

ISSN 0202-4977

ТРЕНИЕ
И **И**ЗНОС

FRICTION
and **W**EAR

TOM
VOL. **34**

4

2013

Международный научный журнал "ТРЕНИЕ И ИЗНОС"

Главный редактор: А. И. Свириденко (Беларусь)

Заместители главного редактора: И. Г. Горячева (Россия), Н. К. Мышкин (Беларусь)

Ответственный секретарь: И. Н. Ковалева (Беларусь)

Редакционная коллегия:

А. В. Белый (Беларусь), М. А. Броновец (Россия), Б. Бушан (США), П. А. Витязь (Беларусь),
И. В. Войтов (Беларусь), И. И. Гарбар (Израиль), П. Джост (Великобритания), Н. Ф. Дмитриченко (Украина),
Ю. Н. Дроздов (Россия), С. М. Захаров (Россия), А. Ф. Ильюшенко (Беларусь), В. И. Колесников (Россия),
А. Мэтьюз (Великобритания), Ю. М. Плескачевский (Беларусь), А. К. Погосян (Армения), С. Пытко (Польша),
В. А. Смуругов (Беларусь), С. А. Чижик (Беларусь), Ф. Франек (Австрия), К. Фридрих (Германия),
К. Холмберг (Финляндия)

Редакционный совет:

В. М. Александров (Россия), Н. Антонеску (Румыния), В. Н. Анциферов (Россия), В. Ф. Безъязычный (Россия),
А. В. Белецкий (Беларусь), П. Н. Богданович (Беларусь), А. Н. Болотов (Россия), А. И. Буря (Украина),
И. А. Буяновский (Россия), Э. Валицкий (Польша), Веймин Лю (КНР), М. В. Голуб (Беларусь),
А. Я. Григорьев (Беларусь), А. Х. Джанахмедов (Азербайджан), А. А. Евтушенко (Польша),
Б. Ивкович (Сербия), А. В. Колубаев (Россия), А. П. Краснов (Россия), Ю. М. Лужнов (Россия),
Ю. К. Машков (Россия), В. В. Мешков (Россия), Ф. И. Пантелеенко (Беларусь), Л. С. Пинчук (Беларусь),
Л. И. Погодаев (Россия), Ю. Подгурскас (Литва), А. П. Семенов (Россия), Г. М. Сорокин (Россия),
А. Г. Суслов (Россия), Я. Суханек (Чехия), О. В. Холодилов (Беларусь), А. С. Чаус (Словакия),
С. Г. Чулкин (Россия), М. Щерек (Польша)

Адрес редакции:

Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32-а
телефон: +375 (0232) 77-46-40, факс: +375 (0232) 77-52-11
e-mail: mpri@tut.by
<http://mpri.org.by/editions/friction-a-wear.htm>

International Scientific Journal "FRICTION AND WEAR"

Editor-in-Chief: A. I. Sviridenok (Belarus)

Deputy Editors-in-Chief: I. G. Goryacheva (Russia), N. K. Myshkin (Belarus)

Executive Secretary: I. N. Kavaliova (Belarus)

Editorial board:

A.V. Belyi (Belarus), B. Bhushan (USA), M. A. Bronovets (Russia), S. A. Chizhik (Belarus),
N. F. Dmitrichenko (Ukraine), Yu. N. Drozdov (Russia), F. Franek (Austria),
K. Friedrich (Germany), I. Garbar (Israel), K. Holmberg (Finland), A. F. Il'yshenko (Belarus),
P. Jost (Great Britain), V. I. Kolesnikov (Russia), A. Matthews (Great Britain),
Yu. M. Pleskachevsky (Belarus), A. K. Pogosyan (Armenia), S. Pytko (Poland),
V. A. Smurugov (Belarus), P. A. Vityaz (Belarus), I. V. Voitov (Belarus), S. M. Zakharov (Russia)

Editorial advisory board:

V. M. Aleksandrov (Russia), N. Antonescu (Rumania), V. N. Antsiferov (Russia), A. V. Beletskii (Belarus),
V. F. Bezyazychnyi (Russia), P. N. Bogdanovich (Belarus), A. N. Bolotov (Russia), A. I. Burya (Ukraine),
I. A. Buyanovsky (Russia), A. S. Chaus (Slovakia), S. G. Chulkin (Russia), A. H. Dzhanaakhmedov (Azerbaijan),
A. A. Evtushenko (Poland), M. V. Golub (Belarus), A. Ya. Grigoriev (Belarus), B. Ivkovich (Serbia),
O. V. Kholodilov (Belarus), A. V. Kolubaev (Russia), A. P. Krasnov (Russia), Veimin Liu (China),
Yu. M. Luzhnov (Russia), Yu. K. Mashkov (Russia), V. V. Meshkov (Russia), F. I. Panteleenko (Belarus),
L. S. Pinchuk (Belarus), J. Podgurskas (Lithuania), L. I. Pogodaev (Russia), M. Scherek (Poland),
A. P. Semenov (Russia), G. M. Sorokin (Russia), Ya. Sukhanek (Czechia), A. G. Suslov (Russia), E. Valitcky (Poland)

Editorial board address:

Republic of Belarus, 246652, Gomel, Kirov Str., 32-a
tel.: +375 (0232) 77-46-40, fax: +375 (0232) 77-52-11
e-mail: mpri@tut.by
<http://mpri.org.by/editions/friction-a-wear.htm>

ТРЕНИЕ И ИЗНОС

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с января 1980 г.

