

Более высокая точность и надежность технологического обеспечения образования регулярных микрорельефов на поверхностях деталей машин и приборов по сравнению с технологическим обеспечением шероховатых поверхностей определяется не только возможностью применения, фактически впервые, методов, основанных на аналитических расчетах, но и несравненно более высокой степенью воспроизводимости микрорельефа в отношении формы, размеров и взаиморасположения неровностей.

9. Методы контроля микрогеометрии поверхностей

| Методы контроля микрогеометрии поверхностей | | |
|--|-----------------------|--|
| Аппаратные | | Безаппаратные |
| Профильный метод контроля приборами последовательного преобразования профиля | Профилографирование | Визуальный |
| | Профилометрирование | |
| Профильный метод контроля приборами одновременного преобразования профиля | Интерферометрирование | Визуальный сравнением с образцами или эталонной деталью |
| | Световое сечение | |
| | Теневая проекция | |
| Интегральный метод контроля по поверхности | Рефлектометрирование | Контроль технологического процесса обработки поверхности |
| | Электрический метод | |
| | Пневматический метод | |
| | Тепловой метод | |
| | Акустический метод | |

Контроль параметров регулярных микрорельефов. Особенности регулярных микрорельефов сказываются не только на их нормировании и технологическом обеспечении, но и на всех методах контроля, обобщенная классификация которых приведена в в табл. 9. Методы контроля микрогеометрии поверхности : а) аппаратный (приборный) контроль с помощью приборов; б) безаппаратный (органолептический) контроль без использования приборов. К основным методам аппаратного контроля относятся: профилографирование и профилометрирование.

Основные особенности аппаратного контроля параметров регулярного микрорельефа этими методами сводятся к следующему.

1. Измерение параметра R — высоты элемента. Поскольку регулярные микрорельефы отличаются значительно бóльшим шагом неровностей, чем микрорельефы шероховатых поверхностей, необходимо значительно увеличивать длину базовой длины измерения. Поскольку шаг неровностей определяется фактически всеми параметрами режима вибронакатывания, расчет длины трассы измерения может быть произведен из зависимости

$$L = 10\pi l, \quad (111)$$

где l — амплитуда осцилляционного движения деформирующего элемента при вибронакатывании.

Исходя из наибольшего значения амплитуды l , применяемой в практике, максимальная длина базовой длины не превышает 40 мм; для поверхностей с регулярным микрорельефом наиболее характерно значение $l = 10 \div 20$ мм.

2. Измерение параметра T_p — относительной опорной площади. Результаты большого числа метрологических исследований выявили, что при высокой степени однородности регулярных микрорельефов наблюдается хорошая корреляция между значениями t_p (по ГОСТ 2789—73) и T_p при условии измерения этих величин на удлиненной базовой длине, рекомендованной выше для измерения высоты неровностей R . Поэтому для измерения T_p можно использовать в большинстве случаев щуповые приборы (в частности, отечественный профилограф-профилометр модели 252 завода «Калибр» со сканированием щупа по параллельным трассам).

3. Измерение параметра N — числа элементов на единице площади. Этот новый в стандартизации микрогеометрии параметр может быть измерен при помощи универсальных измерительных микроскопов, например на инструментальном микроскопе УИМ-25.

4. Измерение параметров γ и β — углов направления расположения элементов. Эти параметры можно измерить той же аппаратурой, что и параметр N , с использованием поворотных лимбов измерительных микроскопов.

Особенности контроля частично регулярного микрорельефа сводятся к следующему. Вид микрорельефа (I, II или III) определяется визуально. Площадь F_k , занимаемая канавками, практически не контролируется не только потому, что это достаточно сложная задача, но и потому, что эта величина с вполне достаточной для практики точностью обеспечивается расчетной кинематической связью параметров режима вибронакатывания со значениями F_k . В этом случае предельно прост и надежен метод безаппаратного контроля режима вибронакатывания, рассмотренный ниже.

Контроль размеров канавки — глубины h_k , ее ширины b , а также величины наплывов h_n , образующихся по ее краям, производится по профилограммам, снимаемым в сечении, перпенди-

кулярном сечению под углом γ . Угол сетки может быть определен при помощи инструментального микроскопа или проектора.

Увеличение (вертикальное и горизонтальное) при профилографировании выбирается таким образом, чтобы можно было одновременно с измерением размеров канавок по одной и той же профилограмме измерить и все необходимые значения параметров микрогеометрии на участках исходной поверхности между канавками.

Эти особенности контроля параметров регулярных и частично регулярных микрорельефов относятся практически ко всем методам аппаратного контроля.

Особое внимание в последнее время уделяется методам безаппаратного контроля, так как аппаратный контроль достаточно сложен, трудоемок и дорог, а во многих случаях неосуществим без разрушения контролируемых деталей. К таким деталям относятся малогабаритные детали (например, детали часовых механизмов), детали с труднодоступными поверхностями (поверхности пазов, зубьев зубчатых колес, резьбы, галтелей, отверстий малого диаметра и т. п.). Трудности аппаратного контроля связаны также с недостаточной обеспеченностью многих предприятий соответствующими приборами.

В этих условиях безаппаратный контроль весьма эффективен и при определенных условиях достаточно надежен. Как видно из табл. 9, известны три основных метода безаппаратного контроля.

Визуальный контроль предельно прост, но недостаточно информативен, поскольку даже при использовании увеличивающих луп и микроскопов дает представление в первую очередь о характере микрогеометрии поверхности, наличии дефектов (риски, царапины, вырывы) и о расположении неровностей. Эта информация явно недостаточна, когда в чертеже указаны численные значения параметров шероховатости поверхности или регулярного микрорельефа. Она может служить лишь дополнительной к информации аппаратного или безаппаратного контроля технологического процесса.

5. Сравнение с образцами или с эталонными деталями требует наличия специальных относительно сложных и дорогостоящих в изготовлении образцов. Недостаточно высокая степень объективности и достоверности такого способа контроля микрогеометрии резко снижается, если не выполнены следующие требования к образцам: полная идентичность их материала, структуры и термической обработки с контролируемой деталью, полная идентичность метода и режима обработки образца и контролируемой детали, используемого инструмента и всех других условий, которые в той или иной степени определяют значения параметров и характеристик микрогеометрии поверхности.

Именно это определяет необходимость наличия на предприятии большого комплекта образцов, которые практически еще не

созданы. Кроме того, область применения контроля сравнением с образцами, даже с использованием луп и микроскопов, ограничивается 7—8-м классами шероховатости по ГОСТ 2789—73 ($Ra = 0,32 \div 1,25$ мкм), что обусловлено ограниченной разрешающей способностью человеческого глаза и органов осязания (поверхности определенного вида более точно контролируются сравнением с образцами ощупыванием, чем визуально). Кроме того, рабочие поверхности образцов со временем изменяют свой внешний вид под действием коррозии. Изготовление образцов из стойких против коррозии материалов, из пластмасс, покрытие их лаками и гальваническими покрытиями приводит к нарушению вышеприведенных условий достоверности контроля.

Этими недостатками и трудностями объясняется сравнительно небольшая область использования метода контроля микрогеометрии поверхностей деталей сравнением с образцами (крупносерийное и массовое производство «малоответственных» поверхностей).

Все указанные основные органические недостатки метода безапаратного контроля сравнением с образцами и, в первую очередь, субъективность и недостаточно высокая степень точности оценки сохраняются при контроле сравнением с эталонными образцами.

Контроль технологического процесса обработки поверхности — метод, который в последнее время начинает применяться все более широко, в особенности, в зарубежных промышленных странах. Это обусловлено следующими основными его достоинствами: простота, высокая надежность и экономичность, при возможности безразрушающего контроля микрогеометрии практически любых поверхностей, в том числе труднодоступных.

Сущность этого метода состоит в том, что контролируется не микрогеометрия поверхности, а технологический процесс, все условия и режим обработки контролируемой поверхности. В этом случае последовательность обработки, ее условия и режим должны быть выявлены на основе тщательно выполненного, чаще всего экспериментального (реже — теоретического) исследования с установлением всех факторов и численных значений параметров режима, определяющих микрогеометрию, а в большинстве случаев и физико-механические параметры качества поверхности.

Всю эту информацию получают при нормировании качества поверхности на основе данных экспериментальных исследований, которые должны фиксироваться в картах технологического процесса (реже эти данные вносятся в чертежи деталей). Такой контроль осуществляется при настройке станка и оснастки, а затем периодически, с целью профилактики брака, так как по тем или иным причинам может произойти сбой первоначальной настройки. Контроль технологического процесса, настройки, режима и других условий обработки производится работниками ОТК.

По-видимому, лишь два фактора могут воспрепятствовать осуществлению столь совершенного, эффективного и экономичного

метода контроля микрогеометрии поверхностей деталей машин и приборов:

1) недостаточная лабораторная база для исследовательской обработки технологического процесса, режима и условий обработки и отсутствие такой практики на предприятии; 2) недостаточно высокая технологическая дисциплина. Значительно упрощается и облегчается безаппаратный контроль микрогеометрии поверхностей с регулярным микрорельефом, что обусловлено следующими основными особенностями и достоинствами технологии его образования: а) в отличие от предельно неоднородной пластической деформации, сопровождающей процесс резания, при вибронакатывании пластическая деформация обрабатываемого материала высоко упорядочена; б) между значениями параметров режима обработки и значениями параметров регулярного микрорельефа существует «жесткая» кинематическая связь; это относится к таким параметрам, как N , T_r , γ и β , к виду и типу микрорельефа; в) процесс образования регулярного микрорельефа несравнимо более стабилен во времени, чем любой процесс образования шероховатых поверхностей хотя бы потому, что форма, размеры и микрогеометрия рабочих поверхностей деформирующих элементов (шара, алмазного наконечника) сохраняется близкой к исходной при отладке технологического процесса во много раз дольше, чем при любом виде резцовой или абразивной обработки резанием (стойкость металлического шара при обработке термически необработанной стали — порядка 20 ч; стойкость алмазных наконечников, даже при обработке термически обработанных сталей — значительно выше).

