

только, вернее, не столько высота неровностей трущихся поверхностей, сколько величина опорной поверхности, форма микронеровностей и их однородность по высоте. Из табл. 17 видно, насколько различны по величине опорной поверхности при одинаковой шероховатости поверхности, обработанные разными способами.

17. Отношение фактической опорной поверхности к номинальной при различных способах обработки

Вид обработки	Rz, мкм	Класс шероховатости	Отношение фактической опорной поверхности в % к номинальной при сближении, мкм			
			0,25	0,5	1,0	1,25
Точение	4,3	4; 3; 7	0,103	0,528	3,54	13,65
Шлифование	1,5	9	0,312	9,84	45,6	82,5
Обкатывание	1,8	8	4,23	26,3	74,8	89,2
Вибронакатывание	1,7	8	0,51	3,91	21,2	46,6
То же	4,4	7	0,12	0,44	1,36	2,71

Наибольшая опорная поверхность образуется при обкатывании, и именно она оказалась наименее стойкой против схватывания как при граничном, так и при сухом трении. Также и вибронакатанная поверхность 8-го класса шероховатости с большей опорной поверхностью, чем обработанная тем же способом по 7-му классу шероховатости, оказалась менее стойкой против схватывания.

2. Зависимость между величиной опорной поверхности и сопротивлением схватыванию нелинейна как при граничном, так и при сухом трении (см. рис. 80). На рис. 80 показана зависимость сопротивления схватыванию от скорости вибронакатывания, определяющей опорную поверхность. Эти зависимости однотипны для различных исследовавшихся пар: сталь 45 — сталь У10А закаленная, чугун — сталь У10А закаленная, дюралюминий — сталь У10А закаленная.

3. Изнашивание пары сталь 45 — сталь У8А (HRC-61—63) при давлении 1,72 МПа со скоростью трения 19,7 м/мин в средней части образца показало, что наибольший износ у обточенной поверхности, особенно в период приработки, а наименьший — у вибронакатанных. Характерно, что шлифованная поверхность 9-го класса шероховатости ($Rz = 1,5$ мкм) при длительности изнашивания 20 ч изнашивалась примерно так же, как вибронакатанная 7-го класса ($Rz = 4,4$ мкм), а при последующем изнашивании значительно больше. Следовательно, как и при схватывании, основным параметром микрорельефа, определяющим износ, является не высота, а форма микронеровностей и опорная поверхность. Радиус закругления вершин неровностей вибронакатанной

поверхности 7-го класса шероховатости был порядка 4000 мкм, а шлифованной 8-го класса — порядка 30 мкм при значительно меньшем угле β . Таким образом, как и при обработке цилиндрической поверхности, оптимизация микрорельефа торцовых поверхностей вибронакатыванием является средством исключения схватывания и повышения износостойкости деталей пар трения, в первую очередь типа подпятников. Эти возможности уже используются на практике. Например, применение вибронакатывания торцовой поверхности головки воздухораспределителя практически исключило образование дефектов и схватывание и повысило износостойкость ответственной детали дизеля.

На рис. 105 показана вытяжная матрица с вибронакатанными торцовой и тороидальной поверхностями. Улучшение условий смазки при вытяжке в несколько раз повысило износостойкость матрицы и резко снизило налипание металла заготовки. Такие же результаты были получены на пуансонах для обратного выдавливания в холодном состоянии и на иглах для прошивания отверстий в нагретом состоянии.

При холодной прокатке листов и лент выявилась необходимость создания переменного по длине прокатных валков регулярного микрорельефа¹, что объясняется различными условиями пластического деформирования и напряженного состояния на разных участках валков. На крайних участках, на длине 10—15 мм необходимо создавать микрорельеф вида IV ($N = 1000 \div 1200$ на см^2 , $R = 6 \div 8$ мкм, $\beta = 10 \div 15^\circ$); диаметр на крайних участках поднят за счет наплывов на 10—15 мкм; на среднем участке микрорельеф вида II ($h_k = 3 \div 4$ мкм, $F_k = 35 \div 40\%$ — см. рис. 44). Такой переменный микрорельеф обеспечивает улучшение условий захвата листа и повышение износостойкости валков².

Граничное трение скольжения. Торцовая поверхность притира — плоская поверхность детали. Металл — абразивное зерно — металл. Вращательное движение. Исследованием³

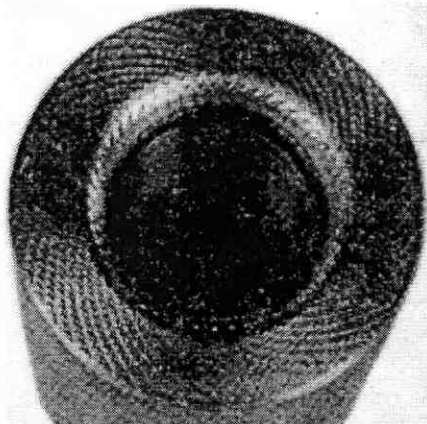


Рис. 105. Матрица вытяжного штампа с вибронакатанными торцовой и тороидальной поверхностями

¹ Исследование выполнено автором совместно с Ю. Л. Барановым.

² А. с. № 500833.

³ Выполнено автором совместно с С. М. Эленом.

ставилась задача — выявить возможность управления процессом тонкой доводки, повышения точности обработки и долговечности металлических притиров (условно процесс микрорезания можно отнести к явлениям трения и изнашивания). Исследовался процесс доводки рабочих поверхностей кварцевых пластин [11]; притиры обрабатывались вибронакатыванием по схеме на рис. 5, б с образованием частично регулярных микрорельефов, варианты которых показаны на рис. 61. Выявлены оптимальные значения параметров частично регулярного микрорельефа на торцевой поверхности чугунных притиров $F_k = 37 \pm 2 \%$, угол атаки [11] для среднего диаметра притира $\beta = 40^\circ$, $h_k = 2d$ (d — радиус зерна) при удалении напльвов. Установлено, что система регулярно расположенных канавок на поверхности притира способствует направленному движению абразива относительно обрабатываемой поверхности, а управление этим движением возможно за счет варьирования угла атаки и направления разворачивания спирали синусоидальной канавки путем изменения режима вибронакатывания. Установлено также, что величина работы изнашивания рабочей поверхности притира на участках, расположенных на различных расстояниях от центра притира, пропорциональна тангенсу угла β . Угол β рассматривается в точках пересечения траектории произвольной точки обрабатываемой детали с линией, проходящей через соседние точки максимума и минимума синусоидальной линии центров канавки, и определяется в зависимости от режима вибронакатывания по формуле

$$\beta = \arcsin \frac{e \sin \varphi}{r} - \frac{\pi}{2} \arctg \frac{4ei + s}{s(2\pi k + \varphi) - \frac{4ei}{2\pi k + \varphi}},$$

где e — эксцентриситет эксцентрика доводочного станка; φ — полярный угол точки траектории, в которой рассматривается траектория; $k = 0; 1; 2; 3$ и т. д. — целое число, показывающее на каком витке рассматривается синусоидальная канавка.

Направленное движение абразива по синусоидальной канавке и непрерывный вынос абразива на рабочие участки поверхности притира изменяют общую привычную картину доводки. Заготовка испытывает действие зерен, расположенных на рабочих участках притира между канавками, и зерен, выступающих из канавок и движущихся по ним под острым углом к направлению движения заготовки. Такой характер доводки подобен обработке в два прохода: 1) обработка зернами, расположенными на рабочих участках между канавками; 2) зачистка зернами, движущимися по канавке. Варьируя значения угла атаки изменением режима вибронакатывания, становится возможным управлять износом притира в различных зонах его рабочей поверхности и приблизиться к решению важнейшей задачи — созданию притиров с равноизносной рабочей поверхностью. Оптимизация микрогеометрии рабочей поверхности притиров позволила заметно улучшить практически

все основные показатели процесса доводки кварцевых пластин (процесс доводки кварцевых пластин интересен тем, что контролируется непосредственно по их эксплуатационным характеристикам):

1) в 2—2,5 раза повысить износостойкость вибронакатанных притиров в сравнении с гладкими;

2) в результате повышения износостойкости притиров стабилизируется процесс доводки и уменьшается разброс частоты в партии одновременно обрабатываемых пластин в 1,5—2 раза;

3) повышение точности формы пьезокварцевых пластин за счет доводки вибронакатанными притирами, обеспечивающими более равномерное расположение абразивных зерен и длительное сохранение плоскостности рабочих поверхностей притиров, оказывает позитивное влияние на моночастотность кварцевых резонаторов. Величина затухания нежелательных резонансов возрастает на 12—15 %.

Граничное трение качения. Цилиндрические пары металл — металл. Вращательное движение. Пары трения качения исследованы относительно мало, поэтому особый интерес представляло исследование влияния микрорельефа поверхностей деталей таких пар на их износостойкость. Объектом исследования¹ являлись внутренние кольца диаметром 70 мм (сталь ШХ15, НРС 61—63) роликоподшипников. При испытаниях на износ сопоставлялись кольца с наружными поверхностями, которые шлифовались по 9-му классу шероховатости и вибронакатывались с образованием микрорельефа видов I—IV. Вибронакатывание производилось после термической обработки и чистового шлифования алмазным наконечником с радиусом сферы 1,5 мм. Предварительное испытание вибронакатанных колец с четырьмя видами микрорельефов выявило полную непригодность в этом случае всех трех видов микрорельефов (I, II и III) с системами канавок. Помимо значительного шума поверхности плохо прирабатывались, а на роликах наблюдалось образование местных дефектов. По-видимому, это являлось следствием динамического контакта роликов с относительно острыми кромками канавок (микрорельеф вида I) и особенно с участками их пересечений (микрорельефы вида II и III). В этих условиях микрорельеф вида IV 8-го класса шероховатости при стендовых испытаниях на ГПЗ-3 обеспечил значительное повышение износостойкости вибронакатанных колец по сравнению со шлифованными. За время испытания внутренних вибронакатанных колец было сменено три комплекта роликов и наружных колец.

Позднее, на Куйбышевском ГПЗ-4 были проведены испытания реальных роликовых подшипников типа 32220 и 22205. Подшипники типа 32220 испытывались на фреттинг-коррозию, а подшипник типа 22205 — на долговечность по стандартной методике

¹ Выполнены автором совместно с Л. В. Басковым.

в лаборатории надежности ГПЗ-4. Сопоставлялись подшипники с внутренними кольцами, шлифованными по действующей на предприятии технологии и вибронакатанными с образованием регулярного микрорельефа вида IV ($Rz\ 3\div 5$ мкм).

Испытания на фреттинг-коррозию выявили недопустимо низкую стойкость серийных подшипников с шлифованными кольцами и возможность существенного повышения сопротивления фреттинг-коррозии за счет оптимизации состояния поверхностного слоя колец методом вибронакатывания: повышение микротвердости, создание сжимающих напряжений, образование регулярных по размерам, форме и взаиморасположению неровностей, отличающихся на порядок большими, чем при шлифовании, радиусами скругления выступов и впадин, т. е. значительно меньшими концентраторами напряжений и коррозии. Подшипники типа 32205 с вибронакатанными кольцами при испытаниях на долговечность оказались в восемь — десять раз более износостойкими, чем серийные. Столь значительный эффект может быть объяснен теми же факторами упрочнения и благоприятного регулярного микрорельефа, о которых говорилось выше.

Граничное трение качения. Шар — сферическая поверхность, металл — металл. Вращательное движение. Исследование¹ ставило целью выявление возможности повышения ресурса работы шарикоподшипников за счет оптимизации и регуляризации микрорельефа, а также упрочнения поверхностного слоя сферических поверхностей беговых дорожек шарикоподшипников. Сопоставлялись шарикоподшипники серии 205К с внутренними кольцами, беговая дорожка которых шлифовалась и вибронакатывалась и выглаживалась алмазом при режимах, приведенных в табл. 18. Наиболее близким к оптимальному оказался микрорельеф вида IV, со следующими значениями параметров: $r/R_{\max} = 1660\div 1800$; $r'/R_{\max} = 2950\div 3000$; $N = 1450\div 1470$ выступов на 1 см^2 . Вибронакатывание производилось виброголовкой (см. рис. 26).

Результаты стендовых испытаний: 1) долговечность подшипников с вибронакатанными кольцами при 10-процентной вероятности их разрушения $T_{10} = 174$ ч, при 50-процентной — $T_{50} = 128$ ч; 2) повышение долговечности шарикоподшипников с вибронакатанными кольцами соответственно на 22 % при 10-процентной и на 214 % при 50-процентной вероятности их разрушения.

Динамическая грузоподъемность подшипников с кольцами с упрочненным поверхностным слоем и с оптимальным регулярным микрорельефом повысилась в два раза. Уровень вибрации после полирования вибронакатанных колец составлял 72—74 дБ, что меньше допустимого для шарикоподшипников серии 205К, равного 80 дБ. При условии применения для вибронакатывания специального станка производительность операций вибронакатывания

¹ Выполнено автором совместно с В. Н. Реутовым и Ю. Л. Барановым в ЛИТМО, в Вологодском политехническом институте и на Вологодском ГПЗ-23.

будет достаточно высокой за счет увеличения числа осцилляций деформирующего элемента до 40—50 тыс. в минуту; затраты на эту операцию могут быть компенсированы за счет исключения одной из операций шлифования.

Граничное трение. Пара зубчатых колес, металл — металл. Качение с проскальзыванием. Цель исследования — выявление возможностей улучшения условий работы цилиндрических зубчатых колес, повышения их износостойкости за счет оптимизации площади контакта и увеличения маслосъемности. Исследовались модели, воспроизводящие цилиндрические колеса с прямым зубом

18. Режимы вибронакатывания и алмазного выглаживания беговых дорожек шарикоподшипников

Метод финишной обработки	Исходная поверхность	Исходная шероховатость R_a , мкм	Материал индентора	Радиус индентора, мм	Усиление, кН	Подача, мм/об	Частота вращения шпинделя, рад/с	Частота осцилляций, 1/мин	Амплитуда осцилляций, мм	Шероховатость после обработки, мкм
Вибронакатывание	Шлифованная	0,25—0,4	Алмаз	1,5	25	0,04	2,5	1440	0,4	0,1—0,16
	Полированная	0,063—0,1	ВКЗ	1,8	24	0,06	1,2	2250	1,2	0,063—0,1
Алмазное выглаживание	Шлифованная	0,25—0,4	Алмаз	2,0	25	0,01	31,5	—	—	0,1—0,16

(см. рис. 29, в) с модулем 5 мм из стали 40X в масляной ванне (Индустриальное 20). Условия испытания: частота вращения 105 рад/с, проскальзывание 20 %, радиусы кривизны контактирующих поверхностей $r = 25$ мм, нагрузка 782 Н. Сопоставлялись приработываемость, износостойкость и маслосъемность шлифованных и вибронакатанных образцов, обработанных по схеме на рис. 29, а инструментом, показанным на рис. 29, б. Основные результаты следующие: 1) длительность приработки вибронакатанных образцов на 30 % меньше, чем шлифованных; 2) износ при прочих равных условиях уменьшился в 1,4 раза. Эти результаты могут быть объяснены улучшением условий образования и удержания смазки в зоне контакта.

Эффективность и перспективность применения метода вибронакатывания зубчатых колес для повышения надежности и ресурса их работы безусловны.

Граничное трение скольжения. Пара червяк — червячное колесо, металл — металл. Вращательное движение. Ресурс ра-

боты и надежность червячных пар зависят от условий образования и удержания масляной пленки в зоне контакта рабочих поверхностей червяка и червячного колеса. Исследованием¹ ставилась задача установить условия и возможности повышения ресурса работы червячных пар за счет повышения маслосъемности рабочих поверхностей червяка, созданием систем канавок вибронакатыванием. Вибронакатывание стальных червяков производилось при помощи специальной виброголовки, работающей по схеме (см. рис. 27). При исследовании сопоставлялись шлифованные

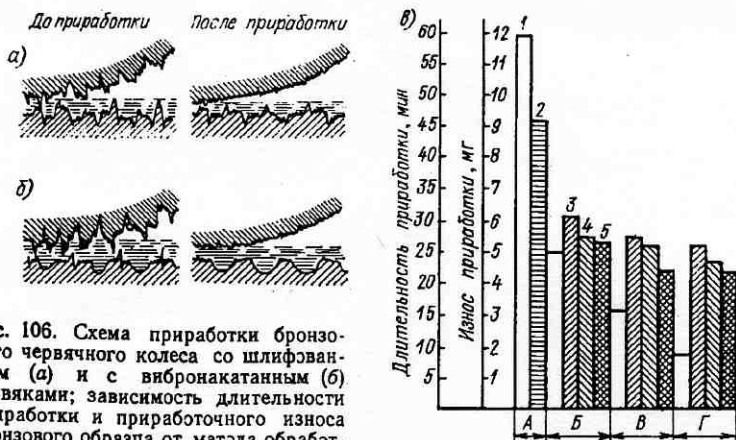


Рис. 106. Схема приработки бронзового червячного колеса со шлифованным (а) и с вибронакатанным (б) червяками; зависимость длительности приработки и приработочного износа бронзового образца от метода обработки ролика, имитирующего червяк (в):

А — шлифование; Б — частично регулярный микрорельеф ЧРМ вида I; В — ЧРМ вида II; Г — ЧРМ вида III;
 1 — длительность приработки; 2 — пара со шлифованным червяком; 3 — площадь канавок $F_K = 10+20\%$; 4 — $F_K = 20+35\%$; 5 — $F_K = 35+50\%$

и вибронакатанные стальные закаленные червяки (HRC 40—42), их прирабатываемость и износостойкость. Результаты исследования на прирабатываемость иллюстрируются схемами приработки (рис. 106, а) и диаграммами зависимости длительности приработки и величины приработочного износа от способа обработки и микрорельефа рабочих поверхностей червяка (рис. 106, в).