Выходит один раз в два месяца, один том в год

ГОМЕЛЬ • ИММС НАН БЕЛАРУСИ • 2013, ТОМ 34, № 4

СОДЕРЖАНИЕ

От Главного редактора	i
Юдин А. С., Буяев Д. И., Афоничева О. В., Горячева И. Г., Краснов А. П. Трение полимерных самосмазывающихся композитов, армированных термостойкими тканями	327
Гежыньска-Дольна М., Лиевский М., Мруз А., Бритько А. А., Аносов В. С. Трибологические исследования имплантатов межпозвоночного диска поясничного отдела позвоночника	337
Григорьев С. Н., Фоминский В. Ю., Романов Р. И., Волосова М. А. Модифицирование структуры и улучшение трибологических свойств твердосмазочных покрытий WSe _x при импульсном лазерном осаждении в буферном He-газе	348
Шаповалов В. М., Злотников И. И., Тартаковский З. Л. Разработка технологических жидкостей для механической обработки стекла с учетом молекулярных сил	357
Сорокатый Р. В., Писаренко В. Г., Дыха М. А. Анализ особенностей формообразования поверхности износа подшипников скольжения при перекосе осей вала и втулки	362
Котов С. Ю., Беляев Г. Я. Триботехнические характеристики одноэлементных PVD-покрытий	371
Селькин В. П., Сосновский С. В. Влияние радиационного модифицирования на износостойкость поливинилиденфторида при трении по металлу в нефти	377
Пименов Д. Ю. Геометрическая модель высоты микронеровностей обработанной поверхности с учётом износа зубьев торцевой фрезы	382
Аборкин А. В., Рябкова В. В., Абрамов Д. В. Трение и износ нитридных и карбидных покрытий при контакте с алюминием	387
Кравченко Ю. Г., Пелешенко Б. И., Буря А. И., Кузнецова О. Ю. Аналитический расчет температуры в зоне контакта пары трения при высоких скоростях	397

Бутаков Б. И., Марченко Д. Д. Повышение контактной прочности стальных деталей обкатыванием роликами	404
---	-----

ОБЗОРЫ

Заспа Ю. П. Конкуренция мод и автомодуляционная неустойчивость в динамике когерентного трения	415
---	-----

ЛЮДИ НАУКИ

Леонгард Иванович Погодаев (к 80-летию со дня рождения)	428
Памяти Александра Юльевича Ишлинского (100-лет со дня рождения)	430

КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ	432
-----------------------------	-----

Подписано в печать 04.07.2013. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Напечатано на ризографе. Усл. печ. л. 13,0. Тираж 200 экз. Заказ № 10-13

ИММС НАН Беларуси, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32-а. Лицензия № 02330/0494358 от 16.03.09

© ИММС НАН Беларуси

© Редакторы-составители: Мышкин Н. К., Свиридёнок А. И., Ковалёва И. Н., 2013

УДК 621.7; 621.8; 539.4

ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ОБКАТЫВАНИЕМ РОЛИКАМИ

Б. И. БУТАКОВ⁺, Д. Д. МАРЧЕНКО

В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса обкатывания роликами стальных деталей, которые работают на контактную прочность. Исследованы эффективность упрочнения стальных деталей с помощью физического моделирования процесса смятия, физико-механические свойства поверхностного слоя и его микроструктура, а также диффузия химических элементов в процессе поверхностного деформирования с помощью микрохиманализа. Разработаны способ и технология обкатывания стальных деталей сложного профиля клиновым роликом и устройство для его осуществления. Приведены результаты внедрения разработанной технологии в производство.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, контактная прочность, обкатывание роликами, клиновой ролик.

Введение. При эксплуатации стальных деталей машин, оборудования и элементов конструкций их разрушение в большинстве случаев начинается с поверхности за счет изнашивания, усталости, контактного взаимодействия и т.д. Поэтому во многих случаях надежность и долговечность изделий зависит от качества, прочности и напряженно-деформированного состояния металла поверхностных слоев деталей. Контактные напряжения и деформации являются главными факторами, определяющими характер и интенсивность изнашивания деталей машин. Наиболее простым и доступным, а часто и единственно возможным методом упрочнения таких деталей, является обработка поверхностей холодным пластическим деформированием. Для упрочнения поверхностного слоя металлических деталей ответственного назначения применяют поверхностное пластическое деформирование (ППД) обкаткой роликами или чеканкой бойками. Для улучшения внешнего товарного вида и повышения износостойкости поверхностного слоя применяют чистовое ППД, а с целью повышения усталостной прочности деталей — упрочняющую обработку. Эффективное использование ППД в промышленности стало возможным благодаря работам В. М. Браславского [1], И. В. Кудрявцева [2], Д. Д. Папшева [3], Л. М. Школьника [4] и др., которые дали научную основу этого метода обработки. Управляя свойствами поверхностного слоя за счет обкатывания роликами можно достичь повышения контактной прочности и, тем самым, повысить долговечность стальных деталей.

Методика и результаты исследований. Для исследования контактного смятия стальных деталей использовали стандартную машину износа МИ и карусельный станок. Цилиндрический ролик-образец контактировал с коническим роликом-эталоном с углом при вершине $\alpha = 4^\circ$ (рис. 1). Величина угла выбрана из условий возможных перекосов реальных деталей машин при эксплуатации. В процессе испытания смятие кромки приводит к образованию на цилиндрической поверхности испытуемого роли-

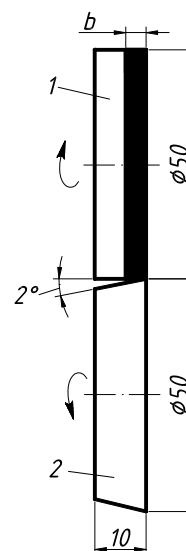


Рис. 1. Схема испытания образцов на машине износа МИ

Николаевский национальный аграрный университет. Украина, 54010, г. Николаев, ул. Крылова, 17А.