Все это создает хорошие предпосылки для осуществления безаппаратного контроля технологического процесса обработки деталей с регулярным микрорельефом практически на любом предприятии. Несколько сложнее осуществление такого контроля параметров регулярных микрорельефов, определяемых не кинематикой, а динамикой процесса вибронакатывания: R и, частично, T_r . Как уже указывалось, значение параметра R при отладке процесса вибронакатывания определяется опытным путем для данного материала и его состояния, как функция усилия вдавливания деформирующего элемента и величины радиуса сферы его рабочего участка. Эти же факторы определяют и значение T_r . В этом случае, если колебания значений физико-механических характеристик ($HВ$, σ_b , δ и др.) обрабатываемого материала, предусмотренные стандартом на данный материал, не выводят значения R и T_r за пределы, допустимые чертежом, дополнительный контроль обрабатываемого материала по данным характеристикам может не осуществляться.

Все изложенное выше относится и к безаппаратному контролю частично регулярных микрорельефов, а их основной параметр — площадь канавок F_{II} — практически может контролироваться лишь безаппаратным методом контроля технологического процесса.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА
ДЕТАЛЕЙ
С РЕГУЛЯРНЫМ
МИКРОРЕЛЬЕФОМ

9. Прирабатываемость, трение, износостойкость

При всех видах взаимодействия твердого тела с твердым телом, жидкостью, газом или плазмой контактные явления определяют микрогеометрию поверхности твердых тел; она также обуславливает практически все эксплуатационные свойства поверхностей. Это положение иллюстрируется табл. 1.

Как было показано в гл. I и II, с помощью нового способа — вибронакатывания — на поверхностях могут создаваться микро-рельефы нового вида, существенно отличающиеся по всем характеристикам от всех создававшихся до сих пор при обработке резанием, давлением и другими методами обработки.

В последнее время в Советском Союзе и за рубежом было проведено большое число исследований, лабораторных и эксплуатационных испытаний экспериментальных образцов и различных деталей машин и приборов с регулярным микро-рельефом, выявивших новые их эксплуатационные свойства, практически во всех случаях более высокие по всем показателям, чем у деталей, обработанных известными традиционными способами. Были выявлены такие широкие возможности оптимизации микрогеометрии поверхности и на этой основе управления многими контактными явлениями, в частности, при решении задач повышения качества и надежности машин и приборов.

Трение и износ — одно из наиболее сложных явлений при работе машин и приборов. Процессы трения и износа определяют все важнейшие эксплуатационные характеристики машины или прибора.

Выдвинуто много гипотез, предложены различные теории и классификации видов трения, подчас противоречивых как в исходных положениях, так и в объяснении частных явлений, сопровождающих процессы трения и износа. Однако все исследователи единодушны в одном — в оценке микрогеометрии трущихся поверхностей как одном из решающих факторов, обуславливающих практически все аспекты и характеристики явлений трения и износа. Это подтверждено исследованиями трения многих видов износа поверхностей, обработанных вибронакатыванием.

Поскольку при вибронакатывании вследствие упругого контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью фактически не происходит изменения макрогеометрии и волнистости исходной поверхности, то влияние микрогеометрии удалось выделить и выявить с достаточно высокой точностью «в чистом виде».

Высокая степень однородности микрорельефа вида IV и на участках канавок и наплывов микрорельефов видов I—III позволили четко определить зависимость трения и износа от различных характеристик микрорельефа, а также оперировать такими расчетными параметрами микрогеометрии, как площадь, объем и расположение канавок, число выступов на единицу поверхности и др.

Эти особенности вибронакатанных поверхностей обусловили и несколько необычное рассмотрение их трения и износа. Исследования ставили целью выявить в первую очередь такие свойства поверхностей с регулярным микрорельефом, как прирабатываемость, сопротивление трению (характеризуемое коэффициентом трения), возникающими силами трения и температурой в зоне трения), сопротивление износу и схватыванию. Протекание процесса изнашивания во времени характеризуется тремя основными фазами: прирабочный начальный износ, нормальный износ, предельный (катастрофический) износ.

Прирабатываемость. Особенности прирабочного износа: относительно большие контактные давления, обусловленные малыми площадями контакта микронеровностей трущихся поверхностей, интенсивная деформация микронеровностей в результате изменения их формы, размеров, а иногда и расположения; высокий темп износа и нарастание температуры в зоне трения.

Приработка определяет: 1) величину общего износа; 2) темп и величину нормального износа; 3) образование натиров, задиров, вырывов на приработанных поверхностях, а также схватывание, заедание в процессе нормального износа; 4) размещение и расход смазочных веществ; 5) температуру в зоне трения.

Таким образом, приработка является важнейшим этапом для трущихся деталей, определяющим условия, характер их работы после приработки и длительность сохранения рабочих функций. Важна и способность трущихся поверхностей прирабатываться — прирабатываемость.

Микрорельеф приработанной поверхности по сравнению с исходной характеризуется большей однородностью по высоте микронеровностей, большей опорной поверхностью, увеличенным числом пятен контакта с сопряженной поверхностью. Характеристикой микрорельефа, наиболее точно и полно отражающей прирабатываемость поверхности, по данным исследований автора, является величина опорной поверхности.

Используя возможности процесса вибронакатывания — образование поверхностей с микрорельефом, отличающимся большой

опорной поверхностью при достаточной ее маслосмекости и высокой степени однородности неровностей, а также возможность тонкого регулирования величины опорной поверхности — удалось особо четко показать значение оптимизации микро рельефа как основного фактора, определяющего прирабатываемость поверхностей. Для отдельных пар трения были отработаны такие микро рельефы при которых приработка практически отсутствовала и с первого же момента работы начинался процесс нормального износа.

Длительность приработки определяется временем от начала работы трущейся пары до момента начала установившегося (нормального) износа, или предложенным автором способом — до момента перехода граничного трения в жидкостное¹.

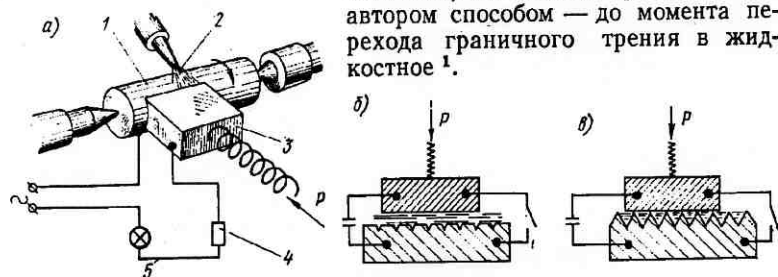


Рис. 78. Схема испытания трущихся поверхностей на приработку

Первый способ недостаточно точен, но осуществим в любых условиях проведения исследований на износ и испытаний, второй — более объективен и точен. Сущность второго способа состоит в том, что испытуемые образцы 1 и 3 (рис. 78, а), электрически связанные с сигнальным устройством 5 и регистрирующим прибором 4, подвергаются трению исследуемого вида в условиях обильной подачи смазывающей жидкости 2 в зону контакта образцов. В начальный момент контакты испытуемых образцов электроцепи сигнального и регистрирующего устройств замкнуты (рис. 78, б), загорается сигнальная лампа, включаются электрочасы. В момент окончания приработки, когда опорные поверхности трущихся образцов настолько возрастут, что исходное давление окажется недостаточным, чтобы прорвать образовавшуюся между ними масляную пленку, контакт между ними нарушается и выключается сигнальная лампа и электрочасы (рис. 78, в).

Исследование прирабатываемости описанным способом производилось на паре полукольцо из бронзы (ОС 5-25) — стальной валик (стали 50 и У10А) диаметром 8 мм на длине 10 мм. Отверстие растачивалось (в кольце) по 6-му классу шероховатости ($Rz_{исх} = 2,6$ мкм); валики обтачивались, шлифовались, доводились, обкатывались и вибронакатывались шаром. Высота перв-

¹ А. с. № 110825.

ностей у образцов, колебалась в пределах 1,2—2 мкм. Испытания производились на специально приспособленном токарном станке по схеме, показанной на рис. 78, а. Образцы — валики устанавливались в центрах без хомутика, а полукольцо — в специальном устройстве, обеспечивающем самоустанавливаемость полукольца относительно валика, и поджималось при помощи тарированной пружины.

Обильная смазка (веретенное масло) подавалось в зону контакта насосом станка. Частота вращения валика составляла 2,1 рад/с, усилие обкатывания 150 Н. Длительность приработки определялась описанным способом, а износ — по изменению массы образцов, высоты исходных неровностей и диаметрального размера образцов.

Результаты исследования иллюстрируются диаграммой (рис. 79). Как видно из диаграммы, длительность приработки образцов, обработанных давлением, существенно меньше, чем обработанных резанием; соответственно и приработочный износ оказался меньше у поверхностей, обработанных давлением.

Если увеличение износостойкости в процессе приработки может быть в какой-то мере объяснено упрочнением поверхностного слоя, то темп приработки в результате упрочнения должен был бы уменьшаться, однако он возрос. Это может быть объяснено преобладающим влиянием микрорельефа и однородности размеров и благоприятной формы неровностей на темп и длительность приработки по сравнению с упрочнением.