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы: 1) создание на рабочей поверхности червяка систем масляных канавок вида I ($F_K = 35+50\%$) снижает длительность приработки пары червяк — червячное колесо с 25 до 8 мин; при этом величина приработочного износа уменьшается в два раза; 2) ресурс работы бронзовых червячных колес, работающих в паре с вибронакатанными стальными червяками, возрастает почти в 2,5—3 раза, что подтверждается данными эксплуатации камне-

¹ Выполнено А. В. Барсегином.

резных машин СМ-177А в течение четырех лет; 3) измерения толщины масляной пленки и температуры в зоне контакта червячного колеса и шлифованных и вибронакатанных червяков свидетельствуют о том, что основной фактор, определяющий улучшение эксплуатационных свойств червячных пар, — увеличение маслосъемности рабочей поверхности червяка и улучшение условий ее удержания в зоне контакта.

Сухое трение скольжения. Цилиндрическая пара металл — металл. Поступательное движение. В машино- и приборостроении применяется относительно мало пар трения, работающих без смазки. К таким парам условно можно отнести пару калибр — контролируемое изделие. Можно было предположить, что микрорельеф высокогладких рабочих поверхностей калибров 10—13-го классов шероховатости является неоптимальным для условий сухого абразивного трения. Однако это предположение требовало проверки. С этой целью были выполнены два исследования.

Первое исследование¹ проводилось на образцах, имитировавших гладкие калибры-пробки из стали У10А (HRC 61—64) диаметром 12 мм, длиной 10 мм. Сопоставлялась

износостойкость образцов, обработанных четырьмя способами: 1) доводкой в соответствии с действующим технологическим процессом (10-й класс шероховатости); 2) доводкой с последующим алмазным выглаживанием (радиус сферы алмазного наконечника $R = 1,5$ мм; $P = 196$ Н; $n_s = 19,1$ рад/с; $s = 0,02$ мм/об); 3) доводкой с последующим вибронакатыванием алмазным наконечником ($R = 1,5$ мм; $n_s = 16,8$ рад/с; $s = 2$ мм/об; $n_{дв. х} =$

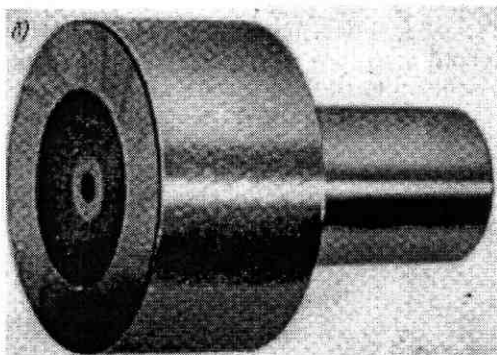
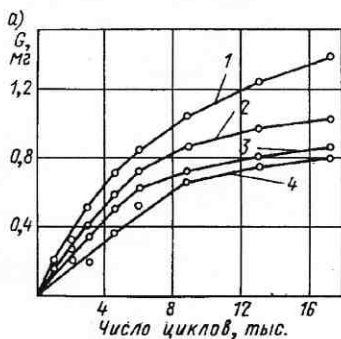


Рис. 107. Зависимость весового износа калибра от числа циклов изнашивания при различных способах обработки (а); вибронакатанный калибр (б)

¹ Выполнено автором совместно с В. А. Гороховым.

= 2800 1/мин; $e = 0,6$ мм; $P = 432$ Н) 4) доводкой с последующим алмазным выглаживанием и вибронакатыванием (режимы те же, что и при обработке деталей второй и третьей групп). Таким образом, ставилась задача повышения износостойкости как за счет упрочнения. Испытания образцов на износ производились в паре со втулками из стали 45 (HRC 45—48), обработанных по 7-му классу шероховатости. Определялся весовой и размерный износ. Результаты исследования показаны на рис. 107, а. Из графика и по данным измерения весового износа следует, что при 17 200 циклах истирания износ доведенных калибров равен 1,33 мг и 1,2 мкм (кривая 1), выглаженных — 1,02 мг и 0,8 мкм (кривая 2), доведенных вибронакатанных — 0,86 мг и 0,7 мкм (кривая 3) и доведенных выглаженных и вибронакатанных — 0,8 мг и 0,6 мкм (кривая 4), т. е. образцы четвертой группы изнашивались в два раза по массе и в 1,73 раза по размеру меньше, чем доведенные.

При 25 600 циклах истирания износостойкость выглаженных образцов по сравнению с доведенными была выше в 2,07 раза, вибронакатанных — в 2,77 раза, а выглаженных и вибронакатанных — в 3,25 раза. Таким образом, наиболее эффективным оказался технологический процесс чистой обработки, обеспечивающий одновременно упрочнение рабочей части поверхности и оптимизацию микрорельефа за счет образования канавок — «ловушек», куда западают абразивные, металлические и твердые частицы из окружающей среды, в результате чего износ локализуется. Оптимальным в этом случае оказался микрорельеф вида II (с касающимися канавками, $F_x = 28$ %, см. рис. 74), глубина выдавливаемых канавок при указанном выше режиме составляла 3—5 мкм.

Второе исследование¹ выполнялось непосредственно на рабочих калибрах диаметром $4,6^{+0,05}$ и $6^{+0,08}_{-0,09}$ мм ($\psi 10A$; HRC 61—63). Калибрами диаметром 4,6 мм измерялись детали из стали 50ХФА (HRC 48—53) после внутреннего шлифования (распылитель насоса-форсунки), а калибрами диаметром 6 мм — детали из стали А-30 после разворачивания (корпус насоса-форсунки). Сопоставлялись по износостойкости доведенные калибры заводского изготовления и те же калибры, вибронакатанные алмазным наконечником (микрорельеф вида II, $F_x = 28 \div 32$ %, $h_n = 1,2$ мкм; $P = 365$ Н). Износ доведенных калибров диаметром 4,6 мм достигал 5 мкм в среднем после 1150 измерений, а вибронакатанных — после 2400 измерений, т. е. износостойкость повышалась в 2,2—2,7 раза. Износостойкость калибров диаметром 6 мм в результате вибронакатывания повысилась еще значительно — в 2,5—3,3 раза.

Если учесть малую трудоемкость операции вибронакатывания (для калибров диаметром 4,6 мм и длиной $l = 25$ мм $T_{маш} = 24$ с;

¹ Выполнено автором совместно с Ю. И. Мулиным.

для калибров диаметром 6 мм и длиной $l = 50$ мм $T_{\text{маш}} = 50$ с) и возможность исключения одной операции тонкого шлифования или доводки, целесообразность нового технологического процесса чистовой обработки калибров станет очевидной.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что эффективность оптимизации микрорельефа как средства повышения износостойкости трущихся поверхностей при сухом трении столь же значительна, как и при граничном.

Сухое трение скольжения. Торцовая пара металл — металл. Вращательное движение. На тех же образцах, на которых проводилось ранее описанное исследование износостойкости торцовых поверхностей при граничном трении, исследовалось и сухое трение. Из рис. 80 видно, что характер зависимости между сопротивлением схватыванию и опорной поверхностью при граничном и сухом трении идентичен (при вибронакатывании с образованием нового микрорельефа вида IV опорная поверхность обратно пропорциональна скорости обработки). Эта зависимость нелинейна и существует оптимальная опорная поверхность, определяющая величину площади контакта трущихся поверхностей, наиболее благоприятную в отношении сопротивления схватыванию. Такой же характер имеют зависимости между моментом трения и давлением и величиной опорной поверхности (см. рис. 91), причем характер и этих зависимостей идентичен как при сухом, так и при граничном трении.

Сухое трение скольжения в вакууме. Цилиндрическая пара металл — металл. Вращательное движение. Целью исследования¹ являлось выявление возможности улучшения условий трения металлических поверхностей в вакууме при температуре 600 °С, снижение или исключение схватывания и потерь на трение. Решение этих задач оказалось возможным лишь при условии нанесения на трущиеся поверхности твердой смазки дисульфида молибдена с последующим вибронакатыванием их алмазным наконечником и образованием регулярного микрорельефа вида IV. Такой микрорельеф (8-й класс шероховатости) создавался при помощи описанной ранее виброголовки на токарном станке 1К62 на наружной сферической, внутренней цилиндрической и торцовой поверхностях диаметром, соответственно равным 18, 23 и 8,1 мм. Постоянными значениями параметров режима вибронакатывания всех поверхностей были: $n_{\text{дв. х}} = 1440$ 1/мин; $l = 1,0$ мм; $d_{\text{ш}} = 1,5$ мм; $P = 254$ Н. На сферической поверхности регулярный микрорельеф создавался на поясах шириной не более 2 мм. Дополнительное требование к режиму и условиям вибронакатывания по слою твердой смазки — недопустимость отслаивания дисульфида молибдена от основного металла (толщина слоя смазки не превышала 16 мкм). Применение вибронакатывания и образование регулярного микрорельефа с неровностями высотой по 8-му

¹ Выполнено И. Р. Цимбалом.

классу в сочетании с некоторым упрочнением поверхностного слоя снизило коэффициент трения с 0,12 до 0,07, повысило ресурс работы пар в 2—2,5 раза, резко уменьшило число случаев отслаивания слоя смазки от основного металла.

Данное исследование, выполненное в лабораторных и эксплуатационных условиях, выявило перспективность регуляризации микрогеометрии поверхностей трения, работающих в вакууме в условиях воздействия значительных температур.

Сухое трение скольжения. Торцово-шаровая пара металл — металл. Поступательно-вращательное движение. Исследование, освоение процесса вибронакатывания и внедрение в производство¹ осуществлялось на реальной паре бронзовая (БрОС 8) опора с рабочей торцовой поверхностью диаметром 9 мм — стальной закаленный шар (ШХ-15) диаметром 125 мм. Необходимо было выявить возможность увеличения числа соударений — «посадок» шара и опоры и исключения при контакте переноса металла опоры на поверхность шара. По этим эксплуатационным свойствам сопоставлялись пары с опорами, у которых торцовые поверхности были обработаны тонким точением по 10-му классу шероховатости и вибронакатыванием по схеме на рис. 5, б. Оптимальным вибронакатанным микрорельефом оказался регулярный микрорельеф вида IV с высотой неровностей 7-го класса, создаваемый при режиме: $n_a = 6,3$ рад/с; $s = 0,07$ мм/об; $e = 0,15$ мм; $n_{дв.х} = 1345$ 1/мин; $d_{ш} = 6$ мм; $P = 147$ Н. При таком режиме образовывался не только оптимальный микрорельеф, но и повышалась на 15—20 % микротвердость. Эти два фактора определили увеличение числа «посадок» шара в 2—2,5 раза с практически полным исключением переноса бронзы на поверхность шара по сравнению с обточенными опорами.

Сухое трение скольжения. Пара плоскость — сфера, металл — металл. Вращательное движение. Целью исследования было выявление возможности повышения надежности и ресурса работы контактной пары электромеханического коммутатора с золотыми ламелями и золотой щеткой. Сопоставлялась работа коммутаторов с платами, доведенными до 12-го класса шероховатости ламелями и с вибронакатанными ламелями (микрорельеф вида IV с числом выступов на 1 мм², равным 4; 8; 11; 23, с высотой неровностей соответственно по 7-му классу).

Основные результаты исследования и испытания сводятся к следующему:

1) приработка ламелей с регулярным микрорельефом заметно сокращается по длительности и величине приработочного износа;

2) практически полностью исключаются ложные сигналы, возникающие как следствие замыкания ламелей продуктами износа (исчезает шлейф, тянущийся за щеткой). Если учесть, что столь значительное улучшение эксплуатационных свойств комму-

¹ Выполнено Р. У. Назировым и З. Г. Соломоном.

таторного узла сочетается со снижением требований к шероховатости на пять классов и уменьшением расхода золота, то новая конструкция платы и технология ее обработки безусловно перспективны.

Сухое трение скольжения. Цилиндрический металлический барабан — магнитная лента. Вращательно-поступательное движение. Цель исследования¹ — выявить возможность за счет регуляризации и оптимизации рабочей поверхности барабана малогабаритных видеоманитфонов, контактирующих с протягиваемой магнитной лентой, снизить величину статического коэффициента трения f_c , динамического коэффициента трения f_d и усилия сдергивания ленты. Исследование проводилось при следующих условиях: температура $20 \pm 5^\circ\text{C}$, относительная влажность $50 \pm 5\%$, атмосферное давление 760 ± 15 мм рт. ст.; перед испытанием рабочая поверхность барабана (сталь 45, диаметр 96 мм) тщательно обезжиривалась спиртом и высушивалась, магнитная лента протиралась гектаном. При исследовании сопоставлялись пары барабан — магнитная лента с рабочей поверхностью барабана, тонко обточенной (86—8в-го класса шероховатости) и вибронакатанные с частично регулярным и регулярным микрорельефом.

Результаты исследования приведены на графике рис. 74, e и позволяют сделать следующие выводы. Наиболее близким к оптимальному оказался микрорельеф вида I с площадью $F_k = 45\%$. Все выявленные зависимости оказались четко нелинейными (кривая 1 $f_c = f(F_k)$; кривая 2 $f_d = f(F_k)$; кривая 3 — зависимость усилия сдергивания от величины F_k). Было также выявлено влияние расположения канавок относительно направления движения ленты, определяемом углом γ , при экстремальных значениях зависимостей (см. рис. 74, e), оптимальным оказалось направление канавок под углом $\gamma = 40\text{--}50^\circ$ при оптимальных значениях F_k и α , значения $f_c = 0,302 \div 0,310$ для пар с тонко обточенными барабанами, против $f_c = 0,250 \div 0,256$ — с вибронакатанными; соответственно $f_d = 0,288 \div 0,301$ для обточенных и $f_d = 0,236 \div 0,247$ — для вибронакатанных. Производились также исследования на барабанах из алюминиевого сплава САС-1, из сплава САС-1 с покрытиями (эматалирование и анодирование) и из стали Х18Н10.

Анализ данных исследования трения и износа большого числа разных пар, работающих в разнообразных условиях, позволяет сделать некоторые общие выводы.

1. Независимо от конструкции пар трения и условий их работы основными геометрическими характеристиками качества трущихся поверхностей, определяющими их прирабатываемость и износостойкость, является опорная поверхность, форма микрорельефов и их однородность; эти характеристики обуслови-

¹ Выполнено автором совместно с Н. А. Руновой, Ю. И. Мулиным и Ю. В. Королевым.

вают в первую очередь маслосъемкость поверхностей при граничном трении и оптимальную величину площади контакта при сухом трении. Нормирование конструктором лишь высоты микронеровностей является недостаточным.

2. Практически все основные, наиболее широко применяемые в промышленности способы чистовой обработки (точение, шлифование, хонингование, доводка, обкатывание роликами и шарами)

19. Зависимость различных видов разрушения при трении и износе от параметров микрорельефа трущихся поверхностей

Вид разрушения	R	r	β	S	r'	σ_R
Микрорезание	-	+	-	+		+
Передеформирование (отделение частиц)	-	+	-	+	+	+
Глубинное вырывание	-	+	-	+	+	+
Атомарный износ		+	-	+	+	+
<p>Примечание. Знак «плюс» означает, что увеличение значения параметра сказывается положительно на сопротивлении разрушению, «минус» — отрицательно.</p>						

образуют поверхности, микрорельеф которых в подавляющем большинстве случаев далек от оптимального главным образом из-за недостаточной маслосъемкости при граничном трении и чрезмерно большой или малой опорной поверхности при сухом.

Во всех исследованных случаях увеличение маслосъемкости одной или обеих трущихся поверхностей, обработанных чистовым точением (6—8-е классы шероховатости), шлифованием (7—9-й классы), хонингованием (9—11-й классы); доводкой (10—11-й классы) и обкатыванием (8—11-й классы), приводило к улучшению

их прирабатываемости, предотвращению образования дефектов (натиров, задиров) и схватывания, к уменьшению износа. Увеличение маслосъемкости, которое характеризовалось площадью F_{11} , при образовании микрорельефов видов I, II и III, в зависимости от характера пар трения и условий их работы составляло 25—55 %. Зависимость износа от маслосъемкости и величины опорной поверхности трущихся деталей нелинейна. Интервал оптимальных значений маслосъемкости и опорной поверхности в большинстве случаев весьма ограничен, что определяет необходимость тщательной экспериментальной отработки микрорельефа поверхностей трения.

В тех случаях, когда оптимальным оказывается микрорельеф вида IV, определяющий маслосъемкость и опорную поверхность, геометрическими его характеристиками являются высота микронеровностей R , радиусы закругления вершин r и впадин r' микронеровностей, угол наклона их образующих β , шаг S и однородность по высоте σ_R . В табл. 19 приведена качественная зависи-

мость различных видов разрушения при трении и износе от пар. метров микрорельефа трущихся и изнашивающихся поверхностей.

3. Оптимизация микрорельефа трущихся поверхностей — эффективный способ улучшения прирабатываемости, уменьшения прирабочного и нормального износа, улучшения противозадирных свойств.

Выявление оптимальных микрорельефов в каждом случае требует проведения несложной и малотрудоемкой экспериментальной отработки.

Исходными данными для отработки конструкции многих различных пар трения могут служить приведенные результаты исследований и испытаний.

10. Плавность хода, бесшумность

Плавность хода характеризуется точностью перемещения одной детали относительно другой на заданную величину. Особо высокие требования по плавности хода предъявляются к деталям прецизионных пар приборов, станков, аппаратов. Высокая плавность хода достигается высокой точностью обработки деталей и тщательностью отделки их рабочих поверхностей с применением чаще всего доводочных операций.

