ - средние значения $H_{\mu(n.з.)}$ и $H_{\mu(u.)}$ соответственно.

Если $|t| \geq t_{\alpha, K}$ (табл. V [Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. 1969]), то разница средних значений существенна. Величину доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$ выбираем равной 0,95, ($\alpha = 0,05$), число степеней свободы определяем из выражения $K = n_1 + n_2 - 2$. Результаты расчетов помещены в табл. 1.

Анализ результатов исследования микротвердости показывает, что при обкатывании роликами сталей 40X и 45 наблюдается значительный спад микротвердости в переходной зоне между упрочненным слоем и исходным металлом. При обкатывании армкожелеза (рис. 3, а) такого спада не выявлено.

Высказана идея диффузионного переноса упрочняющих химических элементов (Cr, C) из глубинных слоев на поверхность. Распределение упрочняющих химических элементов Cr и C было исследовано с помощью микрохиманализатора фирмы Джеол „Supraprobe – 733”. Установлено, что в переходной зоне содержание Cr и C уменьшилось на 20 – 30 %, а в упрочненном слое увеличилось до 10 – 15 %. Аналогичные результаты получены в работах Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. 1982, Марковский Е.А. 1983] на поверхностях трения и при термо- и электромеханическом упрочнении сталей [Бабей Ю.И. 1988]. В этих работах в качестве основных механизмов диффузии называют температурный градиент [Бокштейн Б.С. 1978] и электроперенос [Кузменко П.П. 1983]. Поскольку в нашем случае эти механизмы или несущественны или совсем отсутствуют, следует считать при ППД существенным механизмом диффузии является градиент плотности дислокаций [Бутаков Б.И. 1992].

Результаты лабораторных исследований по влиянию обкатывания роликами на долговечность стальных деталей, работающих при контактном смятии, проверены в производственных условиях при работе канатных блоков со стальными канатами.

Рабочий профиль канатного блока судоперегрузателя ООО “Николаевский глинозёмный завод” состоит из тороидальной части, выполненной с радиусом профиля несколько большим половины диаметра каната, $r_\phi = 20 - 22$ мм, и профиля двух конических поверхностей, выполненных под углом $\sim 22^\circ$ к перпендикуляру оси блока.

Таблица 1. Параметры обкатывания конусных деталей из сталей 45, 40X и армкожелеза
Table 1. Parameters of rolling of cone details from steels 45, 40X and armkogezeza

Марка материала	r_p , мм	D_p , мм	P , кН	φ , град	H_{max}	$t_{H\mu}$	$\sum K$ * мм ⁻¹	$K_{\sigma_{0,2}}$	$t_{\sigma_{0,2}}$	$t_{\text{теор}}$ **
45	5	32	5,00	2,5	200	1,8	0,241	1,4	2,52	2,55
45	2,5	32	4,50	5	240	1,8	0,441	1,3	2,34	2,35
40X	2,5	32	5,50	5	275	1,7	0,441	1,3	2,21	2,25
Армкожелезо	2,5	32	1,50	5	230	1,0	0,441	1,3	1,3	1,35

n_1	n_2	$\overline{x_1}$ ($H_{\mu(n.z.)}$)	$\overline{x_2}$ ($H_{\mu(u.)}$)	S_1^2	S_2^2	t	t_{α} , к	Степень различия $\overline{x_1}$ и $\overline{x_2}$
9	12	148,18	164,82	70,88	142,62	5,3	1,96	Различие существенно
24	18	174,86	186,28	175,4	13,54	3,55	1,96	Различие существенно
11	34	157,2	167,3	34,40	121,39	2,49	2,1	Различие существенно
9	37	98,0	97,56	4,25	29,3	0,238	1,96	Различие не существенно

$$* \sum K = \frac{1}{r_p} + \frac{2}{D_p} + \frac{2}{D_M}; \quad ** t_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \quad [\text{Хейфец С.Г. 1952}],$$

где: P - усилие обкатывания, кН; σ_T - предел текучести стали, кН/мм².

$K_{\sigma_{0,2}} = t_{\sigma_{0,2}} / t_{H\mu}$. Его значения выбираются в зависимости от приведенной кривизны $\sum K$ в контакте ролика с деталью по графику (рис. 65, в [Бутаков Б.И. 1992]).