Длительность приработки и износ оказались тем меньшими, чем большим был радиус закругления вершин неровностей и выше степень их однородности по высоте. Как видно из рис. 79, длительность приработки и износ в зависимости от способа обработки уменьшаются в такой последовательности: шлифование, точение, обкатывание, вибронакатывание, а значение радиуса закругления вершин микронеровностей возрастает: 16 мкм при шлифовании, 100 мкм при точении, 800 мкм при обкатывании и 4300 мкм при вибронакатывании. В такой же последовательности (если не считать, что однородность шероховатости шлифованной поверхности несколько выше обточенной) располагаются эти поверхности в отношении однородности размеров и формы их неровностей.

Зависимость между сопротивлением схватыванию и различными микрогеометрическими параметрами, в первую очередь характери-

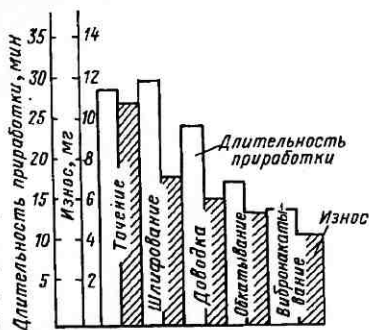


Рис. 79. Зависимость длительности приработки и приработочного износа от способа обработки поверхности

зующими величину опорной поверхности и соответственно величину фактической поверхности контакта прирабатывающихся поверхностей и контактное давление, нелинейна.

На рис. 80 приведен график зависимости сопротивления схватыванию при трении со смазкой и всухую от опорной поверхности¹. Такой характер зависимости и решающее влияние формы и однородности неровностей обусловлены самой природой явления схватывания.

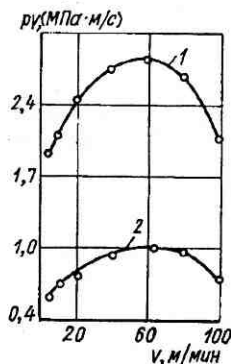


Рис. 80. Зависимость сопротивления схватыванию (зависимость нагрузки при схватывании pv от скорости вибронакатывания v) от микрорельефа трущихся поверхностей: 1 — со смазкой; 2 — всухую

На участках неоднородной по шероховатости поверхности с выступающими заостренными неровностями (с малыми радиусами вершин выступов) возникают огромные по величине контактные давления, что сопровождается выделением большого количества теплоты и приводит к образованию первоначально микроучастка схватывания, лавинно распространяющегося по поверхности трения.

При чрезмерно большой площади контакта высокочистых трущихся поверхностей, отличающихся пониженной маслосемкостью (при работе со смазкой), главную роль начинают играть явления адгезии и молекулярного сцепления. Это подтвердилось результатами исследования и стендовых и ходовых испытаний пар трения двигателей внутреннего сгорания. Так, стендовые и полевые испытания, проведенные Ю. С. Дворяновым на двигателях МСД-14 тракторов Д-75, показали следующее. Гильзы, обработанные вибронакатыванием с последующим

сульфидированием, по сравнению с серийными гильзами прирабатывались в два-три раза быстрее, при этом интенсивность приработочного износа уменьшилась в 1,3—1,5 раза. Оптимальным в отношении прирабатываемости оказался микрорельеф вида I с площадью канавок $F_n = 30 \div 35$ % от всей обработанной вибронакатыванием поверхности.

Все остальные эксплуатационные характеристики двигателя (мощность, компрессия, герметичность сопряжения пары гильза—кольцо, угар масла) сохранялись или несколько улучшались.

Характерно, что во всех случаях независимо от существенно различных схем и условий трения оптимальные значения площади F_n , занимаемой выдавленными канавками, не выходили за пределы 25—45 %. При меньших значениях F_n недостаточна маслосемкость трущихся поверхностей, а при больших — чрезмерно уменьшается их несущая способность.

¹ Исследование выполнено автором совместно с Л. А. Бунгой.

Насколько существенно может влиять на темп и характер приработки оптимизация микрорельефа лишь одной из трущихся поверхностей, видно из сопоставления кривых зависимости износа от времени испытания (рис. 81).

Как видно из рис. 81, в результате создания на внутренней поверхности стального кольца ($HRC\ 61-63$) системы канавок вида II ($F_n = 25\%$) длительность приработки пары кольцо-бегунок резко сократилась, а первоначальный износ латунного бегунка снизился в четыре-пять раз¹.

Для приработочного периода взаимодействия деталей пар трения характерны наиболее тяжелые условия в отношении силы

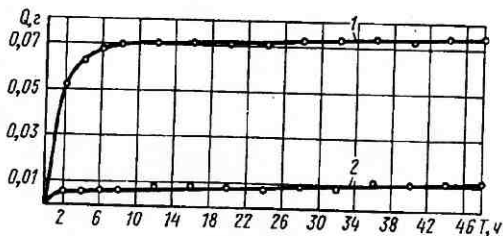


Рис. 81. График зависимости приработки и износа от длительности испытания колец прядильных машин:

1 — полированных; 2 — вибронкатанных

трения, температуры в зоне контакта. Этот период наиболее опасен в отношении появления таких патологических видов трения, как образование на сопрягаемых поверхностях натиров, задиров, их схватывания. Условия дальнейшего, после приработки, взаимодействия контактирующих поверхностей в значительной степени зависят от того: произошла ли она без этих негативных явлений или сопровождалась образованием натиров, задиров или местного схватывания. Результаты многолетних исследований пары гильза—поршневое кольцо двигателей внутреннего сгорания показали, что в первом случае, даже после того, как вибронкатанные канавки «сработались» и исчезли, период нормального износа протекает более спокойно по всем показателям (колебания усилий, коэффициент трения, температура в зоне контакта), чем приработка, сопровождающаяся образованием на поверхностях дефектов.

Именно это определяет большое значение оптимизации исходной (технологической) микрогеометрии поверхностей трения. Это положение иллюстрируется результатами исследования, выполненного В. И. Садовниковым. Сопоставлялись противозадирная стойкость стальных образцов, обработанных шлифованием, элект-

¹ Исследование выполнено автором совместно с Ю. И. Мулиным.

ромеханическим упрочнением и вибронакатыванием с образованием частично регулярного микрорельефа вида I. На рис. 82 приведен график зависимости температуры в зоне трения от нагрузки при различных способах обработки. Из графика видно, что для шлифованной поверхности уже при нагрузке 4,9 МПа наблюдалось явление схватывания, которое сопровождалось мгновенным пикообразным повышением момента трения и температуры в зоне трения. При всех прочих равных условиях испытания (давление, скорость, смазка) у вибронакатанных образцов температура была на 52° ниже, чем у шлифованных образцов.

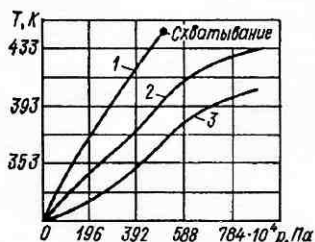


Рис. 82. Зависимость температуры от нагрузки при различных способах финишной обработки:

1 — шлифование; 2 — электрохимическое упрочнение; 3 — вибронакатывание (ступенчатое нагружение по 98 Н через 5 мин при скорости скольжения 0,62 м/с)

Оптимальная зона значений площади канавок, определявшаяся по наименьшей величине силы трения, характеризовалась весьма узким интервалом $F_k = 32 \div 37\%$ (при режиме испытания 7,84 МПа и скорости скольжения 0,25 м/с) и $F_k = 34 \div 39\%$ (при режиме испытания соответственно 9,8 МПа и 0,25 м/с). С повышением нагрузки зона оптимальной площади канавок смещается в направлении увеличения площади, занимаемой канавками. Зависимость силы трения от площади канавок F_k нелинейна и описывается уравнением параболы

$$y = 56,8x^2 - 38,88x + 7,728. \quad (112)$$

Следует отметить, что такой же характер имеют и кривые зависимости износа от площади, занимаемой канавками (см. рис. 74). Несколько необычен характер приработки и микрорельеф приработанной вибронакатанной поверхности металлического контртела (штока или цилиндра), работающего в паре с резиновым элементом гидроуплотнительного узла. Как показали исследования, в этом случае приемлем лишь полностью новый микрорельеф вида IV (схема микрорельефа показана на рис. 83, а) с высотой неровностей 5—7-го классов шероховатости в гидроузлах с рабочим давлением до $2 \cdot 10^7$ Па и скоростью возвратно-поступательного перемещения подвижного элемента до 3 м/мин. В узлах, работающих с большими давлениями и скоростями, шероховатость вибронакатанной поверхности штока снижается до 8—10-го классов ($Ra = 0,63 \div 0,080$ мкм). По сравнению со шлифованными поверхностями тех же классов шероховатости вибронакатанные поверхности отличались во много раз большими радиусами закругления выступов и впадин неровностей, в несколько раз большим их шагом и более высокой степенью однородности по размерам, форме и расположению.

После окончания приработки вибронакатанная поверхность представляет собой систему не касающихся друг друга микровпадин (лунок), расположенных в шахматном порядке, перемежающихся с площадками (рис. 83, б), шероховатость которых в результате приработки не выходит за пределы 12—14-го классов ($Ra = 0,040 \div 0,025$ мкм).

Размеры лунок в зависимости от режима вибронакатывания могут изменяться по длине в пределах 50—1200 мкм, по ширине — 50—700 мкм, по глубине — 0,5—20 мкм, по числу на 1 см² — 100—1200.