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: etcmtp@yandex.ru.

ка-образца фаски, ширина которой обратно пропорциональна способности материала 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 изготавливали из стали ХВГ твердостью *HRC* 58—62.

Принятый угол $\alpha/2 = 2^\circ$ обеспечивали шлифованием для серии образцов при одной настройке шлифовального станка. Ролики-образцы изготавливали из сталей 20, 25Л, 35Л, 40 и 34ХН1М.

Обкатывали образцы на токарном станке однороликовым (диаметр ролика равен 60 мм) пружинным приспособлением при скорости 12 м/мин за один проход. Режимы обкатывания роликами выбирали по методике, описанной в работе [5].

Перед испытанием проводили металлографическое исследование образцов для определения микроструктуры. Структура сталей 20, 25Л и 40 представляет собой перлит на ферритной основе. В результате обкатывания зерна имеют вытянутую форму (волокистость). Вблизи поверхности отчетливо видны следы пластической деформации. Структура стали 34ХН1М — сорбит и продукты распада аустенита во второй ступени без заметных следов пластической деформации. Этим объясняется незначительное повышение твердости таких образцов после упрочнения.

Твердость образцов измеряли по методу Виккерса прибором ХПО-250 при нагрузке 0,10 кН (*HV*10) на их торцовых поверхностях после тонкой доводки. Ниже приведены относительное повышение поверхностной твердости и глубина распространения пластической деформации. Расчетную глубину распространения пластической деформации определяли по формуле С. Г. Хейфеца [6]:

$$t = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_t}}, \quad (1)$$

где P — усилие обкатывания, кН; σ_t — предел текучести стали, кН/мм².

Фактическая глубина оценивалась по началу изменения *HV*10 в поперечном сечении образца.

Марка стали	20	25Л	25Л	35Л	35Л	40	40	34ХН1М
Усилие обкатывания, кН	12,00	12,00	1,20	10,00	1,80	8,00	0,50	12,00
Поверхностная твердость <i>HV</i> 10, МПа:								
исходная	158	151	151	188	188	200	200	366
после обкатывания роликами	235	266	198	272	232	253	236	405
Относительное повышение твердости, %	48	76	31	45	22	27	18	11
Глубина распространения пластической деформации, мм:								
расчетная	4,4	4,47	1,41	3,9	1,64	3,27	0,82	2,32
фактическая	5,0	6,0	1,76	4,4	2,3	4,0	0,9	3,0

Наибольшее относительное повышение твердости наблюдается у сталей, имеющих ферритно-перлитную структуру. Испытания проводили 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. Этот критерий характеризует склонность металла к упрочнению.

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. 2. 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. 2, б), получившие наибольший прирост твердости, показали повышение долговечности в 4 раза, а образцы из стали 40 (рис. 2, в) — с меньшим приростом твердости — только в 1,9 раза.

Особенно высокий эффект упрочнения обкатыванием роликами наблюдается у литых сталей 25Л и 35Л и низкоуглеродистой стали 20, что обуславливается 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. 2, д) можно объяснить высокой исходной твердостью ($HV\ 329$) и мелкозернистой сорбитной структурой, мало чувствительной к наклепу. Эта структура была получена в результате термической обработки стали.

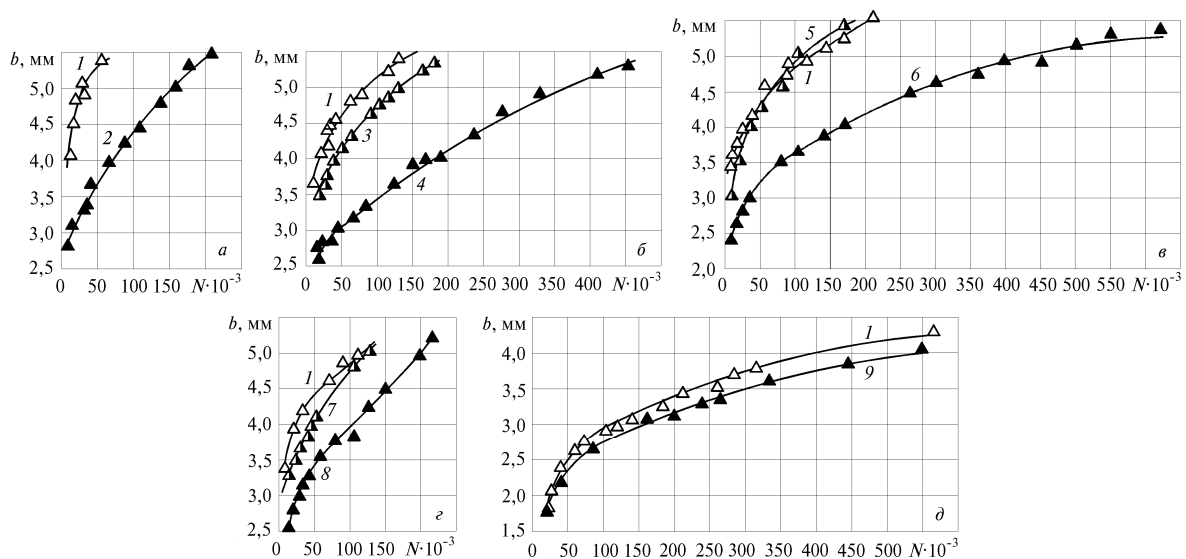


Рис. 2. Результаты испытания образцов на машине износа МИ: а — из стали 20; б — из стали 25Л; в — из стали 35Л; г — из стали 40; д — из стали 34ХН1М; 1 — без обкатывания; 2 — обкатанный с усилием $P = 12,00$ кН, профильный радиус ролика $r_p = 5$ мм, подача $s = 0,15$ мм/об; 3 — $P = 1,20$ кН, $r_p = 16$ 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