При работе блока наиболее интенсивному износу подвергается галтельный переход, где наблюдается отслаивание металла, особенно при наличии в поверхностях слоя газовых раковин и пустот, полученных в процессе отливки заготовок из литейных сталей 25Л, 35Л. Однако разбиваются канатом и конические поверхности. Поэтому целесообразно подвергнуть деформированию всю рабочую поверхность канатного блока. Расчеты параметров клинового ролика для обкатывания рабочей поверхности профиля блока выполнены следующим образом.

Широкая часть клинового ролика (см. рис. 4.) принята равной ширине впадины канатного блока на его максимальном диаметре. Приведенный радиус r_p' кривизны ролика и детали в их осевом сечении при обкатывании конической поверхности равен радиусу r_p кривизны ролика. С целью получения интенсивной деформации боковых поверхностей профиля при усилиях обкатывания (~ 30,0 кН) принимаем равным 16 мм. Тогда приведен-

ый радиус r_p' кривизны ролика и детали в их осевом сечении при обкатывании галтели (при $R_r \sim 22$ мм) определится по формуле

$$r_p = \frac{r_p' R_r}{R_r - r_p'} \quad (3)$$

и будет равен 60 мм.

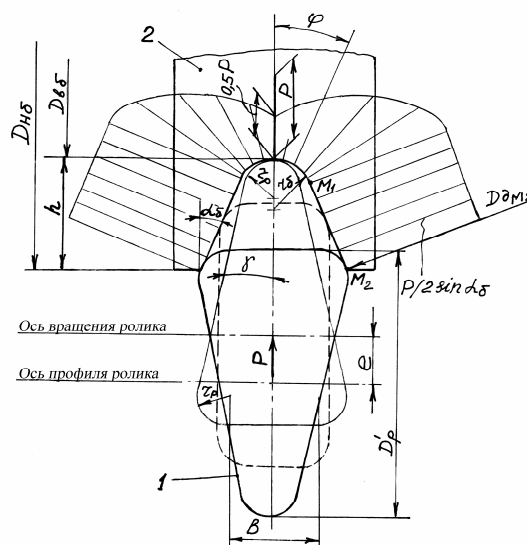


Рис. 4. Схема расчета параметров процесса обкатывания рабочей поверхности канатного блока клиновыми роликом:

1 - ролик; 2 - обрабатываемая деталь

Fig. 4. Chart of computation of parameters of process of rolling of working surface of rope block wedge by a roller:

1 - roller; 2 - the processed detail

При $r_p' = 60$ мм, диаметре ролика $D_p = 140$ мм и твердости 160 HB стали 35Л, из которой изготавливаются канатные блоки, необходимое усилие на ролике в соответствии [Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. 1995] составит $\sim 20,0$ кН.

Биение профиля ролика согласно рис. 4. составляет:

$$b = 2[(h - r_\delta) \operatorname{tg} \alpha_\delta + r_\delta / \cos \alpha_\delta - r_p \cos \alpha_\delta], \quad (4)$$

где:

h , r_δ , α_δ - соответственно глубина, радиус и угол профиля детали;

r_p - радиус профиля ролика. Эксцентриситет (расстояние между осями вращения и профиля ролика) определится по зависимости:

$$e = (h - r_p + r_p \sin \alpha_{\bar{\sigma}}) / 2. \quad (5)$$

Половина угла биения профиля клинового ролика

$$\gamma = \arctg \left[\frac{(h - r_{\bar{\sigma}}) \operatorname{tg} \alpha_{\bar{\sigma}} + r_{\bar{\sigma}} / \cos \alpha_{\bar{\sigma}} - r_p \cos \alpha_{\bar{\sigma}}}{D_p' - 2r_p} \right], \quad (6)$$

где:

D_p' - диаметр ролика.