Как уже указывалось, большинством способов чистовой обработки резанием создаются поверхности недостаточно маслоемкие; этот дефект проявляется тем в большей мере, чем тщательнее обработаны поверхности. Так, особо малой маслоемкостью отличаются поверхности классов шероховатости выше 10—14-го; именно так тщательно обрабатываются детали прецизионных пар, к которым предъявляются особо высокие требования в отношении плавности хода. Поэтому работа таких пар сопряжена не только с недостаточной плавностью хода, но с опасностью задиров и даже схватывания. Для выявления возможности улучшения работы прецизионных пар за счет увеличения маслоемкости рабочей поверхности одной из деталей проведено исследование¹. Объектом исследования являлась прецизионная пара узла настройки на размер корпуса ползуна вертикального суппорта — направляющая автомата продольного точения 1А12В, изготовляемого на Ленинградском заводе станков-автоматов. Вибронакатыванием обрабатывалась наружная цилиндрическая поверхность корпуса диаметром 30С и 35С (материал — чугун СЧ 28—48, НВ 200—210). Пары с вибронакатанными корпусами сопоставлялись по плавности хода с парами, корпуса которых обрабатывались по принятому на заводе технологическому процессу — доводка трехмикронной пастой с достижением шероховатости 11—12-го классов. При этом выдерживалось отклонение от геометрической формы, равное 2 мкм, а сборка пары производилась с зазором 3—6 мкм.

¹ Выполнено автором совместно с Ю. И. Мулиным и Г. Н. Богдановым.

При высокоточной настройке на размер корпус вертикального суппорта совершает эпизодические возвратно-поступательные перемещения с малой скоростью. Малые зазоры, недостаточная маслосъемность контактирующих поверхностей и неблагоприятные условия подачи и удержания смазки в зоне трения приводили к нарушению плавности хода, неравномерному скачкообразному перемещению и, к несоответствию величин перемещения корпуса показаниям лимба микрометрического винта, что снижало точность настройки и работы станка.

Наблюдались и явления образования задиров и схватывания; затруднена была сборка пары.

Первоначально был выявлен оптимальный вид микрорельефа; им оказалась система канавок вида II, аналогичная примененной для обработки калибров-пробок. Для выявления оптимальных значений площади F_K , занимаемой канавками, и их удельного объема $v_{уд}$, значения F_K и $v_{уд}$ варьировались в пределах: $F_K = 28 \div 76 \%$, $v_{уд} = 0,00166 \div 0,00507 \text{ мм}^3$. Наилучшими в отношении плавности хода оказались поверхности корпусов с вибронакатанными поверхностями с $F_K = 42 \%$ и $v_{уд} = 0,00318 \text{ мм}^3$.

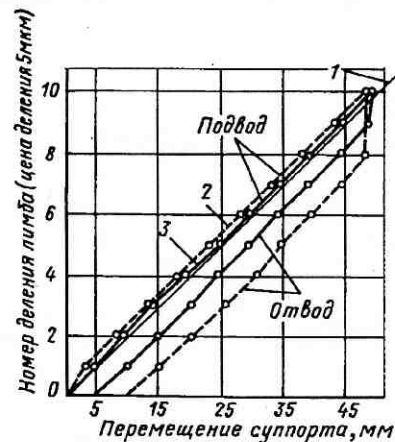


Рис. 108. Зависимость плавности хода от способа обработки корпуса ползуна

Такой микрорельеф создавался при следующем режиме вибронакатывания: $n_a = 2,94 \text{ рад/с}$ ($d_a = 30 \text{ мм}$); $s = 2,5 \text{ мм/об}$; $n_{д.х} = 1400 \text{ 1/мин}$; $e = 3 \text{ мм}$; $d_{ш} = 6 \text{ мм}$; $P = 392 \text{ Н}$. При этом режиме глубина выдавливавшихся канавок составляла $6,5 \text{ мкм}$. При выдавливании канавок по краям их образовывались наплывы высотой $1\text{—}3 \text{ мкм}$. Размеры, форма и расположение наплывов оказались столь равномерными, что форма исходной цилиндрической поверхности осталась практически неизменной, однако диаметр ее увеличился на $2\text{—}6 \text{ мкм}$. Поскольку одной из задач исследования являлось выявление возможности создания прецизионных пар с зазором $1\text{—}2 \text{ мкм}$, значительно меньшим, чем в парах, изготовлявшихся до сих пор, после вибронакатывания производилась доводка до требуемого размера за счет снятия металла наплывов.

Результаты сравнительного исследования плавности хода пар с доведенными и вибронакатанными корпусами вертикальных суппортов иллюстрируются рис. 108 (пара собрана с зазором 6 мкм). На графике линия 1 — теоретическая траектория пере-

мещения суппорта от винта; линия 2 — траектория движений подвода и отвода при работе пары с корпусом суппорта, обработанным по действующей на заводе технологии; линия 3 — траектория движений подвода и отвода суппорта с вибронакатанным корпусом. Из сопоставления величин смещения траекторий подвода и отвода, характеризующих плавность хода в парах с доведенными и вибронакатанными корпусами, видно, что во втором случае величина смещения в два с лишним раза меньше, что определяет значительное повышение точности настройки автомата.

При испытании пар с меньшими зазорами (1—3 мкм) не наблюдалось задиров и схватывания, а плавность хода сохранялась столь же высокой, как при зазоре 6 мкм. Возможность создания пар, нормально работающих при столь малых зазорах, является важной и перспективной для реализации, в частности в прецизионном приборостроении. Повышение точности и плавности хода в исследовавшемся узле автомата продольного точения позволило повысить точность настройки и обработки инструментом, закрепленным в вертикальном суппорте, и сократить время на наладку и подналадку автомата. Облегчается и сборка данной пары. Характерно, что практически во всех случаях, когда решались задачи улучшения прирабатываемости поверхностей и повышения их износостойкости, одновременно улучшалась плавность хода. Так, в самолетной рулевой машинке в паре шток — корпус, недостаточная плавность хода приводила к вибрациям рукоятки управления. Образование в средней части штока регулярного микрорельефа вида IV почти полностью исключило вибрации за счет уменьшения площади контакта этой поверхности с поверхностью втулки, улучшения условий смазки за счет увеличения маслостойкости поверхности и регулярности неровностей по форме и высоте. Выявилось также, что необходимо на крайних участках рабочей поверхности штока, работающих в иных условиях, чем поверхность среднего участка, создавать частично регулярный микрорельеф вида I ($F_k = 30 \div 32 \%$). Необходимо заметить, что в конструкторской практике такое нормирование микрогеометрии поверхностей деталей машин и приборов встречается крайне редко, в то время как результаты наших исследований свидетельствуют о том, что во многих случаях оно просто необходимо (см. рис. 44 и 105). Оптимизация микрорельефа образованием частично регулярного и регулярного микрорельефов резко увеличила плавность хода в столь конструктивно мало схожих узлах трения, как червячная пара камнерезной машины и пары барабан — магнитная лента видеоманитофона. В первом случае это привело к улучшению качества обработки (рез камня стал более ровным и гладким), а во втором — к повышению качества записи.

Характер и условия работы некоторых машин и приборов определяют необходимость ограничения шума, в частности, возникающего в парах трения и иногда называемого механическим шумом, в отличие от трансформаторного в электродвигателях и других

шумов. Причина появления такого шума, по-видимому, лежит в том, что при граничном и особенно при сухом трении отдельные микровыступы трущихся поверхностей, упруго контактируя друг с другом, начинают колебаться. При определенных условиях возникают колебания со звуковой частотой, характеризующиеся достаточно широким спектром [5]. С увеличением нагрузки частота колебаний снижается, а с повышением скорости скольжения возрастает. Очевидно, что и сила вдавливания одного микровыступа в другой и частота колебаний будут существенно зависеть от формы микронеровностей и их шага.

Экспериментальное исследование¹ зависимости шума от микрорельефа трущихся поверхностей было выполнено на подшипниковой паре вал — втулка диаметром 12 мм на установке для измерения уровня шума Ш-63 в специальной камере. Основные результаты по испытаниям двигателей, работавших в течение 320 ч, сводятся к следующему.

1. После обкатки двигателя в течение 4 ч колебания шума двигателей со втулками, обработанными развертыванием, раскатыванием и вибронакатыванием, с микрорельефом всех четырех видов находились в пределах 28—37 дБ (не считая двух «шумных» двигателей: с развернутой втулкой — 46 дБ и обкатанной — 45 дБ). Колебание шума у двигателей с вибронакатанными втулками (с микрорельефами четырех видов — от 30 до 37 дБ).

2. После работы двигателей в течение 50 ч во всех случаях шум двигателей уменьшился в пределах 3—7 дБ.

3. После работы двигателей в течение 320 ч во всех случаях, кроме двигателей с обкатанными втулками, шум снизился по сравнению с исходным после сборки и несколько повысился по сравнению с шумом после 50 ч работы.

4. Наибольший темп снижения прироста шума оказался за 316 ч работы у двигателей с вибронакатанными втулками (4,2 дБ) по сравнению с двигателями с развернутыми втулками (2,65 дБ) и обкатанными (1,5 дБ).

5. Наилучшим (по бесшумности) оказался микрорельеф вида III с площадью канавок $F_n = 60\%$.

Позднее выполненные исследования в Вологодском политехническом институте, ЛИТМО, ГПЗ-23 и ГПЗ-3² выявили реальную возможность использования вибронакатывания для повышения долговечности подшипников.

Основной причиной, сдерживающей внедрение в подшипниковой промышленности данного метода, является повышенный уровень вибрации и шума в подшипниках с вибронакатанными беговыми дорожками. Как показали исследования, при вращении внутреннего кольца подшипника неровности на рабочих поверхностях его деталей приводят к изменению положения центров

¹ Выполнено автором совместно с Г. Г. Лебединским и В. Б. Оникулом.

² Выполнено автором совместно с В. Н. Реутовым и В. А. Захаровой.

тяжести тел качения, в результате чего возникает радиальное смещение, передающееся наружному кольцу — появляются колебания, вызывающие вибрации и шум подшипников.

Анализ влияния различных видов отклонений поверхности от идеальной (овальность, гранность, волнистость, шероховатость) на вибрации и шум в подшипниках показывает, что наибольшее воздействие на данный параметр оказывает волнистость.

При вибронакатывании, как правило, упруго закрепленным индентором волнистость исходной поверхности изменяется лишь в той мере, в какой длина волны соизмерима с площадью контакта индентора и обрабатываемой детали. Так, при вибронакатывании внутренних колец подшипника 205К со шлифованными беговыми дорожками с исходной волнистостью 1,3—1,6 мкм последняя уменьшается на 0,4—0,6 мкм за счет сглаживания их высокочастотных составляющих. Поэтому для решения задачи снижения шума в подшипниках необходимо производить вибронакатывание после полирования или суперфиниширования, т. е. кольца имеют наименьшую исходную волнистость. Если у подшипников 205К с внутренними кольцами, вибронакатанными после шлифования, уровень вибрации находился в пределах 88—94 дБ, что выше допустимого, то после вибронакатывания по полированным поверхностям он составил 72—74 дБ, т. е. в допустимых пределах (для подшипников 205К допуск на вибрацию — 80 дБ).

Анализ полуоктавного и третьоктавного спектров вибраций подшипников показал, что регуляризация микрорельефа вибронакатыванием на уровне волнистости также позволяет уменьшить шум в подшипниках. Увеличение амплитуды волнистости с 0,4 до 1,0 мкм вызывает повышение уровня вибрации и шума на 8 дБ у подшипников шлифованных и на 4—5 дБ у вибронакатанных.

11. Сопротивление ползучести

В последнее время уделяют все большее внимание явлению ползучести — пластическому течению металла под воздействием постоянного напряжения или постоянной нагрузки. Это обусловлено, с одной стороны, возрастающими напряжениями и нагрузками, воспринимаемыми деталями современных машин и приборов, а с другой — непрерывно повышающимися требованиями к стабильности их размеров. В этой связи особо серьезные задачи приходится решать в точном приборостроении. Характерной является задача уменьшения ползучести такого широко используемого в промышленности и безусловно перспективного материала, как титан и его сплавы. Так, для изготовления деталей прецизионных электромашин технический титан ВТ1-1 весьма склонен к ползучести при комнатной температуре, что приводит к нарушению геометрической формы деталей и недопустимому изменению величины зазоров между ними в процессе эксплуатации. При напряжении, равном 75 % от предела прочности, титан

течет при комнатной температуре со скоростью 0,01 % в час. С повышением температуры предел ползучести титана сначала снижается, но при 120 °С начинает расти, достигая максимума при 200—250 °С.

Различают три основные стадии деформации при ползучести (рис. 109, а): мгновенная деформация ϵ_0 , стадия неустановившейся деформации, когда скорость деформации непрерывно понижается (стадия I), стадия установившейся деформации, когда скорость деформации постоянная (стадия II), стадия ускоренной ползучести, завершающейся разрушением (стадия III).

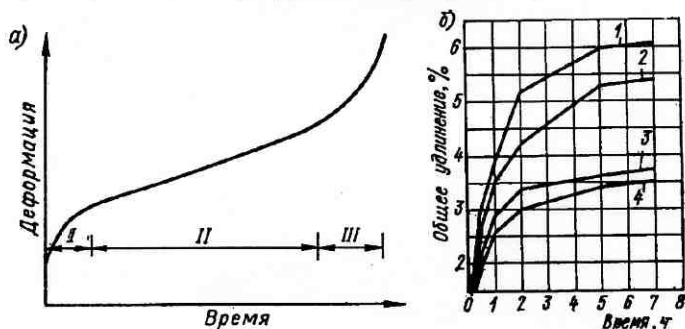


Рис. 109. Типовой график зависимости ползучести от длительности испытаний (а) и зависимость деформации от длительности нагружения при испытании на ползучесть образцов, обработанных (б):

1 — точением; 2 — шлифованием; 3 — обкатыванием; 4 — виброкатыванием

Согласно дислокационной теории, ползучесть металла обусловлена существованием в кристаллах дислокаций, которые под действием напряжений приходят в движение, выходя на поверхность или затормаживаясь на препятствиях. Переход от стадии I к стадии II ползучести связан с упрочнением. Исследования выявили также благоприятное влияние на сопротивление ползучести предварительной деформации. Это и определило постановку исследования влияния способов обработки резанием и давлением на сопротивление ползучести¹. Материалом образцов для исследования был принят технический титан ВТ1-1.

Первое исследование ползучести проводилось по ГОСТ 3248—60 на отожженных образцах диаметром 10 мм и расчетной длиной 50 мм, обработанных точением, шлифованием, обкатыванием шаром ($d_{ш} = 9,5$ мм; $P = 98,1$ Н; $s = 0,097$ мм/об; $n_3 = 33,3$ рад/с) и виброкатыванием ($n_{дв.х} = 2600$ 1/мин; $e = 2$ мм). Испытания, проводившиеся при первоначальном растягивающем напряжении $\sigma = 468$ МПа (нагрузка 36,7 кН), дали следующие результаты (рис. 109, б). Если принять за 100 %

¹ Выполнено автором совместно с В. А. Гороховым.

наибольшее удлинение обточенных образцов за 7 ч, то удлинение шлифованных составляло 88,5 %, обкатанных 60,6 % и вибронакатанных 57,4 %.

Поскольку условия испытания на ползучесть по ГОСТ 3248—60 существенно отличны от реальных условий работы, в частности тонкостенных деталей из титана, второе исследование было проведено на реальных деталях типа тонкостенных колец.

Критерием оценки ползучести в этом случае было изменение эллиптичности ΔD_0 , измерявшееся с точностью до одного микрометра. Кольца диаметром 47,7 мм с толщиной стенки 1,1 мм, шириной 7,5 мм обрабатывались по наружной поверхности точением, обкатыванием и вибронакатыванием при тех же значениях всех параметров режима, что и в первом исследовании, за исключением того, что обкатывание и вибронакатывание производились шаром диаметром 15 мм, а частота вращения заготовки $n_0 = 84$ рад/с. Испытания проводились под нагрузкой 33,1 Н первоначально при 20 °С. Результаты испытания иллюстрируются рис. 110; за время нагружения 113 ч эллиптичность увеличилась у обкатанных образцов на 22,8 %, а у вибронакатанных на 34,4 %

меньше, чем у обточенных. При тех же условиях были проведены испытания на ползучесть в зависимости от температуры (при различных температурах время нагружения составляло 23 ч), изменявшейся в интервале от -20 до +120 °С. Как и в предыдущих случаях, наибольшей нестабильностью размеров обладали кольца, обработанные точением. Так, при 60 °С увеличение эллиптичности обкатанных и вибронакатанных колец составляло соответственно 56,5 и 52,6 % по сравнению с увеличением эллиптичности обточенных. Таким образом, во всех случаях, независимо от температурных и других условий, титановый сплав значительно лучше сопротивляется ползучести при чистовой обработке его тонким пластическим деформированием по сравнению с чистовой обработкой резанием. Это может быть объяснено положительным влиянием сжимающих напряжений, возникающих в поверхностном слое металла при обработке давлением, затормаживающих и в какой-то мере компенсирующих действие напряжений, которые в процессе эксплуатации вызывают движение и развитие дислокаций, приводящих к явлению ползучести.

Это подтверждается также тем, что при одинаковых условиях пластического деформирования во всех случаях сопротивление

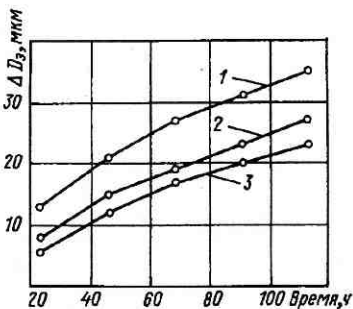


Рис. 110. Зависимость ползучести от времени нагружения
1 — точение; 2 — обкатывание; 3 — вибронакатывание

ползучести было большим у деталей, обработанных вибронакатыванием, по сравнению с обкатанными, так как более сложная кинематика процесса в первом случае (как было показано в гл. 1) при прочих равных условиях определяет большее деформирующее действие и сопровождается большим упрочнением. Не может не играть роли при этом и «закрытие» таких дефектов, как поры, глубокие заостренные риски, царапины, и образование микро-рельефа, характеризуемого радиусами впадин, в десятки и сотни раз большими, чем при шлифовании и точении, и значительно большими, чем при обкатывании.

12. Контактная жесткость

Поскольку контактная жесткость определяется, в первую очередь, фактической площадью контакта поверхностей, а следовательно, их микрорельефом [5, 14], безусловный интерес представляли исследования контактной жесткости стыков и других соединений деталей с частично регулярным и регулярным микрорельефом.