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
Твердость, $HV\ 10$, МПа:		
исходная	148	207
после упрочнения	215	248
Относительное повышение твердости, %	45	19
Глубина распространения пластической деформации, 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. Прикладывает-

мая нагрузка определяется прогибом корпуса и контролируется закрепленным на нем индикатором. Испытания проводили 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. 3. Наибольшая скорость расширения контактного пояса наблюдается в течение первых $4,5 \cdot 10^3$ циклов, 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	34ХН1М	34ХН1М	34ХН1М	34ХН1М
Количество циклов	$4,5 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$
Нагрузка при испытании, кН	20,80	30,00	20,80	30,00	20,80	30,00	20,80	30,00
Ширина пояса, мм:								
без упрочнения	11,2	15,0	13,3	16,8	6,7	8,4	8,0	10,2
с упрочнением	9,8	11,7	10,7	12,1	6,0	7,2	7,3	9,4
Относительно уменьшенная деформация, %	14	28	24	39	12	17	10	8

Эффективность упрочнения стали 25Л (по принятому критерию) повышается с увеличением нагрузки и числа циклов испытаний (рис. 3, а), тогда как у стали 34ХН1М (рис. 3, б) при увеличении числа циклов испытаний с $4,5 \cdot 10^3$ до $35 \cdot 10^3$ 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 пояса упрочненной втулки через 35 тыс. циклов составляет 12 мм (рис. 3, 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.

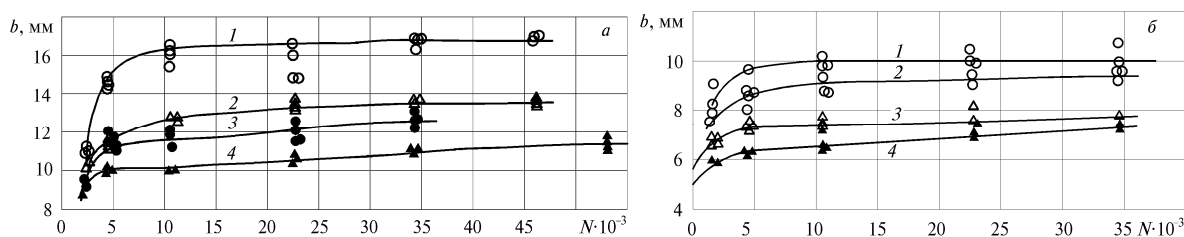


Рис. 3. Результаты испытаний образцов-втулок на карусельном станке: а — сталь 25Л; б — сталь 34ХН1М; 1 — без обкатывания, усилие при испытании 30,00 кН; 2 — то же, 20,80 кН; 3 — раскатанных, усилие при испытании 30,00 кН; 4 — то же, 20,80 кН

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 армкожелеза 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 в зависимости от усилия обкатывания P изменяется для разных образцов в пределах от $2,5^\circ$ до 5° , а также $\varphi = 10^\circ$, для того чтобы превысить рекомендуемый для совмещенного чистового и упрочняющего обкатывания $\varphi = 5^\circ$ 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 разрезали и в поперечном сечении измеряли микротвердость H_μ с нагрузкой на пирамиду 1,0 Н. Первые точки измерения микротвердости вблизи поверхности произведены на расстоянии не менее 100 мкм от поверхности образца. Для исключения “завалки” кромки, перед полированием образцы заливали самотвердеющей пластмассой “Протакрил-М”. Распределение микротвердости H_μ по глубине 4-х образцов показано на рис. 4.