Условный диаметр ролика при обкатывании тороидальной поверхности канатного блока для текущего значения угла φ :

$$D_{P_M} = \frac{D_p' - 2r_p (1 - \cos \varphi)}{\cos \varphi}. \quad (7)$$

В точке M_1 сопряжения тороидальной и конической поверхностей профиля блока $\varphi = 90^\circ - \alpha_{\bar{\sigma}}$, тогда:

$$D_{P_M} = \frac{D_p' - 2r_p (1 - \sin \alpha_{\bar{\sigma}})}{\sin \alpha_{\bar{\sigma}}}. \quad (8)$$

Условный диаметр детали в точке контакта ее с роликом на тороидальной поверхности профиля:

$$D_{D_M} = \frac{D_{B_{\bar{\sigma}}} + 2r_{\bar{\sigma}} (1 - \cos \varphi)}{\cos \varphi}, \quad (9)$$

и на наружном диаметре блока $D_{H_{\bar{\sigma}}}$:

$$D_{D_{M_2}} = D_{H_{\bar{\sigma}}} / \sin \alpha_{\bar{\sigma}}. \quad (10)$$

Усилие в точке контакта с тороидальной поверхностью блока:

$$P_M = P / 2 \cos \varphi, \quad (11)$$

где:

P - усилие пружины.

На конической поверхности профиля в точках M_1 и M_2 усилие обкатывания определится по зависимости:

$$P_{M_1} = P_{M_2} = P / 2 \sin \alpha_{\delta}. \quad (12)$$

Конструкция устройства для обкатывания канатных блоков показана на рис.5. Клиновой ролик 1, находящийся в контакте с деталью 2, установлен на оси 3 с помощью игольчатого подшипника 4. Ось 3 установлена в расточки рычага 5. Рычаг 5 смонтирован на кронштейне 6 с возможностью поворота вокруг оси 7 на игольчатых подшипниках 8 и упорных подшипниках 9 и 10. Ось 3 прикреплена к рычагу 5 планками 11 и 12. В расточке рычага 5 установлены сферическая шайба 13 и втулка 14, на которую одета пружина 15. С верхнего торца пружины 15 вставлена втулка 16. В державку 6 ввернута тяга 17 и зафиксирована штифтом 18. На верхний конец тяги 17 навинчена гайка 19 с рукояткой 20. В теле державки 6 выполнена расточка с резьбой, в которую вкручен винт 21 с контргайкой 22. В резьбовые расточки балансира 5 ввернуты рым-болты 23 и 24.

Устройство работает следующим образом. Канатный блок 2 устанавливают расточенным отверстием в ступице на оправку, вставленную в центральное отверстие планшайбы карусельного станка, закрепляют к планшайбе по торцу ступицы фиксирующей гайкой и притягивают планками к планшайбе станка через мерные призмы. Устройство квадратным концом державки 6 закрепляют в резцедержателе бокового суппорта карусельного станка. Перемещением суппорта станка ролик 1 вводят в ручей канатного блока, таким образом, чтобы ролик находился посередине оси 3, а своей узкой частью рабочего профиля коснулся впадины ручья.

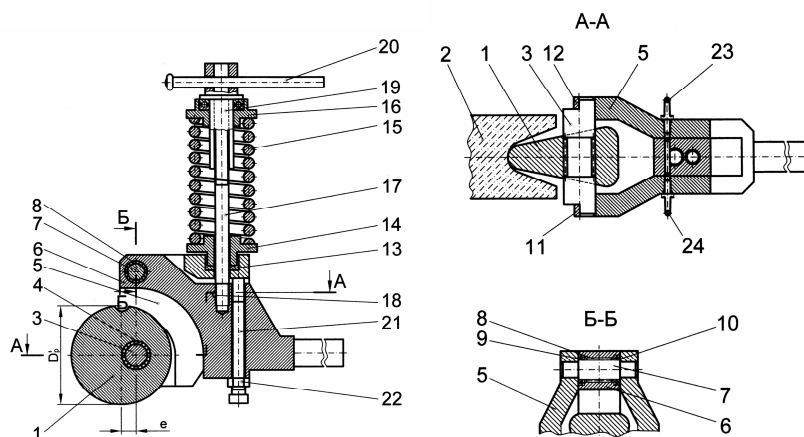


Рис. 5. Устройство для обкатывания канатных блоков клиновым роликом:

1 – ролик; 2 – обкатываемая деталь; 3, 7 – ось; 4, 8, 9, 10 – подшипники; 5 – рычаг; 6 – кронштейн; 11, 12 – планки; 13 – сферическая шайба; 14, 16 – втулка; 15 – пружина; 17 – тяга; 18 – штифт; 19, 22 – гайка; 20 – рукоятка; 21 – винт; 23, 24 – рымболты