Выявлению зависимостей контактной жесткости от вида, типа и значений различных параметров регулярных микрорельефов и были посвящены исследования.

Первое исследование¹ определяло влияние частично регулярного микрорельефа на контактную жесткость поверхностей, обработанных различными способами. Стыкуемые поверхности плоских чугунных (СЧ 28—48) образцов обрабатывались тонким строганием ($Ra = 1,25$ мкм), тонким фрезерованием ($Ra = 1,0$ мкм), шлифованием периферией круга ($Ra = 1,20$ мкм), гладким обкатыванием ($Ra = 1,0$ мкм), шабрением (20—24 пятен на 25×25 мм²) и вибронакатыванием (вид II микрорельефа; $F_R = 35\%$). Номинальная площадь стыка $F = 13,2$ см². Такой размер стыка позволяет учесть влияние волнистости и одновременно с этим практически исключить влияние непрямолинейности и неплоскостности.

Исследование контактных деформаций проводилось на специальной установке, конструкция которой позволяла исключить погрешности, вызываемые деформациями стыков, входящих в измерительную систему и сводит к минимуму ошибки вследствие объемной деформации образцов. Измерение контактных перемещений осуществлялось оптическим способом с ценой деления 0,2 мкм. Упругая и пластическая составляющие сближения стыкуемых поверхностей определялись по различию деформации при первом и повторных нагружениях.

Контактная жесткость вибронакатанных образцов при повторных нагрузках оказалась большей, чем обработанных всеми исследованными способами резания. Вибронакатывание увеличи-

¹ Выполнено Р. Х. Амбаряном.

вает контактную жесткость поверхностей, обработанных шлифованием на 34 %, строганных — на 12 %, фрезерованных — на 10 % (данные приведены для давления $q = 0,49$ МПа). Контактная жесткость шабренных и вибронакатанных (после тонкого фрезерования) поверхностей примерно одинакова.

Образование системы канавок на гладкообкатанных поверхностях уменьшило их контактную жесткость на 36 %. При примерно одинаковых геометрических и физических характеристиках качества гладкообкатанных поверхностей, напльвы не способствуют повышению контактной выносливости, а образование системы канавок значительно уменьшает фактическую площадь контакта.

В дальнейшем определялись оптимальный вид регулярного микрорельефа, образованного вибронакатыванием, и численные значения геометрических параметров, обеспечивающих наибольшую контактную жесткость.

Влияние вида микрорельефа (исследовались виды I, II и III) вибронакатанных образцов практически не сказывается на изменении контактной жесткости плоских стыков. Была выявлена нелинейная зависимость между контактной жесткостью и площадью канавок F_k и определено оптимальное значение $F_k = 33 \div 38$ %. Наибольшей контактной жесткостью обладают поверхности с таким микрорельефом, когда под контактным напряжением находятся одновременно напльвы и микронеровности исходной поверхности, расположенные на одном уровне.

Исследование влияния параметров режима вибронакатывания на контактную жесткость торцовых поверхностей с регулярным микрорельефом вида IV и их оптимизация производились на стальных (сталь 45) образцах с применением дробного факторного эксперимента типа 2^{5-1} и крутого восхождения. В качестве независимых переменных были приняты условия вибронакатывания P , диаметр шара $d_{ш}$, частота вращения заготовки n_z , поперечная подача $s_{поп}$ и амплитуда осцилляции деформирующего элемента e .

Оптимизация параметров регулярного микрорельефа вида IV позволила повысить контактную жесткость торцовых поверхностей в два раза.

Второе исследование¹ было посвящено определению зависимости контактной жесткости прерывистых металлополимерных поверхностей (ПМПП) от материала полимера и микрогеометрии поверхности. В последнее время ПМПП все чаще используются в узлах трения машин и механизмов для повышения их износостойкости. Это достигается образованием ПМПП на одной из сопрягаемых деталей пары трения с использованием полимеров с высокими антифрикционными свойствами. Однако до сих пор не была изучена контактная жесткость ПМПП подобных соединений в связи с микрогеометрией.

¹ Выполнено А. И. Смирновым.

В экспериментах использовали сочетание антифрикционного чугуна марки АСЧ-1 с полипропиленом ППБ, полиамидом АК-7 и стиракрилом ТШ; площадь полимерных вставок в поверхности образцов составляла 50 %. Обработку ПМПП производили строганием, фрезерованием и вибро-накатыванием.

При исследовании микрогеометрии поверхностей ПМПП было выявлено, что характер микрогеометрии металлической и полимерной поверхностей существенно отличен. Кроме того, при анализе профилограмм установлено, что полимерные площадки вы-

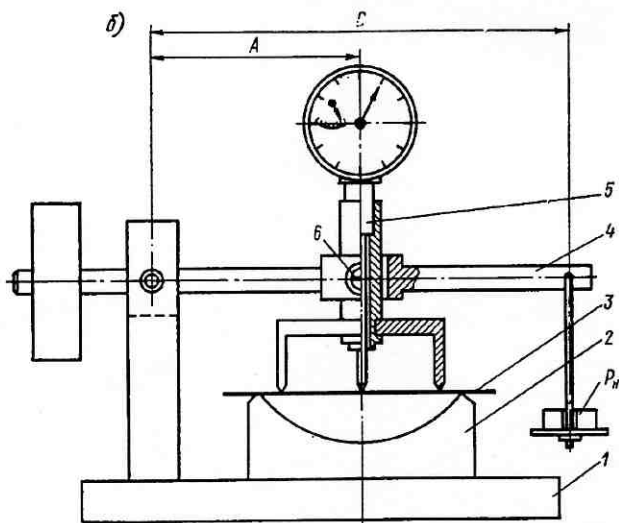
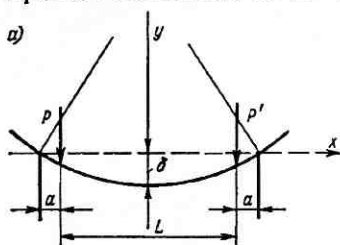


Рис. 111. Схема чистого изгиба испытуемого образца (а); схема установки для исследования жесткости при изгибе (б):

1 — плита; 2 — опоры; 3 — испытуемый образец; 4 — рычаг; 5 — индикатор часового типа; 6 — нажимной элемент

ступают над металлической поверхностью образцов, а величина их превышения зависит от вида обработки и материала полимера. Эти особенности обуславливают специфику контактного взаимодействия поверхностей и, следовательно, влияют на контактную жесткость. Жесткость поверхностей оценивалась коэффициентом контактной жесткости, определяемым отношением нагрузки к величине сближения. В результате было выявлено, что контактная жесткость ПМПП зависит как от материала полимера, так и от

вида механической обработки поверхностей. Поверхности, обработанные вибронакатыванием, имеют больший коэффициент контактной жесткости, чем поверхности, обработанные строганием и фрезерованием.

Третье исследование¹ выполнялось с целью определения зависимости контактной жесткости от параметров выпуклого частично регулярного микрорельефа (в этом случае, образующиеся выступы играют роль микроребер жесткости) [11]. Образцами служили пластины из холоднокатанной стали ОВКП толщиной 0,8 и 1,4 мм, микрорельеф видов I—III создавался холодной прокаткой в вибронакатанных валках. Исследования производились по схеме

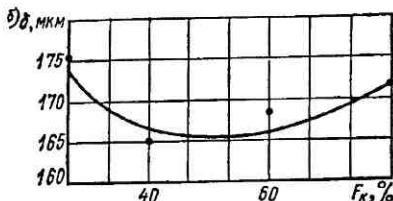
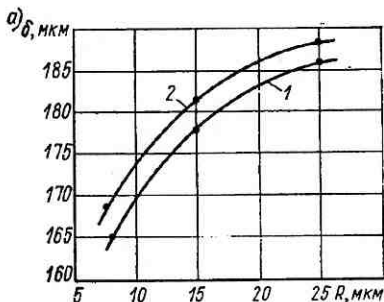


Рис. 112. Зависимость величины прогиба образцов от: а — высоты микроребер R при $F_k = 40\%$; б — от относительной площади F_k при $R = 25$ мкм:
1 — толщина образцов 1,42 мм; 2 — толщина образцов 0,92 мм

чистого изгиба (рис. 111, а) на специальной установке электромагнитного действия (рис. 111, б). Критерием разрушения образца являлось появление трещины, фиксировавшееся по изменению частоты собственных колебаний пластины. База испытаний 10^8 циклов, частота колебаний 50 Гц. Результаты испытаний иллюстрируются графиками (рис. 112).

Статистический анализ результатов исследования и графиков на рис. 112 позволяет сделать следующие выводы:

1) во всех случаях у всех испытывавшихся материалов создание систем выпуклых ребер приводило к повышению жесткости холоднокатаных листов и лент;

2) жесткость существенно зависит от систем ребер: максимальной жесткостью обладали пластины с выпуклым микрорельефом вида III, меньшей пластины с микрорельефом вида II и наименьшей — с микрорельефом вида I; величина прогиба составляла соответственно 178,0, 186,1 и 196,1 мкм, при прогибе исходной холоднокатаной пластины, равном 206,0 мкм;

3) оптимальные значения занимаемой выступами площади (при микрорельефе вида III) были $F_k = 40 \div 45\%$ и высоты выступов $R = 20 \div 25$ мкм;

¹ Выполнено М. В. Джаникашвили.

4) с уменьшением толщины пластин влияние микроребер на повышение жесткости возрастает (см. рис. 111, а);

5) зависимость жесткости от площади, занимаемой микроребрами, нелинейна;

6) объяснение эффекта упрочнения, как следствия создания систем микроребер жесткости подтверждается испытанием пластин в отожженном состоянии; перспективы повышения жесткости холоднокатаных листов и лент при изготовлении, в частности корпусных деталей автомобилей, самолетов и многих других машин и приборов трудно переоценить.

13. Усталостная прочность

Поскольку в основе процесса вибрационного накатывания лежит пластическое деформирование металла в холодном состоянии, необходимо было исследовать его возможности, как способа упрочнения, основанного на сложной кинематике.

Первое исследование¹ было выполнено на стандартных образцах для испытания на усталость диаметром 6 мм из титанового сплава 48-T2, из которого изготавливаются турбинные лопатки; усталостная прочность последних является одним из лимитирующих показателей. Испытанию подвергались образцы, обработанные точением, обкатыванием и вибронакатыванием по 8-му классу шероховатости (на основе предварительных испытаний последующие вельсь на вибронакатанных образцах с микрорельефом вида IV).

Шлифованные образцы обрабатывались кругом ЭБ60СМК, обкатанные — шаром $d_{ш} = 6$ мм при $P = 196$ Н, $s = 0,07$ мм/об, $n_3 = 26,25$ рад/с; вибронакатанные — тем же шаром, при тех же значениях $d_{ш}$, P и s , при $n_{дв.х} = 4200$ 1/мин и $e = 3,5$ мм. Поскольку образцы были маложесткими ($d_a = 6$ мм, $e = 60$ мм), при обработке давлением проверялось изменение их формы с тем, чтобы выявить возможность отделки и упрочнения этим способом маложестких высокоточных деталей. Результаты усталостных испытаний иллюстрируются рис. 113, а (1 — точение; 2 — шлифование; 3 — обкатывание; 4 — вибронакатывание) и следующими данными: предел усталости шлифованных образцов ($\sigma_{-1} = 255$ МПа) в результате обкатывания повысился до 294 МПа, а вибронакатывания — до 334 МПа, т. е. на 20 %. С целью выявления доли влияния на повышение усталостной прочности сжимающих напряжений и микрорельефа образцы одной из серий после вибронакатывания отпускались в аргоне при 650 °С в течение 1,5 ч; предел усталости снизился с 334 до 285 МПа, т. е. на 11 %. Таким образом, было выявлено существенное влияние на усталостную прочность микрорельефа, определяющей характеристикой которого является величина радиуса закругления впадин неровностей,

¹ Выполнено автором совместно с Л. М. Фейгиным и Л. А. Бунгой.

играющих роль концентраторов напряжений. У вибронакатанных образцов величина радиуса r была в сотни раз большей, чем у шлифованных. Зависимость глубины залегания остаточных напряжений от усилия вибронакатывания приведена на рис. 113, б, а от диаметра шара — на рис. 113, в (1 — 8 мм; 2 — 14 мм; 3 — 19 мм; 4 — 22 мм; 5 — 30 мм).

Наименьшая деформация (прогиб) при прочих равных условиях обработки давлением оказалась у вибронакатанных образцов; подтвердилось предположение о возможности значительного упрочнения вибронакатыванием маложестных и малопрочных деталей.

Второе исследование¹ ставило целью выявить

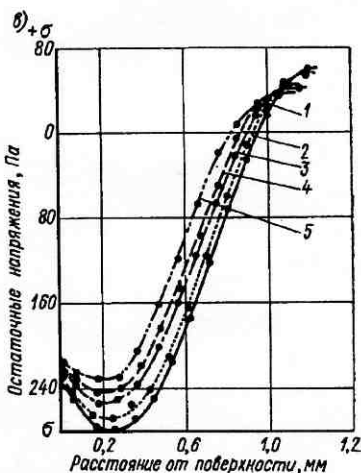
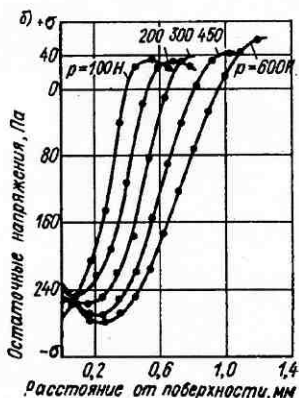
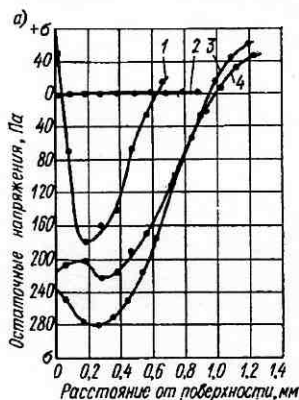


Рис. 113. Графики напряжений, возникающих в поверхностном слое металла (сталь 45)

влияние микрорельефа поверхностей, подвергающихся одновременно изнашиванию (трению) и знакопеременным нагрузкам. Одной из наиболее характерных деталей, работающих в подобных условиях, являются вкладыши коленчатых валов двигателей, дизелей и других машин. Усталостная прочность в значительной мере зависит от состояния поверхности, так как дискретный характер контакта вкладыша с шейкой вала приводит к большим

¹ Выполнено автором совместно с В. Ф. Звягинцевым и Г. Г. Лебединским.

местным механическим и тепловым перегрузкам и, как следствие, к выкрашиванию, разрушению антифрикционного слоя. В этих условиях решающее значение приобретает микрорельеф поверхности трения вкладыша, определяющий ее прирабатываемость, сопротивление образованию поверхностных дефектов и схватыванию, обеспечивающий целостность масляной пленки. Необходимо было установить степень этого влияния и выявить оптимальный микрорельеф. Исследование проводилось на вкладышах из алюминиево-оловянистого сплава А020-1 с диаметром отверстия 75 мм, шириной 44 мм и толщиной 2,5 мм, обработанных тонким раскатыванием шаром, вибронакатыванием, раскатыванием с последующим вибронакатыванием. Испытания проводились на стенде с пульсирующим нагружением (тип СПП-1 конструкции ЦНИДИ) при давлении на вкладыш 69,7 МПа и скорости скольжения 7 м/с. Вкладыши испытывались в паре с валами из стали 45, шейки которых были закалены (т. в. ч.) до твердости HRC 56—58 и шлифовались по 10-му классу шероховатости. Диаметральный зазор между отверстием вкладыша и шейкой составлял 0,08—0,1 мм, смазка маслом ДП-11. Испытанию предшествовала приработка. Давление в процессе приработки поднималось ступенями 0; 25; 50; 75; 100 % от исходного давления 37,96 МПа. Длительность приработки на каждой ступени составляла при работе подшипника без нагрузки 20 тыс. циклов и при последующем ступенчатом нагружении по 45 тыс. циклов. Во время приработки давление и температура в системе смазки поддерживались постоянными, такими же, как во время испытания, равными соответственно 0,30 МПа и 60 °С. По окончании приработки давление поднималось до рабочего и начинался основной цикл испытаний. Появление усталостной трещины вызывало изменение основных измерявшихся в процессе испытаний параметров: температуры в зоне трения, давления в цилиндре, скорости вращения вала. Образование усталостной трещины приводило также к разрыву масляной пленки, что вызывало повышение температуры в зоне трения на 5—6 °С и падение давления в цилиндре за счет увеличения его подпоршневой полости, а также уменьшение скорости вращения вала. Изменение этих параметров позволяло достаточно точно обнаружить начало усталостного разрушения без остановки стенда.

Основные результаты исследования.

1. Во всех случаях вибронакатанные вкладыши по сравнению с расточенными качественнее и быстрее прирабатывались, температура в зоне их трения с валом была на 6—9 °С ниже (табл. 20). Это объясняется увеличенной маслоемкостью вибронакатанных поверхностей всех четырех испытывавшихся видов микрорельефа.

2. Усталостная выносливость существенно зависит от вида микрорельефа и площади, занимаемой канавками при микрорельефах первых трех видов (рис. 114, а), определяющих масло-

емкость поверхности; наилучшим для данных условий трения и воздействия знакопеременных нагрузок оказался микрорельеф вида II.

3. Зависимость между усталостной прочностью и маслостойкостью поверхности с оптимальным микрорельефом вида II нелинейна (рис. 114, б).

4. Решающим фактором, определяющим повышение усталостной прочности в условиях работы пары вкладыш — вал, является не упрочнение, а оптимизация микрорельефа поверхностей трения.

20. Зависимость усталостной прочности и температуры в зоне трения вкладышей с коленчатым валом от способа обработки рабочей поверхности вкладыша

Вид обработки	Вид микрорельефа при вибронакатывании	Класс шероховатости	Усталостная прочность в циклах	Температура, °С
Тонкое растачивание	—	8	1 млн. 173 тыс.	125
Обкатывание	—	11—12	1 млн. 800 тыс.	114
Обкатывание + вибронакатывание	IV	10	1 млн. 950 тыс.	125
Вибронакатывание	IV	11	3 млн. 050 тыс.	117
Обкатывание + вибронакатывание	$R_k=45 \div 48\%$	11	5 млн. 100 тыс.	112

Во всех случаях оптимизация микрорельефа приводила к заметному снижению температуры в зоне трения и стабилизации температурного поля (табл. 20).