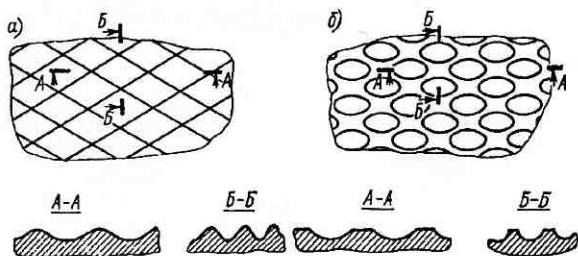


Рис. 83. Схема микрорельефа и профилограммы, снятые в различных сечениях поверхности стального штока: а — до приработки; б — после приработки

С переходом со шлифованных на вибронакатанные штоки при одинаковой шероховатости рабочих поверхностей силы трения в узлах уменьшаются на 20—25 %, а герметичность повышается на 10—18 %. Для выявления зависимости улучшения эксплуатационных свойств гидроузлов от приработки и образующегося при этом микрорельефа, а также от твердости металлического контртела было проведено исследование, результаты которого сводятся к следующему¹:

1) после приработки на поверхности штока образуется равновесный оптимальный микрорельеф, характеризующийся формой, размерами и расположением образующихся после приработки лунок;

2) оптимальный микрорельеф характеризовался числом лунок на 1 см², равным 196, имел длину 230 мкм, ширину 140 мкм, глубину 2,5 мкм; наибольший радиус лунки (вдоль оси штока), равный 11 700 мкм, был близок к диаметру инструмента—шара;

3) параметры образующегося в результате приработки микрорельефа не зависят от поверхностной твердости штока (исследовались штоки твердостью $HV 170—810$);

4) поверхностная твердость штока существенно влияет на длительность приработки его рабочей поверхности (рис. 84);

¹ Исследование выполнено автором совместно с А. Л. Рейнусом.

если окончание приработки штока твердостью $HV 170$ произошло через 2 ч с момента начала испытания, то при твердости $HV 810$ на приработку потребовалось 24 ч.

Исследованием Р. У. Назирова для торцевых уплотнений выявлен оптимальный в отношении гидроплотности и износостойкости микрорельеф, образующийся на вибронакатанной торцевой поверхности металлического уплотнительного кольца после приработки: число лунок порядка $(1 \div 2,5)10^3$ шт/см², занимаемая лунками относительная площадь 35—45 % от номинальной площади

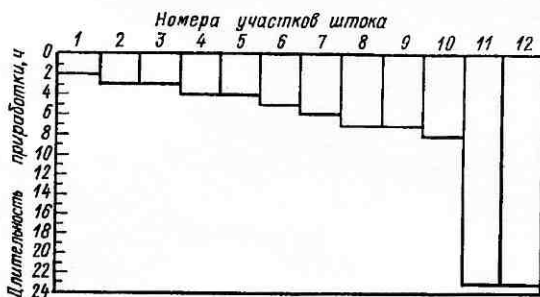


Рис. 84. Зависимость длительности приработки рабочей поверхности штока резино-металлической гидроуплотнительной пары от поверхностной твердости HV его участков:

1 — 170; 2—3 — 180; 4 — 190; 5 — 200; 6 — 230; 7 — 270;
8 — 300; 9 — 330; 10 — 360; 11 — 780; 12 — 810

контакта, глубина лунок 0,8—1,5 мкм. При таких параметрах лунок относительное движение уплотнительных колец обеспечивает непрерывную подачу смазки из лунок, предотвращая разрыв масляной пленки. Между уплотнительными поверхностями образуется множество гидродинамических клиньев, режим трения приближается к гидродинамическому, что и обеспечивает высокую износостойкость сопрягаемых уплотняющих поверхностей.

Повышение гидроплотности уплотнения достигается как дискретностью их расположения, что уменьшает канал сквозных утечек, так и их ориентацией под острым углом к направлению скорости скольжения, что приводит к обратному насосному эффекту за счет действия сил вязкого трения и, как следствие, к уменьшению утечек.

Выявилась необходимость создания различных микрорельефов на разных участках деталей. При исследовании И. А. Хазовым соединения поршень—шатун дизелей типа Ч 8,5/11 оказалось, что в результате приработки в зоне контакта поршневого пальца с шатуном величина Ra поверхности поршневого пальца и втулки шатуна уменьшается, а в отверстии бобышек поршня — увеличивается; шероховатость поверхности поршневого пальца в зоне

бобышек уменьшается (рис. 85). Такой сложный характер изменения микрогеометрии в результате приработки на различных участках одной и той же детали объясняется различными условиями смазки. На основе результатов экспериментальных исследований была выявлена оптимальная «комбинированная» микрогеометрия поверхности поршневого пальца. Участок рабочей поверхности поршневого пальца в зоне контакта с поршнем необходимо обрабатывать вибронакатыванием (микрорельеф вида I, $F_n = 13,7\%$); участок в зоне работы поршневого пальца — выглаживанием алмазным наконечником с шероховатостью поверхности $Ra = 0,10$ мкм. Такая микрогеометрия обеспечивает равномерную без дефектов по всей поверхности пальца приработку и минимальный приработочный износ.

В настоящее время сделаны попытки расчета приработочного износа и определения оптимальных значений геометрических характеристик микрорельефа трущихся поверхностей. Однако, во всех случаях исследователи исходят из моделированных по шероховатости поверхностей, далеко не эквивалентных реальным поверхностям трения, в результате точность расчетов недостаточна. Практически невозможно теоретически определить условия трения, обеспечивающие беззадирную приработку. Основным способом выявления оптимального микрорельефа для нормальной по всем показателям приработки продолжает оставаться эксперимент и стендовые и эксплуатационные испытания. Поскольку при трении со смазкой основными, определяющими условия приработки характеристиками микрорельефа являются несущая способность и маслосъемность, методика выявления оптимального микрорельефа при вибронакатывании строится следующим образом. На образцах или на реальных деталях создается микрорельеф четырех видов (см. рис. 73) с площадью канавок F_n для первых трех видов около 25—30 %, а для четвертого — с высотой неровностей, предусмотренной чертежом. На испытательном стенде или на действующем объекте выявляется наилучший для данных эксплуатационных условий микрорельеф. После этого обрабатывается следующая серия образцов с микрорельефом оптимального вида, с площадью канавок F_n (если наилучшей оказывается поверхность с микрорельефом одного из первых трех видов), равной 30, 40, 50 и 60 %, и выявляется оптимальная маслосъемность поверхности.

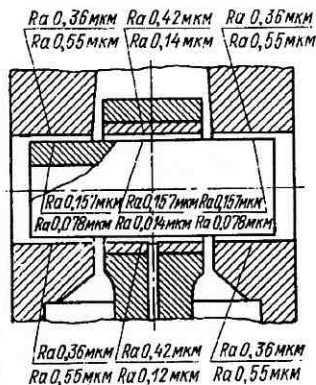


Рис. 85. Шероховатость деталей соединения поршень—шатун дизелей типа Ч 8,5/11 до и после приработки (в числителе исходная шероховатость поверхностей, в знаменателе — после приработки)

Трение и износостойкость. Исходный микрорельеф трущихся поверхностей определяет не только качество, длительность работы и первоначальный износ, но и темп последующего нормального изнашивания. Это обусловлено не только дискретностью контактирования трущихся поверхностей, но связано с решающим влиянием на их изнашивание таких факторов, как несущая поверхность, маслосъемность ее при работе со смазкой, объем и расположение масляных карманов относительно направления трения, способность удерживать твердые частицы, локализуя их действие и снижая абразивный износ. Эти факторы, оказывая решающее влияние на скорость изнашивания, определяют и другие характеристики трения: коэффициент трения, силы внешнего трения при всех видах фрикционных связей (скол, пластическое оттеснение, упругое деформирование, адгезионное и когезионное разрушения).

Высокая степень регулярности микрорельефов, создаваемых вибронакатыванием, облегчает исследование отдельно и в совокупности влияния всех параметров микрогеометрии на все характеристики трения и, в частности, на коэффициент трения, толщину масляной пленки, силы трения, температуру в зоне трения, нормальный износ.

Коэффициент трения. Большое число исследований посвящено выявлению взаимосвязи коэффициента трения с микрогеометрией трущихся поверхностей. Однако практически во всех случаях устанавливались лишь зависимости между коэффициентом трения и высотой неровностей трущихся поверхностей. Это объясняется тем, что применяемые в промышленности способы обработки не обеспечивали возможность варьирования формы и расположения неровностей при одной и той же их высоте в сколь угодно значительных пределах. Даже различие между формой и расположением неровностей, образующихся при различных способах чистовой обработки резанием, в пределах одного и того же класса шероховатости относительно велико.

Значительно отличаются в отношении формы образующихся неровностей способы чистовой обработки давлением — обкатывание роликами и шарами. В то же время известно [4], сколь существенно влияние этих факторов, в частности, на величину коэффициента трения.

Из формулы

$$f = \frac{aA_r}{N} \beta$$

видно, что коэффициент трения пропорционален фактической площади касания (A_r), которая находится в прямой зависимости от отношения радиуса единичного выступа r к максимальной высоте неровностей R_{\max} . При этом чем меньше радиус закругления выступа, тем меньше толщина находящейся на нем смазочной пленки (рис. 86, б). Столь же значительно влияние на коэффициент трения расположения неровностей относительно направления движения

трущихся поверхностей (рис. 86, б). Как видно из графика, коэффициент граничного трения увеличивается с повышением нагрузки, что соответствует условиям смешанного контакта¹.

Коэффициент трения без смазки определялся при испытании пары образцов: втулка из антифрикционного чугуна марки АСЧ-1 ($HRB\ 74-80$) и диск из нормализованной стали 45 ($HRB\ 94-97$) диаметром 40 мм, шириной 12 мм. Поверхность трения валика была обработана шлифованием ($Ra = 0,70 \div 1,25$ мкм), поверхности трения — отверстия втулок — были обработаны растачиванием, развертыванием, протягиванием, вибронакатыванием ($Ra = 1,3 \div 2,0$ мкм) и прошиванием выглаживающей прошивкой ($Ra = 0,63$ мкм).