Fig. 5. Device for rolling of rope blocks by a wedge roller:

1 – roller; 2 – rolling detail; 3, 7 – os; 4, 8, 9, 10 – bearing; 5 – richag; 6 – bracket; 11, 12 – slats; 13 – spherical puck; 14, 16 – hob; 15 – spring; 17 – traction; 18 – shtift; 19, 22 – nut; 20 – handle; 21 – screw; 23, 24 – rimbolti

Для передачи усилия от ролика на обкатываемую деталь вращением винта 21 устанавливают зазор между его торцом и поверхностью балансира 5 величиной от 2-х до 3-х мм. Обкатываемую поверхность детали смазывают машинным маслом и включают вращение детали со скоростью V от 30 до 50 м/мин. В процессе вращения детали и ролика рабочие торцы ролика образуют на обкатываемой поверхности детали два синусоидальных следа,

последние постепенно с каждым оборотом детали смещаются в круговом направлении, пока вся поверхность ручья не окажется деформированной. При этом наличие эксцентриситета (e) на ролике позволяет свести до минимума (менее 2-х мм) перемещение оси ролика 1 вместе с балансиром 5 относительно державки 6. Усилие на ролике при его вращении колеблется в пределах $\pm 5\%$, так как сила трения на оси балансира мала, из-за малого коэффициента трения в подшипниках качения 8-10 (не более 0,008). Этим обеспечивается равномерная деформация поверхностного слоя ручья блока. После окончания процесса обкатывания вращением винта 21 поворачивают балансир 5 так, чтобы исключить контакт ролика с деталью, а затем выключают вращение последней и перемещением бокового суппорта выводят ролик из ручья блока.

Оптимальное усилие P_T обкатывания, обеспечивающее средний угол $\varphi_{cp} = 5^\circ$ вдавливания ролика в обрабатываемую поверхность, при обкатывании тороидальной поверхности ручья выбирается по номограмме [Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. 1995] в зависимости от условного диаметра D_{pm} ролика, рассчитанного по формуле (7), приведенного радиуса r_p' кривизны ролика, рассчитанного по формуле (3) и диаметра D_{dm} детали, рассчитанного по формулам (9, 10). По рассчитанным значениям геометрических параметров ролика и детали выбирается оптимальное усилие P_K обкатывания конической поверхности ручья.

Расчеты показывают, что $P_K \ll P_T$ и, несмотря на то, что при постоянном усилии пружины P приложенное усилие P_M в точке контакта ролика с тороидальной поверхностью ручья, рассчитанное по формуле (11), несколько меньше усилия $P_{M_1} = P_{M_2}$, рассчитанного по формуле (12) для конической поверхности ручья, на ней в процессе обкатывания образуется волнистость из-за увеличенного угла φ_{cp} вдавливания ролика. Этот недостаток устраняется выполнением профильного радиуса r_p переменной величины, что обеспечив-

ает постоянство угла $\varphi_{cp} = 5^\circ$ вдавливания ролика на всех участках профиля детали. Этим обеспечивается высокое качество обработки всех участков профиля ручья. При усилии P на ролике, равном 10 кН, глубина пластической деформации поверхностного слоя ручья на вершине профиля, рассчитанная согласно [Хейфец С.Г. 1952] по формуле

$$t_{теор} = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \text{ при } \sigma_T, \text{ равном } 0,3 \text{ кН/мм}^2 \text{ для стали 35Л, составила } 4,5 \text{ мм.}$$

Степень повышения твердости поверхностного слоя составила $\sim 28\%$.