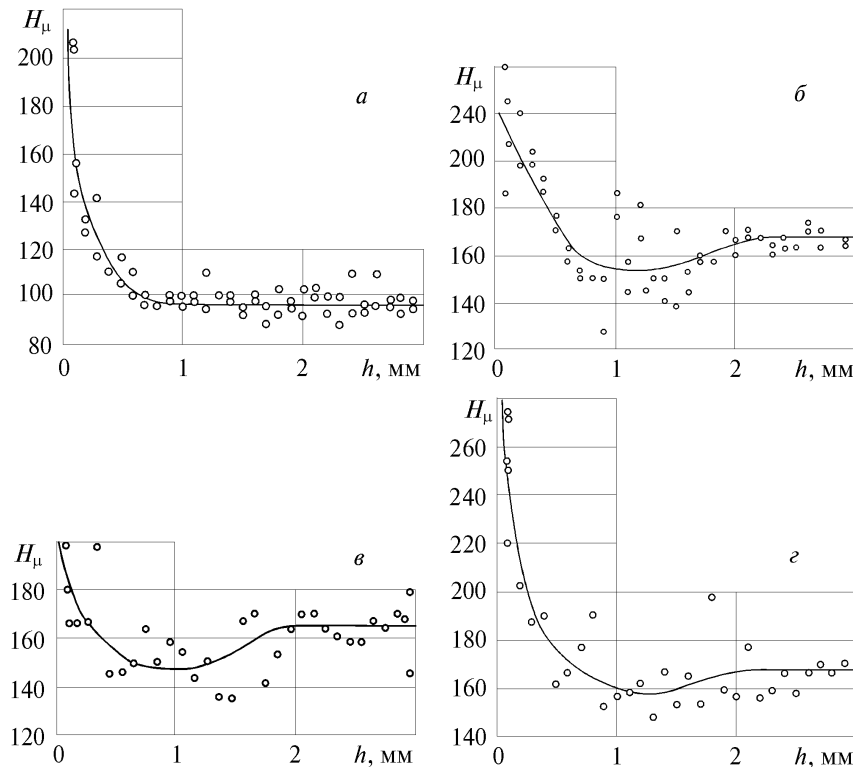


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя: а — армкожелезо, $r_p = 2,5$ мм, $P = 1,5$ кН; б — сталь 45, $r_p = 2,5$ мм, $P = 4,5$ кН; в — сталь 45, $r_p = 5$ мм, $P = 5$ кН; г — сталь 40Х, $r_p = 2,5$ мм, $P = 5,5$ кН

На графиках (рис. 4, б—г) для стальных образцов из сталей 45 и 40Х выявлено снижение микротвердости $H_{\mu(\text{пз})}$ в переходной зоне между упрочненным слоем и исходным металлом, микротвердостью $H_{\mu(\text{исх})}$. Средние значения $H_{\mu(\text{пз})}$ и $H_{\mu(\text{исх})}$ нормально распределенных величин сравнивали с помощью t -критерия Стьюдента [7].

Для этого определяем сводную дисперсию

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

и

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (3)$$

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 $H_{\mu(\text{пз})}$ и $H_{\mu(\text{исх})}$ соответственно; $\overline{x_1}, \overline{x_2}$ — средние значения $H_{\mu(\text{пз})}$ и $H_{\mu(\text{исх})}$ соответственно.

Если $|t| \geq t_{\alpha, K}$ (табл. V [8]), то разница средних значений существенна. Величину доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$ выбирали равной 0,95, ($\alpha = 0,05$), число степеней свободы определяли из выражения $K = n_1 + n_2 - 2$. Результаты расчетов помещены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры обкатывания конусных деталей из сталей 45, 40X и армкожелеза

Марка материала	r_p , мм	D_p , мм	P , кН	φ , град	$H_{\mu \text{max}}$	$t_{H_{\mu}}$	$\sum K$, мм ⁻¹ *	$K_{\sigma_{0,2}}$	$t_{\sigma_{0,2}}$	$t_{\text{теор}}^{**}$	n_1	n_2	$\overline{x_1}$ ($H_{\mu(\text{пз})}$)	$\overline{x_2}$ ($H_{\mu(\text{исх})}$)	S_1^2	S_2^2	t	$t_{\alpha, K}$	Степень различия $\overline{x_1}$ и $\overline{x_2}$
45	5	32	5,00	2,5	200	1,8	0,241	1,4	2,52	2,55	9	12	148,18	164,82	70,88	142,62	5,3	1,96	Различие существенно
45	2,5	32	4,50	5	240	1,8	0,441	1,3	2,34	2,35	24	18	174,86	186,28	175,4	13,54	3,55	1,96	Различие существенно
40X	2,5	32	5,50	5	275	1,7	0,441	1,3	2,21	2,25	11	34	157,2	167,3	34,40	121,39	2,49	2,1	Различие существенно
Армко-железо	2,5	32	1,50	5	230	1,0	0,441	1,3	1,3	1,35	9	37	98,0	97,56	4,25	29,3	0,238	1,96	Различие не существенно

* — $\sum K = \frac{1}{r_p} + \frac{2}{D_p} + \frac{2}{D_m}$; ** — $t_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_t}}$, 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 [9]).

Анализ результатов исследования микротвердости показал, 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. 4, а) такого спада не выявлено.

Предложена идея для объяснения механизма диффузионного переноса упрочняющих химических элементов (Сг, С) из глубинных слоев на поверхность. Распределение упрочняющих химических элементов Сг и С было исследовано с помощью микрохиманализатора фирмы Jeol (Джеол) “Supperprobe-733”. Установлено, что в переходной зоне содержание Сг и С уменьшилось на 20—30%, а в упрочненном слое увеличилось до 10—15%. Аналогичные результаты получены в работах [10, 11] на поверхностях трения и при термо- и электромеханическом упрочнении сталей [12]. В этих работах в качестве основных механизмов диффузии называют температурный градиент [13] и электроперенос [14]. Поскольку в нашем случае эти механизмы или несущественны или совсем отсутствуют, предложено считать при поверхностном пластическом деформировании существенным механизмом диффузии — градиент плотности дислокаций [9].

Исследование эффективности упрочнения стальных деталей для повышения их контактной прочности проведено и в промышленных условиях. В процессе работы канатного блока в паре со стальным канатом на судоперегрузателях ОАО “Николаевский глиноземный завод” на рабочей поверхности блока после 3—4-х месяцев эксплуатации происходило смятие рабочей поверхности канатного блока. При работе канатного блока наиболее интенсивному износу подвергается гал-

тельный переход, где наблюдается отслаивание металла, особенно при наличии в поверхностях слоя газовых раковин и пустот, полученных в процессе отливки заготовок из литейных сталей 35Л, 45Л. Однако разбиваются канатом и конические поверхности. Соответственно изнашивался и сам стальной канат, а именно происходит перегиб проволочек на неровностях изношенного блока.

Поэтому, возникла идея провести расчет контактных напряжений, возникающих при работе канатного блока и каната, а для этого необходимо было решить контактную задачу.