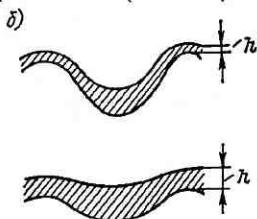
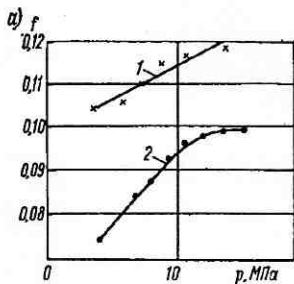


Рис. 86. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки P при совпадении 1 и не совпадении 2 направления следов обработки с направлением движения трения (а) и толщина слоя смазки h при различном радиусе закругления неровностей (б)

Исследование проводилось при давлениях, равных 0,196, 0,294 и 0,392 МПа и постоянной скорости скольжения, равной 0,88 м/с. Момент трения фиксировался при 50 и 100 циклах.

Результаты исследования показаны на рис. 87, из которого видно, что при прочих равных условиях и при одинаковой высоте неровностей существенное влияние на коэффициент трения оказывает их форма, заметно отличающаяся при различных способах обработки. Так, при всех нагрузках наименьший коэффициент трения оказывается у поверхностей, обработанных давлением (прошиванием выглаживающей прошивкой и вибронакатыванием), микрорельеф которых отличается более пологой и обтекаемой формой неровностей и большим шагом их по сравнению с неровностями поверхностей, обработанных резанием.

Если форма неровностей вибронакатанных поверхностей характеризуется углом $\beta = 2 \div 8^\circ$ и радиусом закругления выступов $r = 800 \div 4300$ мкм, то значение этих параметров у обточенных, шлифованных и протянутых поверхностей $\beta = 6 \div 12^\circ$ и $r = 6 \div 10$ мкм. В сотни раз большими у вибронакатанных поверхностей являются и соотношения r/Rz тах, характеризующие фактически поверхность касания трущихся поверхностей.

¹ Исследование выполнено автором совместно с И. М. Голубом.

Близкое к приведенным соотношению значений коэффициента трения было получено у образцов при сходных описанным выше условиям испытаний, но при граничном трении (масло индустриальное 20). Результаты этого исследования приведены в табл. 10. Уменьшение коэффициента трения при работе в условиях граничного трения поверхностей, обработанных давлением, по сравне-

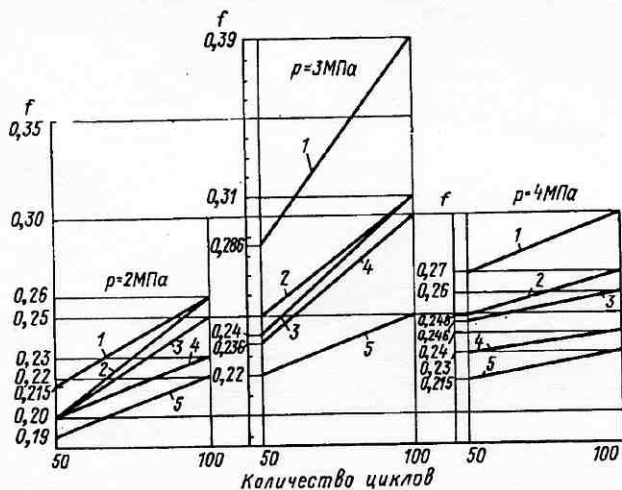


Рис. 87. Зависимость коэффициента трения от нагрузки:
1 — протягивание; 2 — растачивание; 3 — развертывание; 4 — дорно-вание; 5 — вибронакатывание

нию с обработанными резанием объясняется бóльшей маслостойкостью этих поверхностей.

Насколько стабилен характер зависимости коэффициента трения от времени изнашивания различных по материалу пар трения

10. Зависимость коэффициента трения от способа обработки трущейся поверхности, нагрузки и длительности испытания

| Нагрузка, МПа | Количество циклов | Коэффициент трения в зависимости от способа обработки | | | | |
|---------------|-------------------|---|---------------|--------------|------------|------------------|
| | | Растачивание | Развертывание | Протягивание | Прошивание | Вибронакатывание |
| 0,196 | 100 | 0,20 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | 0,16 |
| | 500 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,17 |
| 0,294 | 100 | 0,20 | 0,18 | 0,18 | 0,154 | 0,14 |
| | 500 | 0,185 | 0,18 | 0,18 | 0,156 | 0,15 |
| 0,392 | 100 | 0,16 | 0,173 | 0,16 | 0,153 | 0,155 |
| | 500 | 0,15 | 0,165 | 0,165 | 0,153 | 0,12 |

на коэффициент трения, можно видеть из рис. 88. С увеличением числа циклов испытаний коэффициент трения уменьшается. Испытания с большим числом циклов вначале выявили замедление, а потом прекращение увеличения момента трения, начиная с определенного периода времени, обусловленного частичной или полной приработкой трущихся поверхностей. Однако характерно, что и после приработки и образования близкого к оптимальному для данных условий трения микрорельефа коэффициент трения был во всех случаях меньшим у поверхностей, обработанных давлением (особенно вибронакатанных), по сравнению с обработанными резанием.

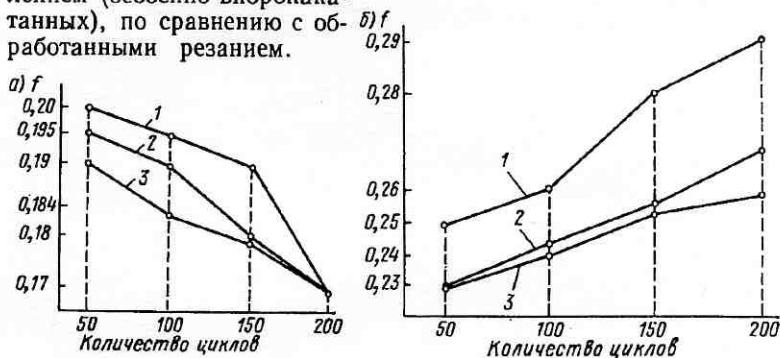


Рис. 88. Зависимость коэффициента трения от числа циклов испытаний и способа обработки одной из трущихся поверхностей пар трения: а — АСЧ-1 — сталь 45; б — СЧ 24-44 — сталь У8А (HRC 52—54):

1 — растачивание; 2 — обкатывание шаром; 3 — вибронакатывание

Более поздние исследования позволили получить формулы для расчета коэффициента трения плоских поверхностей с частично регулярным микрорельефом. Так, О. П. Киракосяном предложена формула

$$f = \frac{\mu u L}{N_{\min}} \left\{ \Phi(x) + \frac{3B}{h_{\min}} \left[\frac{\ln(1+a)}{a} - \frac{2}{2+a} \right] \right\}. \quad (113)$$

Здесь μ — динамическая вязкость смазки; u — скорость скольжения; L , B — размеры подшипника по осям; N_{\min} — минимальная величина контактного давления; h_{\min} — минимальная толщина масляной пленки; $a = (h - h_{\min})/h_{\min}$; где h задается уравнением

$$h = h_0 + h_{\min} + \alpha_1 x + \delta.$$

Здесь h_0 — толщина масляной пленки, равная сумме высот неровностей обеих трущихся поверхностей; α_1 — угол наклона подшип-

ника; δ — абсолютная величина отклонения по плоскостности;
 x — переменная координата

$$\Phi(x) = \int_0^B E(1/H) dx,$$

где $E(1/H)$ — оператор математического ожидания величины $1/H$; H — суммарная толщина масляной пленки.

Получены расчетные формулы коэффициента трения для поверхностей деталей из других материалов и различных условий трения.

Толщина масляной пленки. Толщина масляной пленки между трущимися поверхностями является одним из ос-

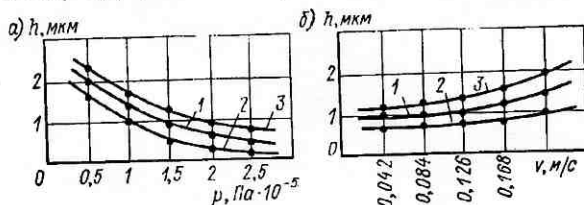


Рис. 89. Зависимость толщины h масляной пленки на плоских поверхностях трения, обработанных шлифованием, фрезерованием и шабрением: а — от нагрузки p (при $v = 0,126$ м/с); б — от скорости v скольжения (при $p = 1,5 \cdot 10^5$ Па):

1 — шлифование; 2 — фрезерование; 3 — шабрение

новных факторов, определяющих все характеристики процесса трения и износа. Исследованиями автора, выполненными в ЛИТМО и в других вузах и НИИ, и промышленной практикой убедительно показано, что создание даже на одной из трущихся поверхностей систем определенным образом регулярно расположенных масляных канавок существенно улучшает условия трения, позволяет управлять этим процессом, обеспечивая образование устойчивого слоя смазки, что повышает работоспособность соединений деталей.

Для выявления зависимости толщины масляной пленки от микрорельефа, образующегося при шлифовании, фрезеровании, шабрении и вибронакатывании, О. П. Киракосяном было выполнено экспериментальное исследование с использованием специальной установки для определения толщины масляной пленки по величине падения на ней электрического напряжения при реверсивном трении [17]. Полное сопротивление измерялось в пределах 0—500 кОм в диапазоне частот 1—150 кГц. Для тарировки была использована предложенная автором схема и устройство¹. Кратко результаты исследования сводятся к следующему. Толщина масляной пленки между трущимися поверхностями при всех способах обработки, в том числе и вибронакатывании, существенно зависит от скорости скольжения и нагрузки (рис. 89). Однако при равных условиях

¹ А. с. № 110825.