Третье исследование¹ выполнялось на кольцах подшипников качения и сферических подшипников скольжения [8] для выявления влияния регулярного микрорельефа на усталостную прочность и износостойкость. На усталостную прочность испытывались две партии роликовых подшипников 32612, внутренние кольца которых обрабатывались по типовой технологии ГПЗ-3 и вибронакатыванием с образованием частично регулярного микрорельефа различных видов и регулярного микрорельефа с различной степенью упрочнения. Результаты испытаний выявили, что наибольшей долговечностью обладают кольца с регулярным микрорельефом вида IV. Повышение долговечности по сравнению с шлифованными по типовой технологии составляло в среднем 150—180 %, а в отдельных случаях достигало 440 % без разрушения колец. Столь значительный эффект повышения долговечности может быть объяснен в первую очередь оптимизацией микрорельефа, что обеспечило улучшение условий

¹ Выполнено Л. В. Басковым и А. Н. Кравцовым.

подачи и удержание смазки в зоне контакта поверхностей колец и роликов, в сочетании с улучшением физико-механических свойств.

В качестве критериев оценки основных физико-механических свойств поверхностного слоя рассматривались: количество остаточного аустенита, величина тетрагональности мартенсита, когерентного рассеяния, величина напряжений второго рода и плотности дислокаций. В результате исследования было установлено, что по мере увеличения усилия вибронакатывания количество остаточного аустенита уменьшается, а величина тетрагональности



Рис. 114. Зависимость усталостной прочности вкладышей от способа обработки и вида регулярного микрорельефа (а) и от площади F_n (б), занимаемой вибронакатанными канавками

изменяется незначительно. Размер блоков когерентного рассеяния при сравнении шлифованных и вибронакатанных колец уменьшается с увеличением усилия вибронакатывания. Чем крупнее блоки в поверхностном слое шлифованных колец, тем значительнее различие в величине их до и после вибронакатывания. По мере увеличения усилия вибронакатывания наблюдается повышение плотности дислокаций и незначительное изменение напряжений второго рода; это явление наблюдается лишь в тончайшем поверхностном слое металла.

Общие выводы сводятся к следующему:

1) при оптимальном режиме и условиях вибронакатывания колец роликовых подшипников создаются намного более совершенный, чем при шлифовании микрорельеф и физико-механические свойства поверхностного слоя металла;

2) создаваемый вибронакатыванием регулярный микрорельеф в основном определяет значительное повышение долговечности колец роликовых подшипников, способствует улучшению физико-механических свойств поверхностного слоя металла.

Четвертое исследование¹ в отличие от трех предыдущих проводилось на образцах с выпуклым частично регу-

¹ Выполнено автором совместно с М. В. Джаникашвили.

лярным микрорельефом [8], холоднокатаных в вибронкатанных валках. Предел усталости образцов, прокатанных в обточенных валках (шероховатость поверхности листа 7а класса), в шлифованных валках (7а класс), в вибронкатанных валках (6а класс вида IV), после рекристаллизационного отпуска снизился соответственно на 23; 19 и 9,6 %. Таким образом, предел усталости образцов, прокатанных в вибронкатанных валках существенно выше, чем у более гладких образцов, прокатанных в шлифованных и обточенных валках.

14. Коррозионная стойкость

Два конкурирующих фактора воздействуют на сопротивление коррозии поверхностей, обработанных давлением. С одной стороны, происходит сглаживание неровностей исходной поверхности и образование микрорельефа с впадинами, радиус которых значительно больше, чем у обработанных любым способом резания, что определяет меньшую концентрацию в них продуктов, вызывающих коррозию; в результате коррозионная стойкость повышается. С другой стороны, неоднородный характер пластической деформации приводит к возникновению разности потенциалов между неодинаково деформированными кристаллами, т. е. к образованию множества гальванических пар, являющихся причиной коррозии, и коррозионная стойкость снижается.

Как показали результаты наших исследований, подтвержденные практикой эксплуатации деталей, обработанных давлением, при правильном ведении процесса холодного пластического деформирования, можно не только избежать снижения коррозионной стойкости, но даже заметно ее повысить.

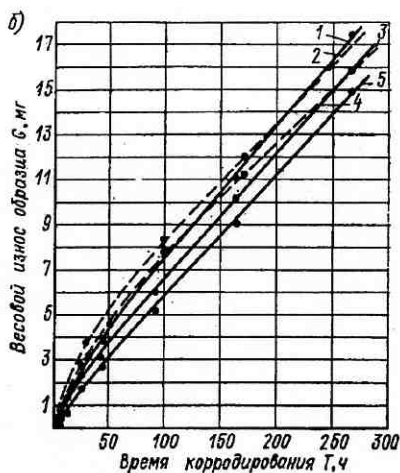
На рис. 115, а показан типовой, а на рис. 115, б — экспериментальной графики зависимости коррозионной стойкости от усилия обкатывания и соответственно наклепа. Как видно из рис. 115, а, коррозионная стойкость повышается с увеличением усилия обкатывания или вибронкатывания (при образовании микрорельефа вида IV) и соответственно степени сглаживания неровностей исходной поверхности лишь до определенного значения (точка А). Эта оптимальная в отношении коррозионной стойкости величина усилия соответствует при обкатывании моменту заполнения впадин исходного микрорельефа металлом выступов (примерно 9-му классу шероховатости), а при вибронкатывании — переходу от микрорельефа вида III к виду IV, когда в первом случае поверхность становится достаточно гладкой, а во втором — образуется новый микрорельеф, но наклеп относительно мал. Положительное влияние сглаживания и образования микрорельефа поверхности с пологими большого радиуса впадинами сильнее, чем отрицательное влияние наклепа. Дальнейшее увеличение усилия обкатывания и вибронкатывания, даже в том случае, если шероховатость поверхности несколько улучшается,

приводит к резкому увеличению степени наклепа и снижению коррозионной стойкости.

Первое исследование, выполненное автором (рис. 115, б), показало, что коррозионная стойкость обкатанных образцов ($P = 600$ Н, 8-й класс шероховатости) в условиях корродирования в морской воде оказалась более высокой, чем у шлифованных (8-й класс), вибронакатанных ($P = 600$ Н, 6-й класс и $P = 108$ Н, 8-й класс) и обточенных (7-й класс).



Рис. 115. Типовой график зависимости коррозионной стойкости от наклепа при обкатывании и вибронакатывании (а); график зависимости коррозионной стойкости (б): 1 — точение; 2 — вибронакатывание ($P = 600$ Н); 3 — вибронакатывание ($P = 100$ Н); 4 — шлифование; 5 — обкатывание ($P = 600$ Н)



В данном случае решающим фактором при приблизительно одинаковой степени наклепа оказалась величина радиуса закругления впадин микронеровностей — наибольшая у обкатанных, несколько меньшая у вибронакатанных и значительно меньшая у обточенных и шлифованных поверхностей.

Влияние радиуса впадин микрорельефа на коррозионную стойкость особенно проявилось при испытании на воздухе стальных образцов (сталь 30) с участками, обработанными точением (5-й класс шероховатости) и вибронакатыванием (5 и 6-й классы). Как видно из рис. 116, обточенные участки за четыре месяца вылеживания интенсивно корродировали (первые следы коррозии появились на 5—6-й день после обработки). Первые очаги коррозии на вибронакатанных участках образцов появились лишь через пять месяцев с момента обработки.

Второе исследование¹ [11] ставило целью сопоставление коррозионной стойкости образцов после различной механической обработки. Для этого пара образцов из стали

¹ Выполнено О. С. Панковым и Л. В. Курбановой.

1X18H9T ($d_3 = 10$ мм; $l = 40$ мм) помещалась в электролит и регистрировалась зависимость от длительности пребывания в нем тока коррозии, идущего через сопротивление, соединяющее образцы. В качестве эталонных использовались образцы, обработанные только точением.

Зависимость токов коррозии от времени пребывания в электролите показана на рис. 117. Положительный знак приписывается току коррозии, когда исследуемый образец имеет более высокий потенциал и, следовательно, корродирует менее интенсивно,

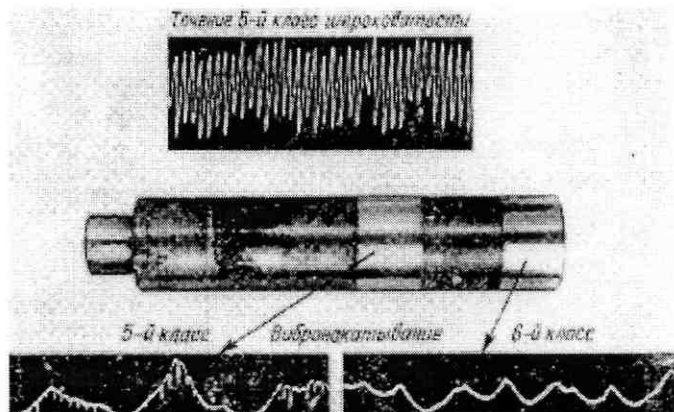


Рис. 116. Образец (сталь 45) с участками, обработанными точением и виброобкатыванием после испытания на коррозию

чем эталонный. Ток коррозии равен нулю, когда электродные потенциалы и коррозионная стойкость образцов одинаковы. На рис. 117 можно выделить две группы кривых. Первую составляют образцы, не подвергнутые предварительному шлифованию. Токарная обработка этих образцов создает, по-видимому, столь хаотичный микрорельеф поверхности и столь сильную деформацию, что последующее обкатывание существенно не меняет состояния поверхности. Токи коррозии малы и не меняются во времени. При увеличении усилия обкатывания от 150 до 500 Н ток возрастает, что свидетельствует об уменьшении коррозионной стойкости с увеличением усилия обкатывания.

Вторую группу составляют предварительно шлифованные образцы. Для них характерно, что в первые 30 мин интенсивность коррозии резко замедлена по сравнению с эталонным образцом. Затем скорость коррозии увеличивается и после максимума сближается со скоростью коррозии эталона. Такой вид кривых можно объяснить тем, что шлифование сглаживает микрорельеф, создает

более равномерный наклеп на поверхности образца по сравнению с обточенными, а поэтому в начальные моменты коррозии большую активность проявляют обточенные образцы. По мере растворения выступов микрорельефа и образования на поверхности образцов продуктов взаимодействия со средой коррозия исследуемых образцов усиливается, и основное влияние на ее течение оказывает величина наклепа. По мере растворения наклепанных участков поверхности токи коррозии уменьшаются и через 200 мин становятся близкими к нулю. Таким образом, можно сделать вывод, что наклеп оказывает более значительное влияние на коррозионную

стойкость, чем микрорельеф поверхности. Влияние микрорельефа преобладает лишь в начальные моменты коррозии (в нашем эксперименте не более 30 мин). Анализ кривых на рис. 117 показывает, что вибрационное накатывание несколько уменьшает коррозионную стойкость стали 1X18H9T по сравнению с гладким обкатыванием, а увеличение усилия обкатывания во всех случаях снижает коррозионную стойкость. Последующие исследования также по-

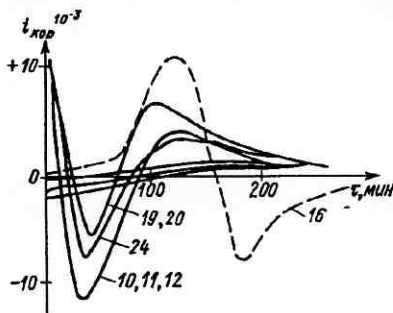


Рис. 117. Зависимость тока коррозии от длительности испытания

казали, что эффект оптимизации микрогеометрии при образовании регулярных микрорельефов имеет место лишь при условии минимального наклепа поверхностного слоя металла.

Таким образом, если учесть, что основная масса поверхностей деталей машин и приборов обрабатывается с шероховатостью в пределах 9-го класса, то можно производить обработку давлением деталей, работающих в условиях воздействия коррозии при минимальных давлениях, не опасаясь снижения коррозионной стойкости.

15. Герметичность

Основное требование, предъявляемое к уплотнительным парам гидросистем, — герметичность (гидроплотность). Задача улучшения герметичности уплотнительных узлов при непрерывно повышающихся давлениях в гидросистемах до последнего времени решалась главным образом за счет улучшения качества резины втулок и манжет и увеличения степени гладкости рабочих поверхностей металлических контртел. Однако, несмотря на определенные успехи в области рецептурных изысканий для резины и доведение гладкости рабочих поверхностей металлических втулок и штоков до 9—11-го классов шероховатости, во многих случаях герме-

тичность оказывается недостаточной. Поэтому были проведены исследования для выявления возможности улучшения герметичности уплотнительных пар за счет оптимизации микрорельефа рабочих поверхностей металлических деталей.

Первое исследование¹ проводилось на тех же уплотнительных парах резина — металл с вращательным и возвратно-поступательным движением, которые исследовались на износостойкость. Уплотнительные пары вращательного движения монтировались на испытательном стенде из резиновых манжет типа УМА и стальных закаленных подманжетных втулок (HRC 50), шлифованных по 9-му классу шероховатости с последующим хромированием, а также вибронакатанных с различными микрорельефами вида IV, образованными при режимах, приведенных в табл. 14. Усилие пружин в манжетах составляло 11,0—12,0 Н. В испытательную камеру подавалось масло индустриальное 45 под давлением 0,4 МПа. Подманжетные втулки прирабатывались на стенде в течение 40 ч; стендовые испытания длились 160 ч при восьмичасовой сменности. Герметичность характеризовалась величиной утечек масла через уплотнения.

Сколь существенно влияние микрорельефа рабочей поверхности металлического контртела на гидроплотность и износостойкость соединения, можно видеть из рис. 118 и сопоставления данных табл. 15. Объем утечки смазки в зависимости от микрорельефа вибронакатанных подманжетных втулок изменялся от 39 до 310,5 см³, однако во всех случаях был меньше, чем у пар со шлифованной и хромированной втулками ($V = 337,5$ см³). При этом была выявлена несостоятельность практики нормирования лишь высоты неровностей рабочих поверхностей металлического контртела. Несравнимо большее значение имеет форма микрорельефа и их расположение. Пары со шлифованными по 9-му классу шероховатости втулками были наименее герметичными ($V = 337,5$ см³), в то время как вибронакатанные по 6-му классу обеспечили наилучшую герметичность ($V = 39$ см³). Характерно,

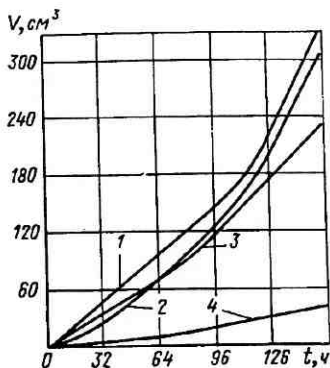


Рис. 118. Зависимость величины накопленных утечек V от длительности t испытаний уплотнительной пары вращательного движения; подманжетные втулки обработаны:

1 — шлифованная; 2 — вибронакатыванием (втулки № 26 и 33 — см. табл. 15); 3 — вибронакатыванием (втулки № 36 и 24); 4 — вибронакатыванием (втулки № 23 и 27)

¹ Выполнено автором совместно с Г. А. Бунгой, А. Л. Рейнусом и А. И. Ерченковым.

что пары с наилучшей герметичностью оказались и наиболее износостойкими (табл. 9). По-видимому, образующийся при вибронакатывании микрорельеф, с неровностями относительно большой высоты ($R = 10$ мкм) по сравнению со шлифованием ($Ra = 1,88$ мкм), пологой их формой ($r = 2580$ мкм, при шлифовании $r = 39,4$ мкм) и большим шагом ($S = 0,712$ мм, при шлифовании $S = 0,021$ мм), благоприятен не только в отношении сопротивления износу, но и обеспечения герметичности. В этом случае резина «затекает» во впадины микрорельефа, заполняя его и предотвращая тем самым протекание масла. Немаловажное значение имеет и лабиринтный характер взаиморасположения выступов и впадин поверхности, образующейся при вибронакатывании.

Второе исследование показало весьма близкие к данным результаты герметичности резино-металлических пар возвратно-поступательного движения в зависимости от микрорельефа рабочей поверхности металлического штока. Герметичность, обеспечиваемая резиновой манжетой при работе по вибронакатанному участку штока 5-го класса шероховатости (скорость возвратно-поступательного движения штока 5 м/мин), оказалась более высокой, чем при работе манжеты по шлифованному участку, шероховатость поверхности которого была на два класса выше (7-й класс).

Третье исследование¹ [8] показало, что жидкостный режим трения рабочих поверхностей цилиндра и поршня гидравлических машин за счет гидродинамических явлений затруднен из-за того, что после периода приработки контактные поверхности становятся эквидистантными. В результате износа на поршне образуется конусная часть, а форма цилиндра искажается локально, в виде двух диагонально расположенных «языков». Режим трения — смешанный с преобладанием граничной составляющей.

Исследование также показало, что эффективным методом улучшения условий смазки поверхностей является нанесение на одну из них системы каналов.

Испытания, выполненные на машине СМЦ-2, подтвердили полученные теоретические соотношения, при этом при помощи термомпар было обнаружено наличие градиента температуры на поверхности между микроканалами в направлении скольжения, вызывающего термическую объемную деформацию материала трущихся поверхностей. Износ рабочих поверхностей поршневой пары снизился на 25—30 % при улучшении показателей герметичности.

Исследования контактного взаимодействия сопряжения манжеты с валом показали, что оно характеризуется толщиной разделительной смазочной пленки, гидрплотностью, коэффициентом

¹ Выполнено Г. И. Синяковым, Е. А. Пикусом и Ю. Н. Тюриным.