Для решения плоской контактной задачи (см. рис. 5) была найдена функция контактных деформаций

$$W(x) = S(a) - S(x) = \frac{a^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \frac{x^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{a^2 - x^2}{2r_{\text{пр}}} = \frac{a^2}{2r_{\text{пр}}} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right), \quad (4)$$

где $r_{\text{пр}} = r_1 r_2 / (r_2 - r_1)$ — приведенный радиус кривизны взаимодействующих тел; a — полуширина площадки контакта; r_1 и r_2 — радиусы кривизны соответственно каната и канатного блока.

Для получения контактных напряжений σ_t воспользуемся законом распределения усилий в пределах дуги охвата канатом блока, приведенным на рис. 6, в соответствии с которым запишем уравнение

$$F_n = 2 \int_0^{\pi/2} \sigma_t R 2a \cos \varphi d\varphi = 4Ra\sigma_t,$$

где,

$$\sigma_t = \frac{F_n}{4aR}, \quad (5)$$

здесь F_n — действующая сила (нормальная сила) на площадь контакта; R — радиус канатного блока.

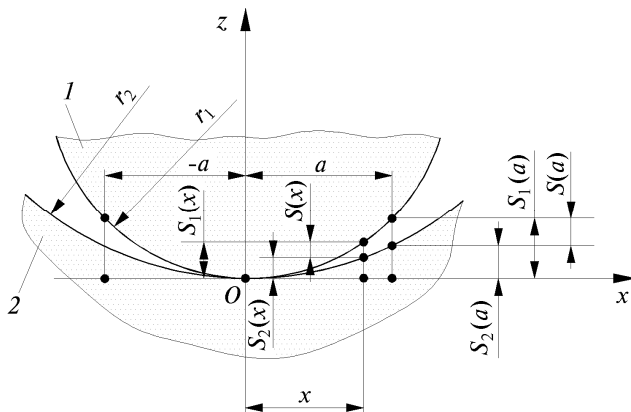


Рис. 5. Расчетная модель контакта: 1 — канат; 2 — канатный блок

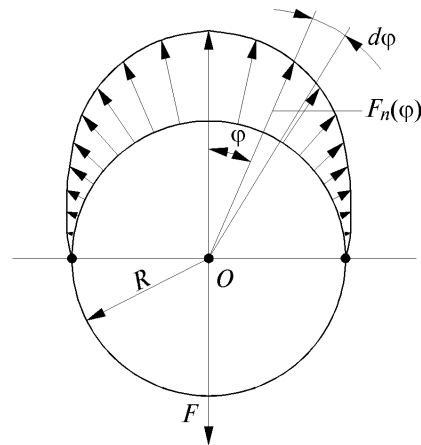


Рис. 6. Схема распределения усилий, возникающих между тросом и канатным блоком

Определим в виде константы коэффициент постели

$$A = 2a(\delta_{k1} + \delta_{k2}) = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \frac{a}{2R}, \quad (6)$$

где ν — коэффициент Пуассона взаимодействующих тел; E — модуль упругости взаимодействующих тел.

Соответственно выражению (5), закону Гука и гипотезе Винклера вторая функция контактных деформаций при $A(x) = A = \text{const}$ примет окончательный вид:

$$W(x) = \frac{a}{2R} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \varpi(x). \quad (7)$$

Таким образом, имея в своем распоряжении уравнения (4) и (7), запишем уравнение напряженно-деформированного состояния тел:

$$A \int_{-a}^a \varpi(x) dx = AF_n = \frac{aF_n}{2R} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) = \frac{1}{2r_{np}} \int_{-a}^a (a^2 - x^2) dx = \frac{2a^3}{3r_{np}},$$

исходя из которого найдем зависимость полуширины площадки контакта

$$a = 0,866 \sqrt{\frac{r_{np} F_n}{R} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}. \quad (8)$$

Умножив и разделив правую часть выражения $W(x) = A(x)\varpi(x)$ на $2R$ при $A(x) = A$, получим зависимость

$$W(x) = A\varpi(x) \frac{2R}{2R} = 2AR\sigma(x),$$

исходя из которой с учетом функции (4) определим функцию контактных напряжений

$$\sigma(x) = \frac{W(x)}{2AR} = \frac{a^2 - x^2}{4ARr_{np}}. \quad (9)$$

При $x = 0$ из выражения (9) найдем зависимость максимальных контактных напряжений

$$\sigma_{\max} = \frac{a^2}{4r_{np}AR},$$

которая после подстановки в нее правой части уравнения (6) примет вид

$$\sigma_{\max} = 0,433 \sqrt{\frac{F_n}{r_{np}R \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}}. \quad (10)$$

При $\nu_1 = \nu_2 = \nu = 0,3$ и $E_1 = E_2 = E$, т. е. при одинаковых материалах каната и канатного блока, изготовленных из сталей, уравнения (8) и (10) будут сведены к более упрощенному виду

$$a = 1,168 \sqrt{\frac{r_{np} F_n}{RE}}; \quad (11)$$

$$\sigma_{\max} = 0,321 \sqrt{\frac{EF_n}{r_{np}R}}. \quad (12)$$

При радиусе r_2 кривизны тороидальной части канатного блока, равной 20 мм и радиусе r_1 каната, равном 18 мм, приведенном радиусе r_{np} блока и каната, см. формулу (4) равном 180 мм, максимальные контактные напряжения σ_{\max} , см. формулу (12), для стального блока будет равно 235,15 МПа, что близко к пределу текучести стали 35Л, из которой изготовлен блок. Полуширина контактной площадки, см. формулу (11), равна 0,733 мм. Таким образом, при динамических нагрузках контактные напряжения иногда превышают предел текучести стали и происходит смятие рабочей тороидальной поверхности блока. Наблюдается смятие и на конических поверхностях рабочего профиля блока из-за вибрации натянутого каната через полиспадную систему блоков. Обзор литературных источников показал, что практически отсутствуют способы и технологии упрочнения сложных поверхностей, близких к профилю канатных блоков.