реверсивного трения толщина масляной пленки у вибронакатанных образцов в 1,5—2,0 раза больше, чем у образцов, обработанных шлифованием, фрезерованием и шабрением, что обусловлено увеличением маслоемкости и благоприятным, близким к оптимальному, расположением масляных карманов. Как видно из рис. 90, все полученные зависимости имеют экстремальный характер. Это объясняется тем, что при чрезмерном возрастании F_K недопустимо уменьшается площадь контакта трущихся поверхностей.

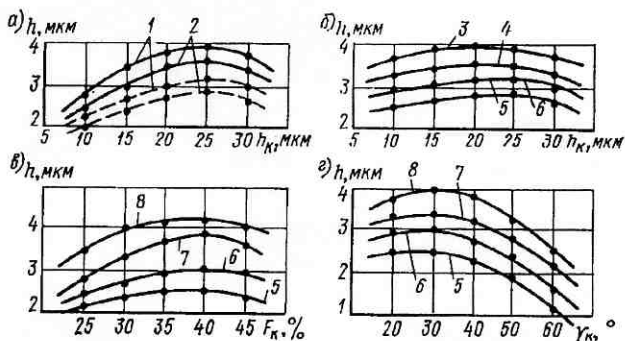


Рис. 90. Зависимости толщины h масляной пленки на плоской поверхности трения с частично регулярным микрорельефом: *а* — от микрорельефа вида II (сплошные кривые) и вида I (штриховые кривые) и от площади F_K , занимаемой канавками; *б* — от глубины h_K канавок ($F_K = 45\%$); *в* — от площади F_K ; *г* — от угла γ_K :

1 — $p = 10^5$ Па; 2 — $p = 1,5 \cdot 10^5$ Па; 3 — $p = 2 \cdot 10^5$ Па; 4 — $p = 2,5 \cdot 10^5$ Па; 5 — $v = 0,084$ м/с; 6 — $v = 0,126$ м/с; 7 — $v = 0,168$ м/с; 8 — $v = 0,21$ м/с

Оптимальным частично регулярным микрорельефом для исследованных условий и режимов реверсивного трения плоских образцов оказался микрорельеф с исходной шероховатостью $Ra = 0,25$ мкм с системой канавок вида II $F_K = 45 \div 48\%$; $\gamma_K = 25 \div 32^\circ$ и $h_K = 22 \div 27$ мкм.

На основе формулы гидродинамической грузоподъемности масляной подушки Митчела, минимальная толщина масляной пленки, обусловленная клиновым действием масляного кармана, может быть рассчитана по формуле

$$h_{\min} = (d_{\text{ш}} h_K)^{0,25} \sqrt{\frac{6\tilde{P}Kv}{N}} T, \quad (114)$$

где $d_{\text{ш}}$ — диаметр деформирующего элемента при вибронакатывании, м; h_K — глубина канавки, мкм; v — скорость скольжения, м/с; N — усредненное контактное давление на подшипник, Па; K — коэффициент, определяющий отношение площади F_K к исходной площади подшипника; \tilde{P} — безразмерный параметр нагрузки; $T = \sqrt{\mu_{50} (50/t)^n}$ — параметр, характеризующий вязкость смазки

в зависимости от ее температуры (здесь μ_{50} — динамическая вязкость смазки при 50 °С, Па·с; t — температура трущихся поверхностей, °С).

Выражение для безразмерного параметра нагрузки

$$\tilde{P} = \left(\frac{h_{\min}}{m} \right)^2 \left(\ln \frac{h_{\kappa}}{h_{\min}} - 2 \frac{m}{n} \right),$$

где $m = h_{\kappa} - h_{\min}$ — разность глубин масляного кармана и толщины масляного слоя, мкм; $n = h_{\kappa} + h_{\min}$ — их сумма.

При обработке вибронакатыванием появляется возможность управления процессом образования масляной пленки между трущимися поверхностями и ее толщиной, а следовательно, и самим процессом трения.

Силы внешнего трения. Исходный микрорельеф трущихся поверхностей влияет на формирование сил внешнего трения на всех этапах — от приработки до окончания нормального износа. Однако в большом числе исследований, выполненных в данной области, формирование сил трения связывалось главным образом лишь с высотой неровностей без учета их формы и взаиморасположения. И в этом случае способ образования регулярного микрорельефа вибронакатыванием позволил более четко и в больших пределах выявить влияние этих факторов на динамические характеристики процесса трения. Ниже приведены результаты лишь некоторых исследований, выполненных автором совместно с А. Н. Кравцовым и А. Л. Рейнусом, на парах трения металл—металл и металл—резина. Исследования выполнялись на маятниковой установке после выявления оптимальных в отношении чувствительности значений нагрузки. Критерием оценки величины сил трения являлась продолжительность колебания маятника с закрепленным на нем цилиндрическим образцом относительно двух образующих призму плоских металлических или резиновых образцов.

Исследованию подвергались в условиях сухого трения пары, состоявшие из цилиндрических образцов из стали 20 диаметром 25 мм, длиной 120 мм и закаленных пластинок из стали У10А (HRC 58—62) и резины размером 60×25×7 мм. Рабочие поверхности цилиндрических образцов обрабатывались: точением (5—7-го классов), шлифованием (6—8-го классов), обкатыванием шаром (6—9-го классов) и вибронакатыванием (5—8-го классов).

Плоские пластинчатые металлические образцы обрабатывались шлифованием по 9-му классу, а резиновые по 8-му. Влияние направления неровностей на силы трения определялось установкой цилиндрических и пластинчатых образцов пары трения таким образом, что неровности их трущихся поверхностей в одном случае совпадали (\parallel), в другом — перекрещивались под углом 90° (\perp), для чего одни пластинчатые образцы шлифовались вдоль их длинной стороны, а другие — вдоль короткой.

Результаты исследования приведены на рис. 91—93. Анализ их позволяет сделать следующие основные выводы.

1. При совпадении направления неровностей трущихся поверхностей при тчении (осо-

бенно при шлифовании) силы трения больше, чем при их перекрещивании, что объясняется большей поверхностью контакта в первом случае. При вибронакатывании (создавался микрорельеф

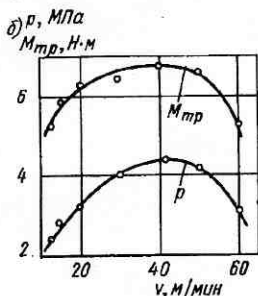
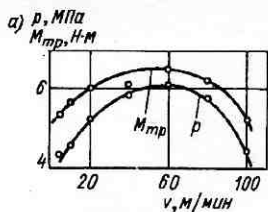


Рис. 91. Зависимость момента трения $M_{тр}$ и давления p от микрорельефа трущихся поверхностей, изменяющегося с изменением скорости вибронакатывания

бенно при шлифовании) силы трения больше, чем при их перекрещивании, что объясняется большей поверхностью контакта в первом случае. При вибронакатывании (создавался микрорельеф вида IV) влияние направления неровностей практически не сказывается, так как поперечная и продольная шероховатости близки друг к другу, а столь четкой направленности неровностей (у поверхностей вида IV), как при других видах обработки, не наблюдается.

2. При совпадении направления неровностей трущихся поверхностей особо четко выявляется нелинейный характер зависимости между силами трения и шероховатостью поверхности. При малой шероховатости поверхности обладают большой несущей способностью, но малой маслосемкостью, при большой — наоборот.

Зависимость между моментом трения, давлением и скоростью вибронакатывания (соотношением опорной поверхности и маслосемкости) плоских торцовых поверхностей, обработанных вибронакатыванием, иллюстрируется рис. 91. С повышением скорости вибронакатывания увеличивается шаг между выдавливаемыми выступами микрорельефа и соответственно уменьшается опорная поверхность, зато возрастает маслосемкость поверхности. Как при граничном (рис. 91, а), так и при сухом

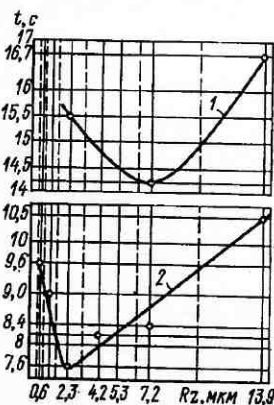


Рис. 92. Зависимость длительности колебания маятника t (силы трения) от высоты неровностей трущихся поверхностей:

1 — пара сталь 20 — сталь У10А (HRC 58—62); 2 — пара сталь 20 — резина

трении (рис. 91, б) имеется оптимальное соотношение между опорной поверхностью и маслосмеккостью, при котором момент трения и давление минимальны.

Экспериментальное выявление оптимума позволяет не только улучшить качество пар трения, но и сделать их более экономичными за счет снижения требований к качеству отделки трущихся поверхностей.