том трения и температурой рабочей кромки манжеты. Проверка теоретических формул была проведена с одновременной регистрацией на осциллографической пленке скорости скольжения, силы трения, температуры масла и рабочей кромки манжеты, толщины смазочной пленки в диапазонах скоростей 0,1—20 м/с, контактных давлений (0,3—2,0 МПа), температур рабочей кромки (80—160 °С).

Контакт манжеты с вибронакатанным валом характеризуется во всем диапазоне скоростей и давлений образованием стабильной разделительной смазочной пленки и циркуляцией масла в зазоре, уменьшенной тепловой и механической напряженностью, отсутствием крутильных колебаний рабочей кромки.

Ресурсные и промышленные испытания таких уплотнительных узлов показали повышение ресурса в 1,5—4 раза в зависимости от избыточного давления среды. По результатам исследований и на основании опыта внедрения разработаны РТМ 12.44.009—75 «Оборудование угольное. Поверхности контактирующие с манжетными уплотнениями. Требование к микрогеометрии и технология обработки». Значительное повышение износостойкости гидроцилиндров и работающих в паре с ним резиновых колец выявлено также исследованиями¹ [8].

Таким образом, оптимизация микрорельефа рабочих поверхностей металлических деталей гидроуплотнительных пар является радикальным средством повышения их герметичности.

16. Прочность неподвижных соединений

Качество неподвижных соединений в значительной мере определяется микрорельефом поверхностей, по которым производится сопряжение. С увеличением радиуса закругления выступов и однородности неровностей вибронакатанных поверхностей по сравнению с обточенными и шлифованными при одинаковых натягах прочность (сопротивление распрессовке) значительно повышается; снижение натяга при повторных запрессовках также намного

21. Прочность неподвижных соединений при различных способах обработки сопрягаемых деталей

Способ обработки посадочных поверхностей	Усилие распрессовки $P_{в}$, Н	Сравнительная прочность в момент сдвига, %	Сравнительная прочность при установившемся смещении
Гладкое обкатывание	33 600	100	100
Шлифование	61 200	182	164
Вибронакатывание	81 000	240	590

¹ Выполнено А. В. Масловым и М. Ю. Голубевым.

меньше. Кроме того, при соединении деталей по поверхностям с регулярным микрорельефом с неровностями «обтекаемой» формы появляется возможность осуществления значительно больших, чем обычно, натягов, так как резко снижается режущая способность заостренных микровыступов. Во всех случаях наилучшие результаты были получены при соединении вибронакатанных деталей с микрорельефом вида IV.

Первое исследование¹ [8] показало, что в промышленности методы обработки поверхностей деталей неподвижных соединений (тонкое точение, шлифование, обкатывание) не

позволяют создать микрорельеф, даже близкий к оптимальному, и лишь вибронакатыванием соединяемых деталей удается существенно повысить прочность неподвижных соединений (табл. 21).

Столь существенный эффект, как показали исследования, объясняется тем, что наибольшей прочностью при прочих равных условиях обладают соединения с одинаковой высотой и формой неровностей и с одинаковым (или кратным) их шагом (рис. 119). Благоприятной в этом отношении особенностью вибронакатанных поверхностей является равноосность образуемых неровностей

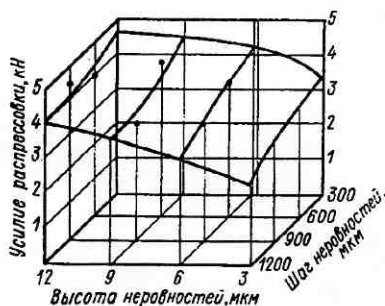


Рис. 119. Зависимость усилия распрессовки неподвижных соединений, собранных с нагревом охватывающей детали, от шага и высоты неровностей втулки и вала

одинаковой высоты как в продольном, так и в поперечном направлениях, что при их регулярности обуславливает меньшую анизотропию коэффициента трения при продольных и круговых смещениях деталей неподвижных соединений. Так, известно, что отношение коэффициента трения при продольном $f_{пр}$ и круговом $f_{кр}$ смещении в большинстве случаев изменяется в пределах $f_{пр}/f_{кр} = 1 \div 3$; у соединений с вибронакатанными деталями это отношение значительно меньше — $f_{пр}/f_{кр} = 0,8 \div 1,3$.

Особенности регулярного микрорельефа проявляются и при распрессовке неподвижных соединений (рис. 120). Если у соединений деталей, обработанных шлифованием и гладким обкатыванием, момент начала смещения вала относительно втулки четко фиксируется и характеризуется резким снижением силы трения (в 2—2,5 раза), то у соединений с регулярным микрорельефом этот скачок отсутствует при значительно больших усилиях распрессовки.

¹ Выполнено В. А. Забродным.

Второе исследование¹ [8] ставило целью изучение возможности повышения прочности конических соединений. Такие соединения, например в гидропередачах для тепловозов (конусность 1 : 50, интервал диаметров — 35—170 мм), передают крутящие моменты $M_{кр} = 1000 \div 60\,000$ Дж.

Экспериментально был выявлен, как оптимальный для такого соединения частично регулярный микрорельеф вида III ($F_k = 40 \div 45\%$). После тепловой сборки штифтового соединения, испытания показали, что прочность повысилась на 25 % по сравнению с соединениями со шлифованными штифтами; окружающие напряжения от маслосъема уменьшились в два раза.

Третье исследование² связано с применением вибронакатывания взамен развертывания отверстий под развальцовку труб взрывом. Плотность вальцовочных соединений труб с трубными досками теплообменных аппаратов является основным критерием их качества. При одинаковой степени развальцовки (натяге)

плотность соединений существенно зависит от микрорельефа рабочих поверхностей сопрягаемых деталей. Однако применявшиеся до сих пор способы обработки сопрягаемых поверхностей (расточка, развертывание) практически не давали возможности варьировать микрорельеф, а потому и изучить влияние его на плотность соединений.

Исследование проводилось на образцах труб размером 16×1 мм из мельхиора и трубных досок из стали Ст3 толщиной 27 мм. Рабочие поверхности отверстий образцов были обработаны развертыванием и вибронакатыванием по режимам, приведенным в табл. 22. Развальцовка осуществлялась взрывным способом. В трубу вдоль отверстия помещался линейный заряд: при взрыве образовывалось высокое давление, под действием которого стенки трубы раздавались в радиальном направлении, образуя плотное соединение с трубной доской. В качестве заряда применялся детонирующий шнур ДШ-А, а передающей средой между зарядом и стенками трубы служила резина.

Плотность соединений оценивалась по результатам гидравлических испытаний.

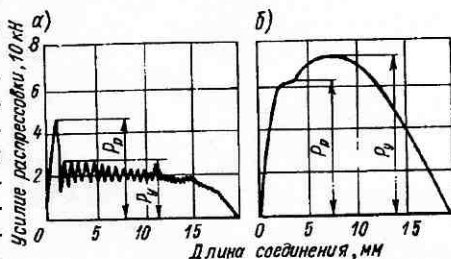


Рис. 120. Диаграммы изменений сил трения в процессе распрессовки деталей: а — шлифованных; б — вибронакатанных

¹ Выполнено Э. В. Рыжовым, А. Г. Сусловым, Н. Ф. Хмарой.

² А. с. № 318744.

Анализ результатов испытаний (табл. 22) позволяет сделать следующие выводы:

1) плотность вальцовочных соединений существенно зависит от способа и режима обработки даже одной из сопрягаемых поверхностей (в данном случае отверстия);

2) при прочих равных условиях (степень развальцовки, начальный зазор, сила взрыва, шероховатость сопрягаемых поверхностей) за счет оптимизации микрорельефа отверстия трубной доски вибронакатыванием плотность соединения может быть повышена по сравнению с соединениями с досками, отверстия в ко-

22. Плотность вальцовочных соединений при различных способах и режимах обработки одной из сопрягаемых поверхностей ($n_{дв. х} = 1400$ 1/мин, $d_{ш} = 4$ мм, $P = 294$ Н, степень развальцовки — 1,2—1,4)

Класс шероховатости	n , рад/с	s , мм/об	r , мм	Вид микрорельефа	Плотность вальцовочных соединений, МПа
—	8,32	0,61	1,0	I	0,5
—	2,60	0,61	1,0	II	1,0
5	6,55	0,43	0,5	IV	2,0
5	2,60	0,43	1,0	IV	3,0
6	2,60	0,21	1,0	IV	4,5
6	1,30	0,61	1,0	IV	5,0

торых развернуты, в три раза и более (плотность 1,5 МПа — максимальная, достигаемая в соединениях с трубами с развернутыми отверстиями);

3) наилучший в отношении обеспечиваемой прочности микрорельеф — вида IV. По-видимому, решающими в данном случае факторами являются благоприятная форма микронеровностей (большие радиусы закругления выступов и впадин), высокая степень их однородности по высоте и форме, сетчато-шахматное расположение. Все это облегчает взаимопроникновение металла трубы и трубной доски.

Таким образом, оптимизация и регуляризация микрорельефа сопрягаемых поверхностей неподвижных соединений так же, как и подвижных, — серьезный резерв повышения их качества и совершенствования технологии изготовления.

Четвертое исследование¹ связано с вибронакатыванием поверхности металлической детали под заливку или напрессовывание на нее резины, с образованием оптимальной системы канавок (вид II микрорельефа) взамен ранее производившейся грубой обработки растачиванием (2-й класс шероховатости) или нарезания резьбы, предназначенной для предотвращения

¹ Выполнено автором совместно с В. Л. Шульманом.

смещения резинового кольца относительно металлического корпуса — втулки. Такие соединения используются в судостроении при изготовлении резино-металлических подшипников (рис. 121, а). Однако эти соединения не гарантируют достаточной прочности, так как при растачивании глубина канавок оказывается недостаточной, а при нарезании направление резьбы практически совпадает с направлением действия сил, сдвигающих резину относительно стального корпуса.

Для увеличения прочности соединения резины с металлом внутренняя поверхность стального корпуса обрабатывалась вибронакатыванием с образованием микрорельефа вида II (рис. 121, б) шаром диаметром 4 мм, вдавливающимся с усилием 650 Н; глубина выдавливаемых канавок составляла 0,04 мм.

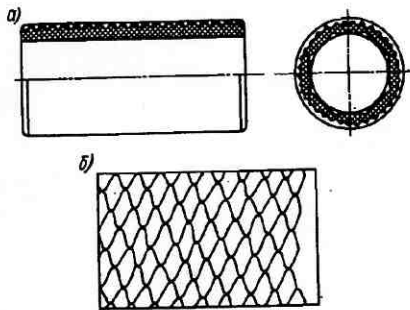


Рис. 121. Схемы резино-металлического подшипника (а); оптимальное расположение вибронакатанных канавок на внутренней поверхности стального корпуса под заливку резиной (б)

Сравнительному исследованию на прочность подвергались резино-металлические подшипники (корпус $\varnothing 60$ мм из стали Ст3, резина серийная марки 1626) с корпусами, обработанными под резину: 1) растачиванием по 2-му классу шероховатости; 2) нарезанием резьбы с шагом 1 мм, глубиной нарезки 0,5 мм; 3) вибронакатыванием. Технологический процесс

изготовления резино-металлических подшипников (подготовка — обезжиривание и латунирование перед заливкой, заливка и вулканизация) соответствовал регламенту № 2547 Ленинградского завода РТИ. Испытания производились на разрывной машине РМИ-250, для чего подшипники разрезались на кольца шириной 10 мм, которые, в свою очередь, разрезались на секторы.

Результаты испытаний таковы: из 18 испытывавшихся образцов с грубо расточенной поверхностью под резину лишь два разорвались по резине, остальные — по месту стыка; у образцов с резьбой все разорвалось по месту стыка, а у вибронакатанных разорвались по резине 11 образцов. Прочность крепления резины к металлу у вибронакатанных образцов оказалась минимум на 25 % выше, чем у обработанных точением и резьбонарезанием. Повышение прочности объясняется благоприятным расположением канавок относительно направления действия сил, сдвигающих резину¹.

¹ Выполнено автором совместно с В. Г. Степановым, Г. Г. Лебединским и И. А. Шавровым.

17. Свойства монокристаллов

Для исключения эффектов, связанных с поликристаллическостью обрабатываемого материала, были проведены исследования¹ [8], направленные на обнаружение указанной связи на монокристаллах Al и W с различными выведенными гранями (111), (110), (100). Контроль влияния пластической деформации на монокристалличность поверхностного слоя металлов осуществлялся рентгеноструктурным анализом путем снятия лауэграмм на установке типа УРС-50. Во всех случаях была обнаружена четкая зависимость монокристалличности поверхностного слоя от материала, степени деформации и плотности упаковки выведенной грани. Анализ лауэграмм позволил выявить, что для грани (111) W поликристаллизация поверхностного слоя начинается с $P \geq 50$ Н ($d_{ш} = 4$ мм), а для других граней — при больших усилиях. Влияние степени пластической деформации на свойства монокристаллов определялось по следующим характеристикам: монокристалличность, величина вторичной эмиссии и работа выхода.

Основные выводы поискового исследования сводятся к следующему.

1. Монокристаллы весьма чувствительны к холодной пластической деформации, что должно учитываться при проектировании технологических процессов их механической обработки. В первую очередь это относится к сохранению монокристалличности; так, при вибронакатывании монокристалла вольфрама шаром диаметром 4 мм ($n_s = 7,2$ рад/с; $s = 0,097$ мм/об; $l = 0,5$ мм) увеличение давления шара сверх $P = 50$ Н приводило к нарушению монокристалличности и даже к аморфизации поверхностного слоя. Превышение определенной, четко выраженной для монокристалла данного материала степени пластической деформации приводило также к увеличению неоднородности вольт-электронных свойств поверхности монокристалла.

2. Коэффициент σ , характеризующий вторичную эмиссию, имеет тем меньшее значение, чем выше степень пластической деформации. С увеличением энергии электронов влияние пластической деформации уменьшается. Различие значений σ между недеформированными и вибронакатанными образцами монокристалла вольфрама составляет 0,1 при энергии первичных электронов, равной 300—400 эВ, и уменьшается до значения, равного 0,03 при энергии 900 эВ.

3. Работа выхода ($e\phi$) участка вибронакатанного с давлением шара 50 Н не отличается от работы выхода недеформированного участка; при вибронакатывании с давлением 100 Н работа выхода на 0,3 меньше.

¹ Выполнены автором совместно с Т. Я. Рябовой, А. А. Майоровым, Г. Н. Богдановым, В. Н. Кузьмищевым, Г. С. Бурхановым.

Применению методов обработки монокристаллов должна предшествовать экспериментальная отработка режима и выявление оптимальных значений его параметров. Выявленные зависимости многих эксплуатационных характеристик поликристаллических материалов от микрогеометрии, по-видимому, справедливы и для монокристаллов. В настоящее время уже начата проверка этого положения.

18. Оптические свойства

Поскольку абсолютно гладких поверхностей в природе не существует, а наличие неровностей существенно влияет на харак-

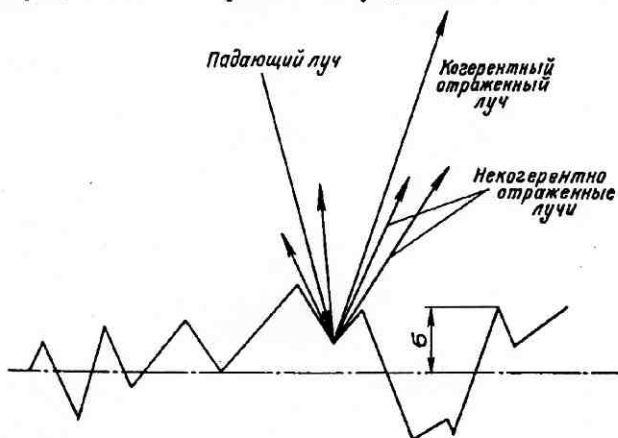


Рис. 122. Схема отражения света от шероховатой металлической поверхности

тер отражения от них колебаний, это влияние необходимо практически учитывать во всех случаях.

На рис. 122 показана схема отражения света от шероховатой металлической поверхности. Часть падающего пучка отражается в направлении зеркального отражения, остальная часть диффузно рассеивается вокруг этого направления. Доля рассеиваемой части падающего пучка зависит от соотношения между высотой неровностей отражающей поверхности и длиной волны.

Если неровности велики по сравнению с длиной волны, то они играют роль маленьких зеркал, отражающих свет в различных направлениях. Результирующее распределение интенсивности определяется законами геометрической оптики, и весь отраженный свет некогерентен по фазе. Вследствие многократных отражений от неровностей полное отражение может быть меньше, чем при отражении от абсолютно гладкой или высокогладкой поверхности того же материала. Если неровности сравнимы по величине с длиной волны, вступают в действие дифракционные

эффекты. В этом случае картина отражения уже не может быть описана законами геометрической оптики, и точное решение может быть дано лишь для некоторых специальных случаев, причем при условии знания геометрических параметров качества поверхности, определяющих форму неровностей.

Если неровности поверхности весьма малы по сравнению с длиной волны, то их форма не влияет на наблюдаемое зеркальное отражение, значение имеет лишь высота выступов и глубина впадин относительно среднего уровня σ (рис. 122).

Отсутствие до сих пор возможности создания поверхностей, форма неровностей которых при одинаковой их высоте варьировалась бы в значительных пределах, не позволяло с достаточной точностью выявить зависимости между формой неровностей отражающих поверхностей и их отражательной способностью. Эта зависимость была выявлена при работе оптических квантовых генераторов с обычно применяемым диффузно рассеивающим отражателем, представляющим собой систему из двух коаксиальных стеклянных круговых цилиндров, зазор между которыми заполнен порошком магнезии, и отражателем, на рабочей поверхности которого способом вибронакатывания был создан регулярный микрорельеф вида IV (см. рис. 78).