С целью предотвращения контактного смятия тороидальной и конических поверхностей рабочего профиля канатного блока, как объекта исследований, разработан способ обкатывания стальных деталей клиновым роликом, с целью повышения их контактной прочности [15]. Преимуществом клинового ролика является уравниваемость осевой составляющей усилия обкатывания и обкатывание рабочего профиля канатного блока возможно на токарном, карусельном станках за одну установку.

Разработаны способ, устройство (рис. 7) и технология обкатывания канатных блоков клиновым роликом, которые обеспечивают низкую шероховатость и высокую степень наклепа поверхности. Этот эффект достигается в результате выполнения профильного радиуса ролика переменной величиной, что обеспечивает постоянство среднего угла $\varphi = 5^\circ$ вдавливания ролика на всех участках рабочего профиля блока. Это приведет к равномерной деформации поверхностного слоя при отсутствии волнистости на тороидальной и конических поверхностях рабочего профиля и к повышению долговечности обрабатываемой детали при работе ее на смятие и износ.

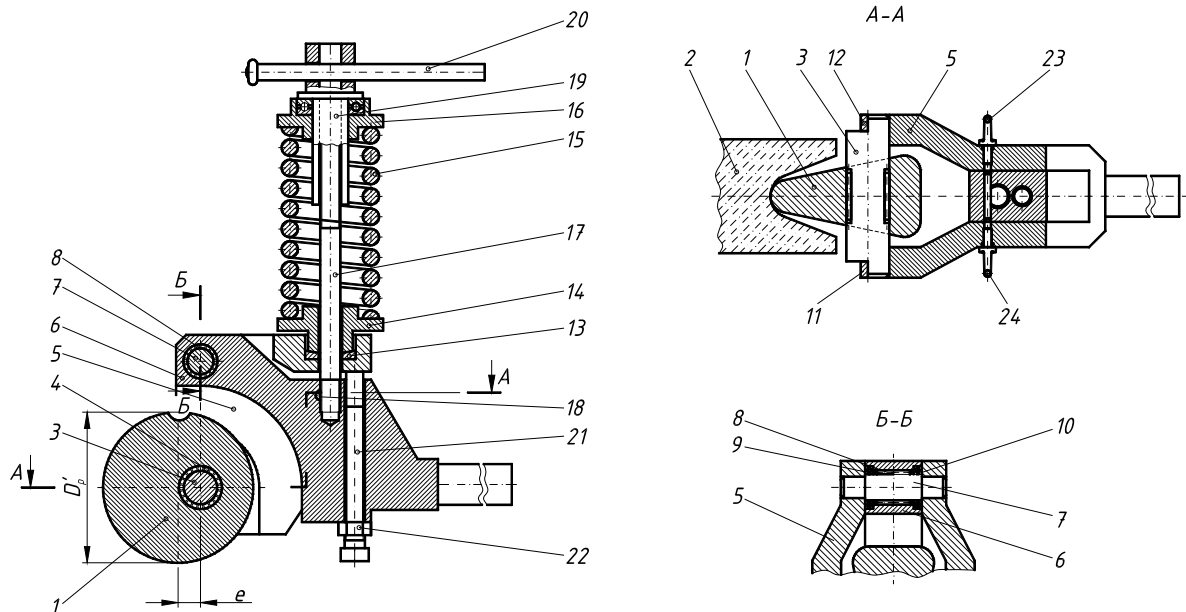


Рис. 7. Устройство для обкатывания канатных блоков клиновым роликом: 1 — ролик; 2 — обкатываемая деталь; 3, 7 — ось; 4, 8, 9, 10 — подшипники; 5 — рычаг; 6 — кронштейн; 11, 12 — планки; 13 — сферическая шайба; 14 — втулка; 15 — пружина; 16 — втулка; 17 — тяга; 18 — штифт; 19, 22 — гайка; 20 — рукоятка; 21 — винт; 23, 24 — рымболты

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.

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 обеспе-

чивается 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.

В результате проведения экспериментальных исследований с применением метода крутого восхождения определены оптимальные конструкторско-кинематические параметры процесса обкатывания. С помощью планирования эксперимента при оптимизации технологического процесса обкатывания канатного блока клиновым роликом получены следующие оптимальные режимы обработки: оптимальный угол вдавливания ролика 5 град, профильный радиус ролика 15–40 мм, общее количество оборотов канатного блока 160–180 об., скорость обкатывания 40–50 м/мин.

Выполнены испытания обкатанных канатных блоков на смятие их канатами в производственных условиях на судоперегрузателях “KRUPP” (Германия) грузоподъемностью 40 т ОАО “Николаевский глиноземный завод” и автокранах КС-3575 грузоподъемностью 10 т ОАО “Николаевстроймеханизация”.

Заключение. 1. Выполнены исследования для оценки эффективности упрочнения деталей, работающих на смятие, обкаткой их роликами с помощью физического моделирования процесса смятия кромок деталей на конических роликах-эталонах с углом при вершине $\alpha = 4^\circ$. Этот угол выбран из условий возможных перекосов реальных деталей машин при эксплуатации. Исследования показали, что обкатывание роликами поверхностей, работающих на смятие, является эффективным средством повышения их долговечности. Особенно высок эффект упрочнения литых сталей (долговечность возрастает в 10–14 раз), деформация которых сопровождается устранением несовершенств их структуры (пор, раковин и т. п.), которые часто наблюдаются в поверхностном слое канатных блоков и корпусных деталей.