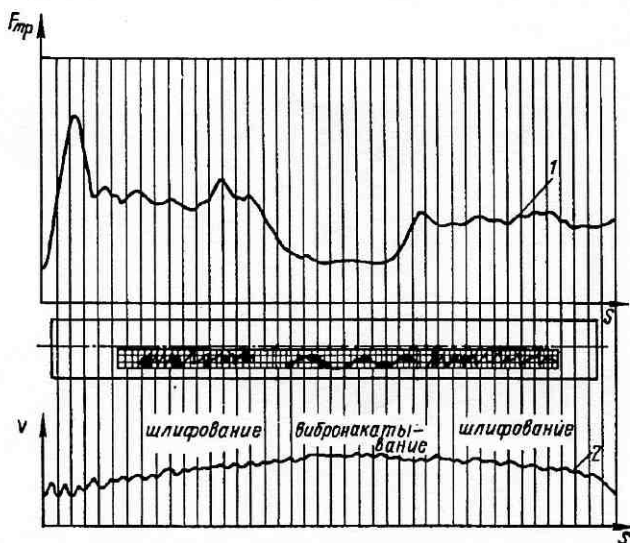


Рис. 93. Зависимость сил трения и скорости относительного перемещения металлического штока и резиновой манжеты гидروطлотнительной пары от микрорельефа рабочей поверхности штока

3. Характер зависимости между силами трения и шероховатостью поверхности пары металл—резина аналогичен зависимости для пары металл—металл (рис. 92). Силы трения при работе пары металл—резина больше, чем при работе пары металл—металл. В резино-металлических парах, так же как и в металлических, условия, соответствующие минимальным силам трения, могут быть созданы при существенно различающейся шероховатости поверхности металлического контртела (например, при 6 или при 9-м классе шероховатости).

4. Влияние микрорельефа поверхности металлического контртела на силы трения и скорость перемещения контртела относительно резиновой манжеты иллюстрируется осциллограммами на рис. 93. Левый участок осциллограммы 1 соответствует перемещению резиновой манжеты по шлифованному участку вала,

средний — по вибронакатанному того же вала и правый — по шлифованному. При переходе со шлифованного на вибронакатанный участок силы трения заметно снижаются и вновь возрастают при переходе на шлифованный участок. Соответственно возросла скорость относительного перемещения вала и манжет при переходе со шлифованного на вибронакатанный участок (осциллограмма 2). Столь заметное влияние формы неровностей поверхности контртела

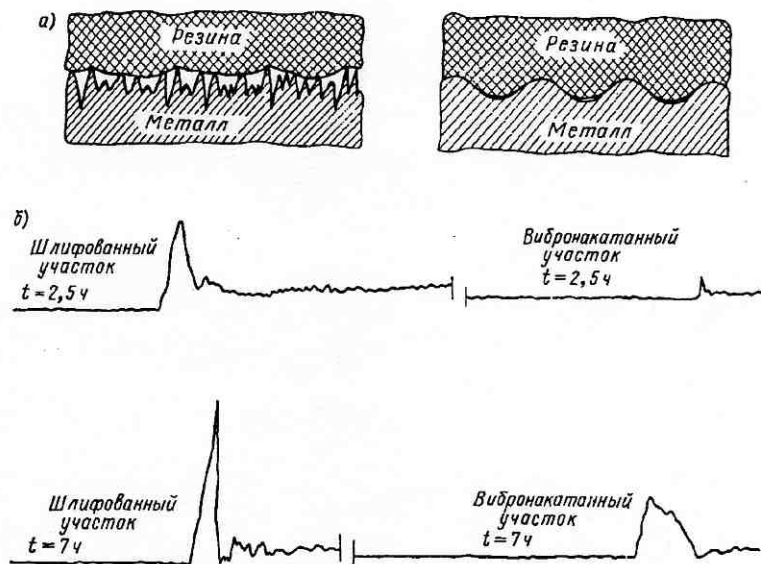


Рис. 94. Схема контактирования резины с поверхностью металлического штока и осциллограммы усилия страгивания резиновой манжеты

на условия трения иллюстрируется схемой контактирования резины со шлифованной и вибронакатанной поверхностями контртела (рис. 94). Радиус закругления вершин неровностей шлифованной поверхности 8-го класса — составлял 10 мкм, а вибронакатанной того же класса — порядка 900 мкм. Если учесть, что однородность неровностей по высоте вибронакатанного вала была минимум на порядок выше, то станет понятным, насколько меньше сопротивление приходится преодолевать резиновой манжете при перемещении по вибронакатанной поверхности по сравнению с перемещением по шлифованной.

5. Решающее влияние оказывает микрорельеф рабочей поверхности штока гидроуплотнительной пары и на усилие, необходимое для начального сдвигания манжеты относительно штока при вылеживании пары (без относительного перемещения), сопро-

вождающимся высыханием смазки, адгезией и другими явлениями, приводящими к резкому увеличению усилия страгивания.

Из сопоставления осциллограмм, приведенных на рис. 94, б, видно, насколько снижается усилие страгивания манжеты по вибронакатанному штоку по сравнению со страгиванием по шлифованному. В этом случае сказывается не только более благоприятная форма выступов неровностей вибронакатанных поверхностей (вид IV), но и их впадин (большой радиус закругления впадин r'), обеспечивающий лучший контакт резины со смазывающим слоем (рис. 94, а).

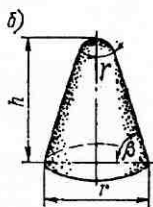
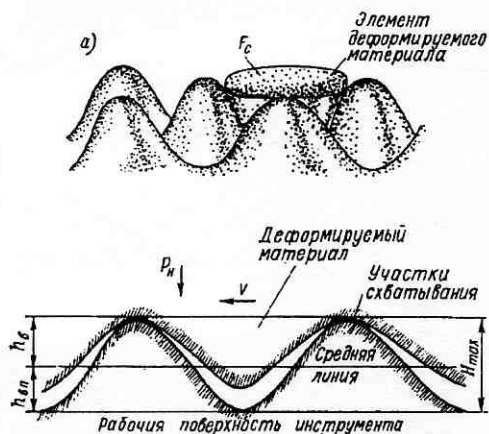


Рис. 95. Схема контактирования поверхностей инструмента и деформируемого материала (а), микровыступ (б)

тали машин и приборов, но и инструмент для холодной обработки металлов давлением.

При выводе расчетного уравнения [11] для процессов выдавливания и прессования (рис. 95, а) пренебрегают деформацией материала инструмента и адгезионной составляющей силы трения, а материал заготовки считают изотропным и идеально пластичным. Тогда сила трения определяется как сумма усилий, необходимых для сдвиговой деформации каждого элемента материала заготовки, заполняющего впадины микрорельефа инструмента

$$T = \tau_{ср} \sum_{i=1}^n F_c = F_c n \tau_{ср}, \quad (115)$$

где $\tau_{ср}$ — прочность материала заготовки на срез, МПа; n — число элементов в контакте; F_c — площадь основания элемента.

Принимая форму микровыступа близкой к конусу с равными углами γ при вершине (рис. 95, б), по методике, предложенной П. Е. Дьяченко, определяют среднюю площадь основания микровыступа

$$F_c = \frac{3}{2} \pi (1.99KRz) \operatorname{tg} \gamma = 18,65 (KRz \operatorname{ctg} \beta)^2, \quad (116)$$

где K — коэффициент заполнения профиля; Rz — средняя высота неровностей; β — угол наклона образующих неровностей.

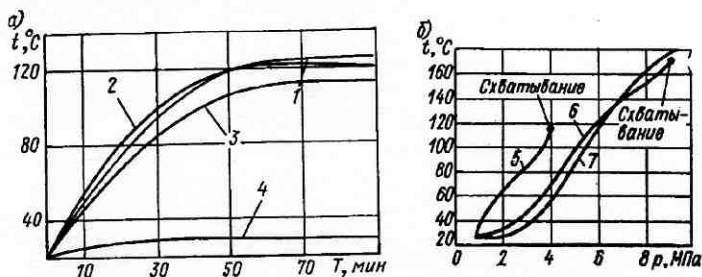


Рис. 96. Зависимость температуры: а — от длительности испытания; б — от давления:

1, 5 — точение; 2 — шлифование; 3, 6 — обкатывание; 4, 7 — вибронакатывание

Тогда сила трения

$$T = 18,65 (KRz \operatorname{ctg} \beta)^2 \pi \tau_{\text{ср}}. \quad (117)$$

Данные расчета силы трения по формуле (117) могут быть использованы как исходные при выборе и проектировании оборудования и оснастки для таких операций холодной обработки металлов давлением, как выдавливание и прессование.

Температура в зоне трения. Практически все явления, сопровождающие процесс трения, во многом обусловлены образующейся теплотой. Поскольку контакт двух трущихся шероховатых поверхностей дискретен, дискретны и очаги образующейся теплоты. При прочих равных условиях интенсивность теплового потока от единичного источника зависит от работы трения и величины площадки, на которой он генерируется. Поэтому форма неровностей контактирующих трущихся поверхностей и степень их однородности не могут не сказаться на интенсивности теплообразования, особенно в период приработки. Если радиус закругления вершин неровностей определяет площадь единичного пятна контакта, то от однородности неровностей по высоте зависит суммарная площадь контакта трущихся поверхностей, постепенно увеличивающаяся по мере приработки. Это иллюстрирует график (рис. 96, а) зависимости температуры от времени испытания в период приработки пар трения (вращающийся вал — неподвижный

вкладыш) в условиях граничного трения. Рабочая поверхность вкладышей была обработана по 7-му классу шероховатости точением, шлифованием, раскатыванием и вибронакатыванием.

Как видно из рис. 96, для пар с обточенными, шлифованными и обкатанными вкладышами характерен интенсивный рост температуры в первый период приработки (50—60 мин с начала испытаний) и намного большее количество образующейся теплоты, чем в зоне трения пары с вибронакатанным вкладышем. Это может быть объяснено значительно большими площадками единичных контактов вследствие несравнимо больших радиусов закруглений вершин неровностей у вибронакатанных поверхностей, а также большей суммарной поверхностью контакта трущихся поверхностей за счет высокой степени однородности неровностей. В результате уже в самый начальный период приработки давления и усилия трения в этом случае намного меньше, чем у пар с обточенными, шлифованными и обкатанными вкладышами.