В различных оптических квантовых генераторах необходимо обеспечение равномерного распределения их выходного излучения по сечению пучка, т. е. равномерности излучения. Это может быть достигнуто лишь при равномерном распределении излучения лампы накачки по поверхности активного элемента. В этом отношении диффузно рассеивающие отражатели несовершенны, так как хаотическое расположение неоднородных по размерам и форме гранул порошка снижает равномерность накачки по сечению и тем более по длине. Кроме того, это не дает возможности получить заранее заданное распределение излучения накачки по длине и удовлетворительную воспроизводимость результатов при замене отражателя, а также произвести аналитический расчет характеристик системы накачки. Создание отражателей с регулярным микрорельефом, отличающимся высокой степенью однородности формы, размеров и взаиморасположения выступов и впадин, открывает новые возможности, в частности, в отношении оптимизации микрорельефа и изменения его по заданному закону, обеспечивающему равномерную накачку активного элемента. Так, при режиме вибронакатывания ($n_{\text{дв. х}} = 1400$ 1/мин; $s = -0,3$ мм/об; $e = 1$ мм; $d_{\text{ш}} = 8$ мм; $P = 200$ Н) на внутренней цилиндрической поверхности отражателя диаметром 38 мм был создан регулярный микрорельеф вида IV с микронеровностями, высота и шаг которых соизмеримы с длиной волны излучения оптического квантового генератора. При таком микрорельефе равномерность накачки повысилась на 20 %. Результаты исследований нельзя считать предельными в отношении эффекта повышения равномерности накачки. Большие возможности улучшения отра-

жательной способности отражающих поверхностей за счет оптимизации и регуляризации их микрорельефа несомненны. Это было показано автором ранее при обкатывании шаром большого диаметра металлических поверхностей¹ [16].

Как показали теоретические и экспериментальные исследования², особенности и достоинства поверхностей с регулярным микрорельефом могут быть эффективно использованы для построения методик аналитических расчетов оптических характеристик, например таких, как расчет индикатрисы рассеяния светового потока от поверхности с регулярным микрорельефом. Решение задачи рассеяния плоской волны света на достаточно периодически расположенных неровностях (см. рис. 78) предложено акад. П. М. Бреховских на основе метода касательной плоскости. Суть метода заключается в том, что поле в каждой точке поверхности принимается таким же, как если бы отражение в ней происходило от бесконечной плоскости, касательной к поверхности в данной точке. Дифрагированная неровностями волна в плоскости падения представляет собой совокупность дифракционных максимумов, угловое положение которых определяется из выражения

$$\cos \psi_m = \cos \psi_0 + m \frac{\lambda}{S}, \quad (122)$$

где ψ_m — угол скольжения спектра m -го порядка; ψ_0 — угол скольжения падающей волны; λ — длина падающей волны; S — длина волны неровностей рассеивающей поверхности (шаг неровностей по вершинам).

Угловая зависимость амплитуды дифракционных максимумов в плоскости падения для синусоидальной рассеивающей поверхности определяется выражением

$$A(\psi_m) = \frac{1 - \cos(\psi_m + \psi_0)}{\sin \psi_m + \sin \psi_0} I_m(t), \quad (123)$$

где $t = kR \max(\sin \psi_m + \sin \psi_0)$; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; $R \max$ — высота неровностей рассеивающей поверхности; $I_m(t)$ — функция Бесселя порядка m .

Моделируя профиль поверхности с регулярным микрорельефом синусоидой с амплитудой $0,5R \max$ и периодом S , по формулам (122), (123), можно рассчитывать индикатрису рассеяния падающей волны. На рис. 123 приведены экспериментальные 1 и расчетные 2 индикатрисы рассеяния, которые показывают хорошую сходимость теории и эксперимента и, таким образом, доказывают применимость метода касательной плоскости для поверхностей с регулярным микрорельефом. Это можно использовать при расчете различного вида экранов, поверхностей рефлекторов и других рассеивающих поверхностей деталей и технических

¹ А. с. № 175365.

² Выполнены В. И. Сорокиным.

устройств. Еще одно возможное и, по-видимому, весьма перспективное применение способа образования регулярных микрорельефов вибронакатыванием — создание растров на поверхностях оптических деталей.

Растры, в отличие от решеток, состоящих из прозрачных и непрозрачных линий, представляют собой довольно сложные конструкции, образованные миниатюрными оптическими элементами. Так, решетки, составленные из линз и зеркал, образуют соответственно линзовые и зеркальные растры.

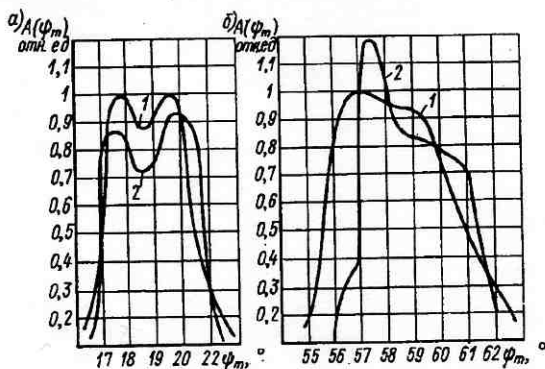


Рис. 123. Индикатрисы рассеяния: а — $R_{\max} = 4$ мкм; $S = 6600$ мкм; $\psi_0 = 20^\circ$; $\lambda = 0,6$ мкм; б — $R_{\max} = 1,7$ мкм; $S = 460$ мкм; $\psi_0 = 60^\circ$; $\lambda = 1,28$ мкм

На практике для создания растров обычно применяют прозрачные пластмассы, желатину или стекло. В связи с этим, в зависимости от материала выбирают наиболее рациональный способ изготовления растров с определенными геометрическими параметрами поверхности, чаще всего, фотографический или фотохимический, поскольку способы прессования и литья под давлением технологически сложны и трудоемки.

В ЛИТМО предложен и разработан¹ способ изготовления растров с мелкоячеистой и линейчатой структурой. Способ основан на создании выдавливанием прокаткой между валками заданного регулярного микрорельефа поверхности растра. Микрорельеф на пластине — заготовке образуется как негативный отпечаток соответствующего микрорельефа на прокатных валках.

Микрорельеф на рабочих поверхностях валков создается различными способами: тонким точением алмазным резцом или шлифованием алмазным профильным кругом, гладким и вибрационным накатыванием. Последний способ является наиболее простым и универсальным.

¹ Автором совместно с А. М. Добрусным.

Схема прокатного устройства, разработанная А. М. Добрусиным и Ю. В. Кудряшовым, показана на рис. 125, а. Устройство устанавливается в центрах токарного станка по оси вала 1, привод которого осуществляется от шпинделя. От шестерни z_1 , сидящей на валу 1, через паразитные шестерни z_2 и z_3 вращение (по стрелке М) передается на нижний валок z_4 ($z_1 = z_2 = z_3 = z_4$). Между валками 1 и 2 прокатывается пластина — заготовка 4. Оба валка и прокатываемая заготовка находятся в масляной ванне 6. Подогрев масла осуществляет нагреватель 5, позволяющий создавать различный температурный режим про-

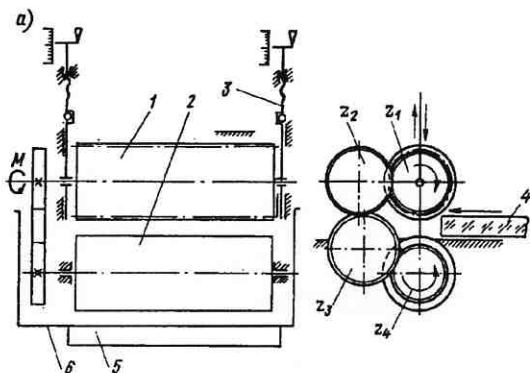


Рис. 124. Схема прокатного устройства для образования регулярного микро-рельефа вибронакатыванием с подогревом заготовки (а); вибронакатанный образец из ниодимового стекла (б)

катки. Сближение валков осуществляется при помощи микрометрических винтов 3. Скорость прокатки регулируется коробкой скоростей токарного станка. Испытания, выполненные на этой установке, позволяют сделать следующие предварительные выводы:

1) создание мелкоячеистых растровых поверхностей прокаткой в вибронакатанных валках возможно, при этом на значительных площадях; этот способ весьма производителен и экономичен;

2) в каждом случае в зависимости от свойств материала растрового элемента и конструкции растра необходима экспериментальная отработка режима прокатки и, в первую очередь, температуры нагрева заготовки и величины обжатия ее прокатными валками;

3) состав среды, в которой нагревается заготовка, обусловлен свойством материала; во всех случаях необходимо исключение возможности попадания в зону контакта заготовки и валков инородных частиц всех видов;

4) полное устранение жидкой смазки, несколько искажающей отпечаток микро-рельефа валков, практически невозможно; по-

видимому, лучший эффект будет достигнут при подаче нагревающей среды в полые ролики или при нагреве заготовки и роликов воздушной средой, подаваемой под давлением в зону обработки;

5) в настоящее время описанным способом на оргстекле созданы растровые поверхности с плотностью элементов, равной 9 на 1 мм^2 , с радиусом сферы 1 мм.

Произведена опытная обработка в нагретом состоянии вибронакатыванием и стекла¹. На специальной установке с нагревательной камерой обрабатывались вибронакатыванием твердосплавным шаром (ВК6) цилиндрические образцы из ниодимового стекла (рис. 124, б). На наружной поверхности выдавлены канавки вида I, глубиной 5 мкм. По-видимому, создание на поверхностях оптических деталей из стекла регулярного рассчитываемого микрорельефа — одно из направлений управления оптическими свойствами стекол.

19. Электрические свойства

В последнее время все большее значение приобретают исследования взаимодействия поверхности твердого тела с высоковольтным электрическим полем. Особый интерес они представляют при решении столь важной и актуальной задачи, как создание эффективной защиты пилотируемых космических кораблей от интенсивных потоков заряженных частиц, поскольку одним из наиболее перспективных способов защиты может служить так называемая электростатическая защита (ЭСЗ).

Принцип действия ЭСЗ основан на отклонении падающего на космический корабль потока заряженных частиц электрическим полем, создаваемым между специальными электродами, одним из которых может служить внешняя поверхность оболочки космического корабля. Для изолирующей среды в ЭСЗ может быть применен вакуум космического пространства, а также газообразные или твердые диэлектрики [9].

Рабочее напряжение ЭСЗ от электронов лежит в диапазоне 10^5 — 10^6 В. В настоящее время получение таких напряжений на борту космических аппаратов при условии малого энергопотребления возможно. Однако выполнение условия малого энергопотребления требует ограничения величины темновых токов утечки с поверхности высоковольтного электрода ЭСЗ. По экспериментальным данным для электродов из алюминиевого сплава Д16 и нержавеющей стали, рабочие поверхности которых доведены до 12-го класса шероховатости, при напряжении 100 кВ плотность темновых токов составляет 10^7 — 10^8 А/см². При таких значительных темновых токах утечки мощность высоковольтных источников питания, необходимая для их компенсации, составляет 10^2 — 10^3 Вт, что затрудняет реализацию ЭСЗ с использованием

¹ Выполнена автором совместно с Р. У. Назировым.

бортовых источников энергопитания. Поэтому возникает задача снижения темновых токов утечки, причем не только с целью улучшения энергетических и весогабаритных характеристик высоковольтных источников питания, но и для подавления фона рентгеновского излучения, генерируемого этими токами в элементы защиты.

Одно из направлений решения этой задачи — на основе изучения процессов, происходящих на рабочей поверхности высоковольтного электрода при воздействии различных излучений и других условий космического пространства, — изыскание путей и возможностей снижения автоэлектронных токов, возникающих в высоковольтном вакуумном промежутке, а также повышение электрической прочности этого промежутка, в частности, за счет оптимизации микрогеометрии рабочих поверхностей электродов. Такое направление было обусловлено тем, что, по данным ряда теоретических и экспериментальных исследований и результатам поисковых испытаний, влияние микрорельефа рабочих поверхностей высоковольтных электродов, главным образом, высота и форма его неровностей является чуть ли не определяющим величиной темновых токов утечки в системе ЭСЗ и величину электрической прочности электродов [19]. Так, принимая, что выступы неровностей на рабочей поверхности электрода представляют собой тело вращения, определяют коэффициент усиления поля на вершине полуэллипсоидального выступа по формуле

$$\mu = \beta (R/r), \quad (124)$$

где β — медленно и монотонно меняющаяся функция R/r ; R — высота выступа; r — радиус закругления вершины выступа.

При $R/r = 5 \div 250$ $\beta = 1,0 \div 0,4$, т. е. практически $\mu = R/r$. Эти положения требовали проверки, что и было сделано с использованием процесса вибронакатывания, позволяющего варьировать практически все параметры микрорельефа и, в первую очередь, величину отношения R/r . Были поставлены экспериментальные исследования¹, отличавшиеся широким охватом материалов электродов, методов их обработки, вариантов микрорельефов, методик исследований и испытаний.

Результаты более чем семилетних исследований и испытаний электродов с микрорельефами, параметры которых изменялись в широких пределах и испытывались как на стендах, так и в реальных эксплуатационных условиях, лишь частично подтвердили теоретические посылки об определяющем значении формы неровностей рабочей поверхности электродов, в частности по критерию R/r . Так, создание регулярных микрорельефов, отличающихся высокой степенью однородности формы и размеров неровностей во всех случаях (у электродов из различных материалов, различ-

¹ Выполнялись Т. Я. Рябовой, Е. Е. Ковалевым, Э. Д. Молчановым, Р. У. Назировым, Г. Н. Богдановым, Ю. Г. Пехтеревым совместно с автором.

ных конструкций и размеров), приводило к заметной стабилизации значений характеристик электрической прочности по всей их поверхности; это было особо заметно у стальных электродов диаметром 300 мм. Наибольший разброс наблюдается у электродов, обработанных абразивными методами, в том числе доводкой с достижением высокой степени гладкости поверхности (12-й класс шероховатости). Это, по-видимому, связано с шаржированием в поверхностный слой материала электрода абразивных частиц (с увеличением степени гладкости размер шаржируемых частиц уменьшается, количество их на поверхности электрода возрастает). Лишь в малой степени подтвердилось положение о решающем влиянии формы неровностей (по критерию R/r , а также по другим параметрам микрорельефа) на электрическую прочность электродов. По-видимому, влияние других факторов при исследованиях и испытаниях оказывалось более существенным, что косвенно подтверждалось тем, что в одних случаях оказывались одинаковыми, а в других — сильно разнящимися значениями характеристик электрической прочности при одинаковых значениях всех параметров микрорельефа рабочих поверхностей электродов. Эти выводы относятся в первую очередь к стальным и алюминиевым электродам с торцовыми рабочими поверхностями, на которых проводились основные исследования и испытания, хотя практически такие же результаты были получены на электродах контактных систем в виде труб с цилиндрической рабочей поверхностью, работающих в воздушной среде. С регуляризацией микрорельефа также значительно повысилась однородность электрической прочности по всей поверхности, и оказалось мало заметным влияние на прочность микрорельефа поверхности. Этот результат исследований оказался весьма важным, поскольку на базе существовавших представлений о влиянии микрорельефа на электрическую прочность электродов, намечалась весьма трудоемкая, дорогостоящая чистовая их обработка с обеспечением высоких классов шероховатости. На основе результатов данных исследований требования к шероховатости рабочих поверхностей значительно снижены, что существенно упростит и удешевит серийное изготовление электродов.

В настоящее время Ю. В. Колосовым ведутся исследования возможностей использования регуляризации и оптимизации микрорельефов с целью уменьшения электризации поверхностей различных деталей машин, механизмов и приборов. Результаты этой работы свидетельствуют о возможности в некоторых пределах управлять явлением электризации за счет варьирования микрогеометрии электризующихся поверхностей — формы, размеров, расположения их неровностей. Выявлен нелинейный характер зависимости между плоскостностью, степенью однородности неровностей, радиусом скругления их вершин, шагом, углом наклона образующих и степенью электризации. В этих условиях возможность варьирования значений практически всех микрогеометри-

ческих параметров поверхности методом вибронакатывания позволяет наиболее эффективно и надежно решать задачу снижения электризации поверхностей за счет оптимизации их микрорельефов. По-видимому, в ряде случаев при решении подобных задач близкими к оптимальным будут регулярные микрорельефы вида IV с наложением на них частично регулярных микрорельефов видов I и II. Такие микрорельефы создавались нами при решении задачи обеспечения высокой степени герметизации при склонности контактирующих поверхностей к адгезии и схватыванию, когда регулярный микрорельеф вида IV и все виды частично регулярных микрорельефов в отдельности не давали должного эффекта.

20. Вакуумные свойства

Развитие большого числа отраслей науки, техники, промышленности связано с вакуумной техникой. Это определяет необходимость решения ряда технологических задач, связанных с необходимостью создания вакуума и поддержанием его в течение определенного промежутка времени — уменьшения газовыделения с поверхностей деталей, расположенных в вакууме. Большую роль в этом случае играет микрогеометрия этих поверхностей. Так, взаимодействие твердых тел в вакууме с разреженным газом определяется степенью развитости поверхности, т. е. в первую очередь ее шероховатостью, а также наличием пор, рисок, трещин, надрывов, поскольку десорбция газов с поверхности обусловлена не только выделением газов растворенных в толще металла и диффундирующих к поверхности, но и в значительной мере выделением газов адсорбированных на самой поверхности. Основным геометрическим параметром, наиболее полно и точно описывающим сорбционные явления, — площадь реальной поверхности, поэтому естественным было предположение об эффективности обработки находящихся в вакууме поверхностей методами холодного пластического деформирования взамен даже самых тонких методов, основанных на резании (абразивная доводка, полирование), отличающихся, как известно, образованием сильно развитых поверхностей, с большой длиной линии профиля и с большой их фактической площадью.

Первое исследование¹ ставило целью выявить зависимость скорости очистки от микрогеометрии поверхностей, обработанных различными методами: тонким растачиванием, обкатыванием, вибронакатыванием. Повышение скорости очистки имеет особое значение при создании высокого и сверхвысокого вакуума. Для исследования использовалась аппаратура: вакуумметр магнитно-блокировочный В-8 и омоготрон РМО-13. Испытывавшимися образцами служили малогабаритные вакуумные

¹ Выполнено автором совместно с Б. Н. Букиным в ЛИТМО и в СКБ АП АН СССР.