Испытание обкатанных блоков на смятие их канатами проводилось на судоперегрузателях ООО „НГЗ“. Блоки диаметром 800 мм из сталей 25Л и 35Л устанавливались парами (один обкатанный, второй – необкатанный) по 8 блоков на судоперегрузатель. Испытание проводилось 8 месяцев. Эффекта упрочнения с помощью поверхностного пластического деформирования не выявлено. Анализ процесса износа блоков канатами показал, что при работе канатные каленые проволоочки квадратного сечения осуществляют срезание микростружки с поверхности блока. Из теории резания известно, что наклепанный металл срезается легче, чем ненаклепанный, так как на усадку стружки при срезании наклепанного металла работа не затрачивается. Для устранения срезания стружки сталь 35Л заменена на сталь 45Л и была выполнена объемная закалка блока в масло до твердости HB 400. Обкатывание роликом повысило твердость HB еще на 15-20%. Таким образом, долговечность блоков была повышена в 3-4 раза. Соответственно повысилась и долговечность

канатов, так как был устранен изгиб и излом проволок каната на неровностях изношенного блока. При внедрении технологии упрочнения канатных блоков в производство получили экономический эффект более 50 тыс. гривен в год.

ВЫВОДЫ

1. Исследована диффузия химических элементов поверхностного слоя в процессе поверхностного деформирования с помощью микрохиманализа на микрохиманализаторе фирмы Джеол „Supragrope – 733” и анализом изменения микротвердости упрочненного поверхностного слоя. Установлено, что в переходной зоне содержание Cr и C уменьшилось на 20 – 30 %, а в упрочненном слое увеличилось до 10 – 15 %. При обкатывании роликами сталей 40X и 45 установлено значительное снижение микротвердости в промежуточной зоне между упрочненным слоем и исходным металлом. При обкатывании армкожелеза такого спада микротвердости не выявлено.

2. Выполнены исследования эффективности упрочнения деталей, работающих на смятие, обкатыванием их роликами, с помощью физического моделирования процесса смятия кромок деталей коническими роликами-эталоном с углом при вершине $\alpha = 4^\circ$. Этот угол выбран из условия возможных перекосов реальных деталей машин при эксплуатации. Исследования показали, что обкатывание роликами поверхностей, которые работают на смятие, является эффективным способом повышения их долговечности. Особенно высокий эффект упрочнения для литых сталей (долговечность возрастает в 10 – 14 раз), деформация которых сопровождается устранением несовершенств их структуры (пор, раковин и т.п.), которая часто бывает в поверхностном слое канатных блоков и корпусных деталей.

3. Разработаны способ, устройство и технология обкатывания канатных блоков клиновым роликом. Выполнено испытание обкатанных блоков на смятие их канатами на судоперегрузателе ООО „НГЗ”. Долговечность блоков была повышена в 3 - 4 раза. Соответственно повысилась и долговечность канатов, так как был устранен изгиб и излом проволок каната на неровностях изношенного блока.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г.: Поверхностное упрочнение металлов.- Киев: Наук. думка, 1995. – 256 с.
- Степнов М.Н.: Статистическая обработка результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
- Степнов М.Н.: Статистическая обработка результатов механических испытаний. Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 306 с.
- Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.: Курс теории вероятностей и математической статистики – М.: Наука, 1969. – 512 с.
- Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.: Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
- Марковский Е.А.: Научные предпосылки создания новых износостойких литых материалов с высокими эксплуатационными свойствами. – Прогрессивные технологии литья и кристаллизации сплавов, 1983. – С. 43 – 57.
- Бабей Ю. И.: Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – Киев: Наукова думка, 1988. – 240 с.
- Бокштейн Б.С.: Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.

Кузменко П.П.: Электроперенос, термоперенос и диффузия в металлах. – Киев: Вища школа, 1983. – 152 с.

Бутаков Б.И.: Основные принципы технологии импульсного и малоскоростного воздействия на структуру и свойства металлов и сплавов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, - Киев: -1992 – 533 с.

Хейфец С.Г.: Аналитическое определение глубины наклепанного слоя при обкатке роликами стальных деталей // сб. ЦНИИТМАШа, кн. 49-М.: МашГИЗ, 1952. - С.7-17.

CREATION METHOD OF ROLLING BY ROLLERS OF STEEL DETAILS WITH PURPOSE OF RISE OF THEIR CONTACT DURABILITY

Summary: The article deals with the method and technology of rolling the working type of rope blocks with a wedge roller with the purpose of decreasing the crumpling of their superficial layer with the ropes. The results of research on diffusion of chemical elements of *Cr* and *C* from the parent metal into the superficial layer in the process of superficial plastic deformation have been described.

Key words: superficial plastic deformation, crumpling of superficial layer, diffusion, rope block

Reviewer: Yury Seleznyov, Prof. Sc. D. Eng.