2. Исследована диффузия химических элементов поверхностного слоя в процессе поверхностного деформирования с помощью микрохиманализа на микрохиманализаторе фирмы Jeol “Superprobe-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 прослеживается значительное снижение микротвердости в переходной зоне между упрочненным слоем и исходным металлом. При обкатывании армкожелеза такого спада не обнаружено. На основании этих исследований предложена гипотеза диффузии упрочняющих химических элементов (Cr, C) из промежуточного слоя на поверхность детали. Основным фактором диффузии при ППД является градиент плотности дислокаций.

3. Разработан способ обкатывания стальных деталей, с целью повышения их контактной прочности (патент Украины на изобретение № 93252). Преимуществом клинового ролика являются уравновешенность осевой составляющей усилия обкатывания и возможность обкатывания рабочего профиля канатного блока на токарном, карусельном станках за одну установку.

4. Разработанный способ, устройство и технология обкатывания канатных блоков клиновым роликом обеспечивают низкую шероховатость и высокую степень наклепа поверхности. Этот эффект достигается в результате сохранения постоянства среднего угла вдавливания ролика в обрабатываемую поверхность. Это способствует равномерной деформации поверхностного слоя при отсутствии волнистости и приводит к повышению долговечности обрабатываемых деталей.

5. Осуществлено внедрение технологии обкатывания канатных блоков на судоперегрузателях “KRUPP” ОАО “Николаевский глиноземный завод” и автокранах КС-3575 ОАО “Николаевстроймеханизация”. Контактная прочность, а следовательно и долговечность канатных блоков были повышены в 3–4 раза. При внедрении в производство предложенной технологии получен годовой экономический эффект более 8800 долларов США.

Обозначения

t — расчетная глубина распространения пластической деформации, мм; P — усилие обкатывания, кН; σ_T — предел текучести стали, кН/мм²; $r_{пр} = r_1 r_2 / (r_2 - r_1)$ — приведенный радиус кривизны

взаимодействующих тел, мм; a — полуширина площадки контакта, мм; r_1 и r_2 — радиусы кривизны каната и канатного блока соответственно, мм; HV — твердость поверхности по Викерсу, МПа; N — количество циклов; H_μ — микротвердость, МПа; F_n — действующая сила (нормальная сила) на площадь контакта, Н; ν — коэффициент Пуассона взаимодействующих тел; E — модуль упругости взаимодействующих тел, МПа.

Литература

1. **Браславский В. М.** Технология обкатки крупных деталей роликами. — М.: Машиностроение. — 1975
2. **Кудрявцев И. В., Савина Н. М.** Поверхностный наклеп как средство повышения усталостной прочности валов с неподвижными посадками // Вопросы конструкционной прочности стали. — М.: Машгиз. — 1957
3. **Папшев Д. Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхности пластическим деформированием. — М.: Машиностроение. — 1978
4. **Школьник Л. М., Шахов В. И.** Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. — М.: Машиностроение. — 1964
5. **Бабей Ю. И., Бутаков Б. И., Сысоев В. Г.** Поверхностное упрочнение металлов. — Киев: Наук. думка. — 1995
6. **Хейфец С. Г.** Аналитическое определение глубины наклепанного слоя при обкатке роликами стальных деталей // ЦНИИТМАШ: сб. — М.: Машгиз. — 1952, Кн. 49, 7—17
7. **Степнов М. Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний: справочник. — М.: Машиностроение. — 1985
8. **Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В.** Курс теории вероятностей и математической статистики. — М.: Наука. — 1969
9. **Бутаков Б. И.** Основные принципы технологии импульсного и малоскоростного воздействия на структуру и свойства металлов и сплавов: Дис. ... доктора техн. наук. — Киев. — 1992
10. **Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И.** Структура и износостойкость металла. — М.: Машиностроение. — 1982
11. **Марковский Е. А.** Научные предпосылки создания новых износостойких литых материалов с высокими эксплуатационными свойствами // Прогрессивные технологии литья и кристаллизации сплавов. — 1983, 43—57
12. **Бабей Ю. И.** Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. — Киев: Наукова думка. — 1988
13. **Бокштейн Б. С.** Диффузия в металлах. — М.: Металлургия. — 1978
14. **Кузьменко П. П.** Электроперенос, термоперенос и диффузия в металлах. — Киев: Вища школа. — 1983
15. **Спосіб чистової та зміцнюючої обробки поверхонь тіл обертання складного профілю і пристрій для його здійснення:** Пат. 93252 Україна, МПК В 24 В 39/04. Заявитель и патентообладатель Николаевский национальный аграрный университет. — № а200815098; заявл. 29.12.2008; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13 / Б. И. Бутаков, В. С. Шебанин, Г. С. Бутакова, Д. Д. Марченко

Поступила в редакцию 17.12.12.

Butakov B. I. and Marchenko D. D. **Increase of Contact Durability of Steel Details by Rolling by Rollers.**

Results of pilot studies of process of rolling are given in article by rollers of steel details which work for contact durability. The crumpling, physicomechanical properties of a blanket and its microstructure, and also diffusion of chemical elements in the course of superficial deformation by means of the microchemical analysis are investigated efficiency of hardening of steel details by means of physical modeling of process. The way and technology of rolling of steel details of a difficult profile by a maple roller and the device are developed for its implementation. Results of introduction of the developed technology are given to production.

Keywords: frictme.