камеры из нержавеющей стали, внутренние цилиндрические по поверхности которых растачивались, гладко раскатывались шаром и вибронакатывались шаром ($d_{ш} = 6$ мм). Размеры реальной поверхности оценивались коэффициентом $\beta = l_p/l$, где l_p — реальная длина профиля; l — длины базовой геометрически правильной (номинальной) линии. Определение l_p производилось по профилограммам, снятым с одинаковым вертикальным и горизонтальным увеличениями.

При одинаковой высоте неровностей ($Rz = 6 \div 7$ мкм) для расточенных поверхностей $\beta = 60 \div 70$ мкм/мм, для вибронакатанных (микрорельеф вида IV) $\beta = 2 \div 3$ мкм/мм, т. е. меньшей приблизительно в 20—30 раз. Скорость десорбции газа с вибронакатанной поверхности по сравнению с расточенной оказалась значительно большей, но не в 20—30, а лишь в 5—10 раз. Такое «несоответствие» предположительно может быть объяснено тем, что на уровне субмикроскопии заметное различие в высоте субмикронеровностей исходной и вибронакатанной поверхностей существенно не наблюдается; высота субмикронеровностей уменьшилась в пределах лишь 0,46—0,1 мкм. Такой характер воздействия пластического деформирования при вибронакатывании на микро- и субмикрорельеф был подтвержден другим исследованием [8]¹, в котором определялось влияние режима вибронакатывания алюминиевого сплава Д-16 и нержавеющей стали 1Х18Н9Т и исходной шероховатости поверхностей на высоту субмикронеровностей. Под вибронакатывание образцы доводились абразивной доводкой до 8 и 10-го классов шероховатости, после чего вибронакатывались шарами диаметром 5 и 9 мм с подачами 0,07, 0,11, 0,17, 0,2, 0,3 мм/об; с усилием 100, 150, 200, 250 Н при обработке алюминиевых образцов, с усилием 50, 100, 200, 300, 400, 500 и 600 Н при обработке стальных. С поверхностей образцов снимались лаковые реплики, которые затем оттенялись хромом под углами 10 и 20° и исследовались на просвет на электронном микроскопе УЭМВ-100М. С реплики каждого образца снимались фотографии при увеличениях 2200, 22000, 66000, по которым судили о характере микрорельефа по всей площади субмикрорельефа в наиболее характерных точках. Приводим основные выводы данного исследования, они представляют интерес не только в отношении вакуумных свойств поверхностей с регулярным микрорельефом:

1) вибронакатывание при исследованных режимах не меняет характера субмикрорельефа поверхностей как алюминиевых, так и стальных образцов;

2) наиболее эффективно сглаживание исходных неровностей на уровне микро- и субмикрорельефа при прочих равных условиях достигается вибронакатыванием; степень сглаживания исходных

¹ Выполнено Т. Я. Рябовой, А. Д. Тереховым и Е. Н. Фроловой.

поверхностей 8 и 10-го классов шероховатости вибронакатыванием одинакова.

Создание новых совершенных методов исследования субмикрорельефа поверхностей позволит перейти от качественных к количественным оценкам субмикрогеометрии, что весьма важно, поскольку все чаще выявляется зависимость целого ряда эксплуатационных свойств поверхностей (электрическая прочность, отражение света и др.) от субмикрорельефа технических поверхностей.

Второе исследование¹ ставило целью определение влияния способа обработки и микрогеометрии поверхностей деталей, находящихся в вакууме, на количество и состав газов, выделяющихся в вакуум. Исследование производилось на образцах из нержавеющей стали 12X18H10T, которые обрабатывались гладким и вибрационным накатыванием шарами и сравнивались с тонко обточенными образцами.

Основные результаты исследования следующие:

1) поверхности, обработанные обкатыванием и вибронакатыванием, при контакте с атмосферным воздухом сорбируют в семьдесят раз меньше газа, чем поверхности электрополированные (и те и другие 8-го класса шероховатости): это объясняется благоприятной формой неровностей вибронакатанной поверхности и минимизацией ее площади, что и определило увеличение скорости очистки при первом исследовании;

2) поскольку кинетика десорбции зависит не только от микрогеометрии поверхности, определяющей число центров адсорбции, но также и от энергии связи адсорбированных молекул с металлом, поверхностный слой которого при обработке давлением, при вибронакатывании пластически деформируется, структура его становится менее однородной, что приводит к увеличению поверхностной энергии. Это необходимо учитывать при построении технологического процесса, включая в него для снижения поверхностной энергии операции отжига. Для нержавеющей стали определена следующая последовательность обработки: вибронакатывание или обкатывание с последующим электролитическим полированием, стравливающим деформированный наклепанный слой, что приводит к уменьшению скорости газовой выделению;

3) проницаемость газа через поверхности, обработанные пластическим деформированием, уменьшается в несколько раз по сравнению с поверхностями, обработанными чистовым точением и электрополированием;

4) образование оптимального микрорельефа обкатыванием и вибронакатыванием должно производиться при минимальных давлениях деформирующего элемента на обрабатываемую поверхность.

Таким образом, применение методов обработки пластическим деформированием поверхностей, находящихся в вакууме взамен обработки резанием, позволяет улучшить их вакуумные свойства.

¹ Выполнено А. П. Ивановым в СКБ АП АН СССР.

21. Активность поверхности

Для выявления влияния способа обработки и образующегося микрорельефа и поверхностного слоя металла с определенными физико-механическими свойствами на активность поверхности в НИИРП было проведено исследование¹. Активность поверхностей, обработанных пескоструением, шлифованием (8-й класс шероховатости) и вибронакатыванием (8-й класс шероховатости), определялась по изменению во времени начального сдвигового усилия резино-металлической фрикционной пары, по изменению свободной поверхностной энергии (СПЭ) после предварительного контакта с поверхностями различного микрорельефа, а также по стойкости к коррозионному разрушению в условиях повышенной влажности и температуры. Результаты экспериментального исследования в основном сводятся к следующему: начальное сдвиговое усилие как по абсолютной величине, так и по скорости изменения во времени уменьшается в ряду: пескоструенная, шлифованная и вибронакатанная поверхности; в такой же последовательности уменьшается величина изменения СПЭ резины после предварительного контакта с твердыми металлическими поверхностями в течение трех суток при 90 °С. Коррозия поверхностей уменьшается в аналогичной последовательности.

Таким образом, активность исследованных поверхностей убывает в ряду: пескоструенная, шлифованная и вибронакатанная. Это объясняется тем, что микрорельеф пескоструенной, шлифованной, обточенной поверхностей, образованных методами обработки, основанными на отделении частиц материала от основной его массы, не удовлетворяет главному требованию, определяющему снижение СПЭ — минимизации площади поверхности. В наибольшей мере этому требованию удовлетворяет регулярный гексагональный микрорельеф вида IV, отличающийся наиболее плотной упаковкой ее элементарных ячеек [19]. В весьма обширной по данному вопросу литературе приведены многие «косвенные» доказательства правильности данного положения.

Особенно убедительными «косвенными» доказательствами являются примеры явлений в живой природе, относящиеся к выработанному в процессе длительной эволюции приспособительному «использованию» квазирегулярного микрорельефа на опорных поверхностях тела в целях противоскольжения (папиллярный рисунок у млекопитающих на опорных поверхностях их конечностей, квазирегулярный рельеф центральной поверхности тела пресмыкающихся и т. п.) и наоборот, в целях снижения трения (регулярный микрорельеф кожи дельфина, плакоидная чешуя быстроходных рыб и т. д.).

Примерами гексагональных структур, «используемых» в живой природе, могут быть: соты, решетчатый скелет радиолярий,

¹ Работа выполнена автором совместно с Л. А. Акоюном, Г. М. Бартеньевым, Б. Х. Аврущенко и А. Л. Рейнусом.

эпителий трахеи некоторых насекомых, фасеточный глаз насекомых и т. д. (рис. 125).

Поверхности с микрорельефом, соответствующим минимуму энергии, минимально влияют на окружающую среду (газ, вакуум, жидкость или твердое тело). У таких поверхностей нет избытка поверхностной энергии для передачи во внешнюю среду. Свойство

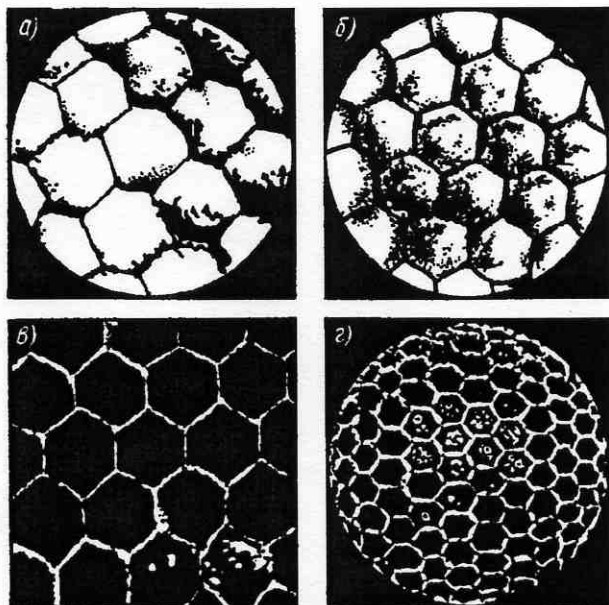


Рис. 125. Гексагональные структуры: а — вибронакатанный гексагональный регулярный микрорельеф; б — кожа змеи; в — соты; г — радиолярия

поверхностей с минимальной поверхностной энергией слабо влияют на окружающую фазу может проявиться в снижении сорбционной способности, адгезии, улучшении десорбции и дезактивации, эмиссии; оно может обусловить механические, электрические, оптические, гидродинамические и многие другие свойства контактов, определяя эксплуатационные свойства различных машин, приборов и аппаратов.

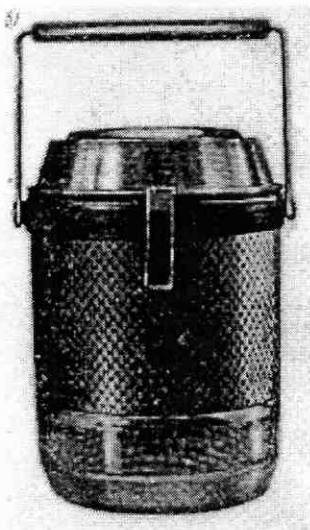
22. Декоративные свойства

Выдавливаемые при вибронакатывании канавки создают на металле разнообразные рисунки, образуя поверхности с высокими декоративными свойствами. Возможность варьирования взаимо-

расположения канавок позволяет подбирать рисунки, наиболее подходящие в эстетическом отношении к тому или иному изделию. Кроме того, одни и те же детали и изделия без каких-либо затрат



Рис. 126. Образцы изделий с вибронакатанным декоративным микро-рельефом: а — молоковарка: б — четырехлитровый термос



или переналадок оборудования могут снабжаться рисунками различного вида (I, II, III или IV) за счет лишь изменения скоростей вращения заготовки и деформирующего инструмента. На разных участках поверхности могут быть созданы различные рисунки, а также закономерно изменяющиеся по длине изделия. В отдельных случаях рисунок наносится резцом, закрепленным вместо шарика в виброголовке. Канавки вырезаются после нанесения на поверхность слоя цветного покрытия.

Декоративная обработка вибронакатыванием весьма производительна и может заменить ручную чеканку, гравирование, абразивное полирование, а также покраску и различные покрытия¹. В настоящее

время вибронакатывание широко и эффективно применяется на многих предприятиях как способ отделочной обработки изделий народного потребления (рис. 126).

¹ НИИ технической эстетики разработаны рекомендации по применению декоративной отделки вибронакатыванием изделий из алюминиевых сплавов.

1. Витенберг Ю. Р. Накатывание регулярного микрорельефа фасонными роликами. — Вестник машиностроения, 1976, № 9, с. 28—30.
2. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 228 с.
3. Ключев В. В. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара. Справочник, кн. 2. М.: Машиностроение, 1978. 439 с.
5. Крагельский И. Б., Комбалов В. С., Добычин М. Н. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
5. Рыжов Э. В. Контактная жесткость (нормальная) неподвижных соединений. Автор. дисс. М.: Станки, 1967. 48 с.
6. Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 172 с.
7. Сливков И. Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972. 304 с.
8. Тезисы докладов Ленинградской научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных свойств машин и приборов образованием регулярных микрорельефов на поверхностях деталей». Л., 1976. 71 с.
9. Труханов К. А. Активная защита космических кораблей. М.: Атомиздат, 1970. 231 с.
10. Ударное вибрационное накатывание/В. Б. Сахов, Ю. П. Лебедев, О. А. Парманн, О. И. Соколов, Н. А. Сыроегина. — В кн.: Прикладная механика в приборостроении. Л.: ЛИАП, 1976, вып. 107. с. 150—153.
11. Улучшение физико-механических свойств деталей приборов за счет оптимизации качества поверхностей. — Тр. ЛИТМО. Л.: 1978. 71 с.
12. Фельдман Я. С. Расчет параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин, приборов и их технологическое обеспечение/Под ред. Ю. Г. Шнейдера. Л.: ЛИТМО, 1979. 97 с.
13. Фельдман Я. С. Таблицы для расчета параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин, приборов и их технологического обеспечения. Л.: ЛИТМО, 1979. 36 с.
14. Шнейдер Ю. Г., Амбарян Р. Х. Износостойкость направляющих прецизионных автоматов продольного точения. — Станки и инструмент, 1978, № 4, с. 34—35.
15. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 230 с.
16. Шнейдер Ю. Г. Чистовая обработка металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1963. 269 с.
17. Шнейдер Ю. Г., Киракосян О. П. Зависимость толщины масляной пленки от микрорельефа трущихся поверхностей. — Вестник машиностроения, 1978, № 9, с. 17—19.
18. Шнейдер Ю. Г. Холодная бесштамповая обработка металлов давлением, 3-е изд. Л.: Машиностроение, 1967. 349 с.
19. Электростатическая защита от космических излучений и ее земные приложения/Е. Е. Ковалев, Э. Д. Молчанов, Р. У. Назиров, Т. Я. Рябова, Ю. Г. Шнейдер — Сб. докладов XXIV Международного астронавтического конгресса «Космические исследования: влияние на науку и технику». Баку, 1973, с. 10—15.

Введение	3
Глава I. Образование регулярных микрорельефов на поверхностях деталей	
1. Регуляризация микрорельефов поверхностей деталей	9
2. Образование частично регулярных микрорельефов	10
3. Образование регулярных микрорельефов вибрационным накатыванием	18
4. Классификация регулярных микрорельефов и их особенности	64
5. Стандартизация регулярных микрорельефов	73
Глава II. Теоретические основы образования регулярных микрорельефов	77
6. Основные кинематические и динамические зависимости образования регулярных микрорельефов	—
7. Нормирование геометрических и физических параметров качества поверхностей с регулярным микрорельефом	105
8. Технологическое обеспечение и контроль регулярных микрорельефов	119
Глава III. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом	134
9. Прирабатываемость, трение, износостойкость	—
10. Плавность хода, бесшумность	205
11. Сопротивление ползучести	209
12. Контактная жесткость	212
13. Усталостная прочность	216
14. Коррозионная стойкость	221
15. Герметичность	224
16. Прочность неподвижных соединений	227
17. Свойства монокристаллов	232
18. Оптические свойства	233
19. Электрические свойства	238
20. Вакуумные свойства	241
21. Активность поверхности	244
22. Декоративные свойства	245
Список литературы	247

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ И НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ Ю.Г.ШНЕЙДЕРА

Родился 13 июня 1913 года в Петербурге.

1920-1930 – обучение в школе.

1930-1934 – работа фрезеровщиком на заводе им. А.А.Кулакова.

1934-1939 – обучение в ЛИТМО.

1939-1941 – обучение в аспирантуре ЛИТМО (прервано из-за войны).

1941-1956 – работа на заводе им. А.А.Кулакова в должности инженера-технолога, включая период блокады Ленинграда.

1947 – защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по вопросам технологии холодной бесштамповой обработки металлов.

1956-1967 – работа в должности доцента на кафедре технологии Ленинградского института авиационного приборостроения.

С 1967 – работал на кафедре технологии приборостроения ЛИТМО, сначала в должности доцента, затем (с 1970 года) – профессора.

1969 – защита диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

1993 – присвоение почетного звания “Заслуженный изобретатель России”.

Умер 14 мая 1995 года.

**ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ
ПУБЛИКАЦИИ
Ю. Г. ШНЕЙДЕРА**



Холодная бесштамповая обработка металлов давлением. Л., 1967.–
352 с.

Инструмент для чистовой обработки металлов давлением. Л., 1971.–
248 с.

Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуата-
ционные свойства. Л., 1972. – 240 с.

Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом.
Л., 1982. – 248 с.

Технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб., 1998.
– 414 с.

Юрий Гдальевич ШНЕЙДЕР
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ
С РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ

Репринтное воспроизведение
издания 1982 года

Компьютерная верстка, дизайн
Дизайн обложки серии
Автор проекта серии

ИВА-Design
В.А. Петров
М.И. Потеев

Подписано в печать 17.11.01. Формат А5. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Тираж 150 экз. Заказ № 83.

Санкт-Петербургский государственный
институт точной механики и оптики
(технический университет)
Лицензия ИД №00408 от 05.11.99
197101, СПб, ул. Саблинская, 14
Издательство "ИВА"
Лицензия ИД №00705 от 17.01.2000
197348, СПб, ул. Аэродромная, 4

Наименования предыдущих книг серии

Г.Н. Дульнев. Энергоинформационный обмен в природе. 2000. – 134 с.

А.В. Сечкарев. Фотонная оптика. 2000. – 220 с.

В.С. Игнатовский. Элементарные основы теории оптических приборов. 2001.– 202 с.

К.Г. Коротков. Основы ГРВ биоэлектрографии. 2001.– 360 с.

В.Н. Чуриловский. Теория оптических приборов. 2001.– 274 с.