Исследования, выполненные автором совместно с А. Н. Кравцовым, показали, что влияние микрорельефа трущихся поверхностей на характер и, в частности, на температуру трения тем значительнее, чем тяжелее условия трения.

На рис. 96, б представлены кривые, выражающие зависимость температуры в зоне трения от способа обработки и давления при испытании стальных образцов (сталь 45) диаметром 70 мм. Ролики были обработаны точением, обкатыванием и вибронакатыванием. Испытания проводились при скорости скольжения $v = 0,78$ м/с; давление изменялось — повышалось дискретно через каждые 10 мин; вращающийся образец — ролик был помещен в ванну с машинным маслом. Э. д. с. термопары регистрировалась магнитоэлектрическим гальванометром типа М91/А. При испытании обточенных образцов ($R_z = 8,8$ мкм; $r = 60$ мкм; $F_{оп} = 26$ %) при давлении, равном 0,392 МПа, температура трения достигла 116 °С и произошло схватывание. При испытании обкатанных образцов ($R_z = 3,1$ мкм; $r = 650$ мкм; $F_{оп} = 78$ %) при том же давлении температура трения была значительно ниже (67 °С), а у вибронакатанных ($R_z = 7,5$ мкм; $r = 3200$ мкм; $F_{оп} = 22$ %) составляла 58 °С. При дальнейшем увеличении давления температура обкатанных и вибронакатанных образцов продолжала оставаться близкой, однако при давлении, равном 0,9 МПа, обкатанный вкладыш «схватился» с роликом, а вибронакатанный и при предельном для данной установки давлении, равном 0,1 МПа, продолжал нормально работать при несколько повысившейся температуре трения.

Если причиной схватывания обточенной поверхности могли быть чрезмерно большие контактные давления на заостренных выступах неровностей, о чем свидетельствует и высокая температура трения, то причиной схватывания обкатанной поверхности следует считать чрезмерно большую опорную поверхность ($F_{оп} =$

= 78 %), обусловившую недостаточную ее маслоемкость, ухудшение условий граничного трения — наличие металлического контакта на отдельных участках.

Стендовые испытания реальных пар трения полностью подтвердили приведенные результаты исследований, выполненных на образцах. Влияние микрорельефа на температуру трения оказалось весьма существенным при столь различных схемах и условиях трения, какие имеют место при работе пар: азотированная втулка — ролики, вкладыши—шейка коленчатого вала, прядильное кольцо — бегунок, ролик—резиновая манжета.

Результаты этих испытаний сводятся к следующему.

Создание на наружной цилиндрической поверхности азотированной втулки ($HRC\ 58-62$), контактирующей с роликами диаметром 5 мм, системы масляных каналов (микрорельеф вида III) с площадью канавок $F_n = 42\ %$ привело к устранению имевших до этого место явлений образования натиров, задиров и схватывания. Насколько решающим в данных условиях фактором являлся микрорельеф поверхности, определявший ее маслоемкость и соответственно сопротивление схватыванию, можно судить по следующим данным. Втулки со шлифованной по 8-му классу шероховатости поверхностью (способ чистовой обработки, применявшийся до вибронакатывания) при давлении, равном 0,569 МПа (температура в зоне трения 60 °С), неизменно схватывались с роликами; втулки с вибронакатанной поверхностью при давлении 1,962 МПа (при 106 °С) не схватывались ни разу. При совершенно иной схеме трения, когда бегунок, представляющий собой скобку шириной 1 мм, прижимается к металлическому кольцу нитью и вращается относительно кольца с большой скоростью, создание на рабочей внутренней поверхности кольца системы масляных каналов (микрорельеф вида II, $F_n = 25 \div 28\ %$) приводит к уменьшению температуры трения в среднем на 10 °С (с 57 до 47 °С) и соответственно к значительному уменьшению скорости износа колец.

Образование системы масляных каналов на внутренней рабочей поверхности вкладышей шатунных втулок судовых дизелей (диаметр 75 мм, материал АО 20-1) привело к улучшению условий трения — устранению натиров и задиров и улучшению приработки, что характеризовалось уменьшением температуры трения со 123—125 °С (при работе тонко расточенных втулок) до 112—114 °С. Оптимальным оказался микрорельеф вида II с площадью, занимаемой канавками $F_n = 45 \div 48\ %$, свидетельствующий о том, что тонко расточенные поверхности 8-го класса шероховатости так же, как и раскатанные по 10—12-му классам шероховатости, недостаточно маслоемки.

При испытании резино-металлических уплотнений типа УМА со стальными втулками (сталь 45; $HRC\ 40-45$), обработанными шлифованием по 9-му классу (действующий технологический процесс) и вибронакатыванием по 6 и 7-му классам, выявилось следующее:

1) температура в зоне трения — параметр, наиболее четко отражающий условия трения, их изменение и зависимость от различных факторов и, в частности, от микрорельефа трущихся поверхностей (в данном случае поверхности металлического контртела);

2) форма неровностей металлического контртела в большей степени определяет температуру в зоне трения, чем их высота. Так, если температура в зоне трения пары с чисто шлифованной (9-й класс) втулкой равна 52—54 °С, то с вибронакатанной по 6-му классу шероховатости — 50—52 °С, а по 7-му классу составляет 45—48 °С.

Таким образом, когда температура в зоне трения является не только фактором, характеризующим протекание процесса трения, но и определяет работоспособность пары узла или механизма в целом и ограничивается техническими условиями, микрорельеф трущихся поверхностей должен быть одним из основных параметров, нормируемых конструктором.

С о п р о т и в л е н и е и з н а ш и в а н и ю. Сопротивление материала изнашиванию зависит от большого числа факторов и в первую очередь от конструкции пары трения, схемы и условий ее работы. Поэтому исследование влияния микрорельефа трущихся поверхностей на сопротивление их изнашиванию проводилось автором для самых различных пар и условий.

Износостойкость исследовалась при трении скольжения и трении качения, граничном и сухом трении, поступательном и вращательном относительном движении трущихся деталей, сопряжении трущихся деталей цилиндрической и другой формы, трения металлических деталей, деталей из металла и резины, из металла и пластика.

Укрупненная классификация пар трения, в соответствии с которой проводились исследования, приведена на рис. 97.

Одной из задач исследований являлось доказательство того, что при различных схемах и условиях трения и изнашивания микрорельеф трущихся поверхностей является одним из основных факторов, определяющих сопротивление их износу, а оптимизация его — важнейшим средством повышения износостойкости.

Основные задачи исследования:

1) выявление возможности приближения микрогеометрии поверхностей трения к оптимальным по износостойкости;

2) выявление возможностей повышения износостойкости поверхностей трения за счет образования регулярных микрорельефов.

Методика исследования и выявления оптимальных микрорельефов была аналогична описанной в п. 9.

Граничное трение скольжения. Цилиндрическая пара металл—металл. Вращательное движение. Для большинства случаев работы пар трения металл—металл оптимизация микрорельефа в отношении износостойкости может быть осуществлена экономи-

чески наиболее эффективно за счет образования на поверхностях трения системы масляных канавок. Создание нового микрорельефа вида IV для пар металл—металл не только более трудоемко, но в отдельных случаях и менее эффективно для повышения износостойкости.

Однако с целью выявления влияния таких нестандартных геометрических характеристик, как r , β , r/R max, на износостойкость было проведено сравнительное исследование износостойкости поверхностей, обработанных точением, шлифованием, обкатыванием и вибронакатыванием (вид IV микрорельефа). При одних и тех же классах шероховатости поверхности значения r , β , r/R max, $F_{оп}$ при различных способах обработки колебались в весьма больших пределах (табл. 11).

11. Геометрические характеристики качества поверхностей исследовавшихся образцов

| Вид обработки | Класс шероховатости | Rz , мкм | r , мкм | $\frac{r}{R_{max}}$ | β | r' , мм | σRz | $F_{оп}$, % |
|-----------------------|---------------------|------------|-----------|---------------------|---------|-----------|-------------|--------------|
| Растачивание | 5 | 18,9 | 25 | 1,25 | 38° 2' | 0,11 | 1,8 | — |
| | 6 | 9,6 | 60 | 6,0 | 17° 16' | 0,08 | 1,3 | 26,0 |
| | 7 | 6,25 | 100 | 16,0 | 9° 40' | 0,07 | 0,9 | 29,0 |
| Внутреннее шлифование | 6 | 9,05 | 30 | 3 | 20° 12' | 0,08 | 1,54 | 6,0 |
| | 7 | 5,1 | 80 | 12,7 | 16° 38' | 0,07 | 1,1 | 24,5 |
| Раскатывание | 6 | 9,0 | 200 | 20 | 12° 18' | 0,12 | 0,95 | 51,5 |
| | 7 | 4,8 | 400 | 63 | 10° 53' | 0,11 | 0,72 | 72,5 |
| | 8 | 2,75 | 700 | 215 | 6° 28' | 0,11 | 0,58 | 78,0 |
| | 9 | 1,35 | 900 | 560 | 4° 12' | 0,10 | 0,45 | 86,0 |
| Вибронакатывание | 6 | 8,1 | 2900 | 290 | 2° 28' | 0,6 | 0,65 | 10,2 |
| | 7 | 5,3 | 3200 | 520 | 1° 54' | 0,5 | 0,50 | 14,0 |
| | 8 | 2,85 | 4600 | 1440 | 1° 11' | 0,3 | 0,36 | 23,0 |
| | 9 | 1,25 | 8200 | 5100 | 0° 33' | 0,3 | 3,29 | 36,0 |

Первое исследование¹ пары металл—металл (вращательное движение) проводилось на специальном стенде по схеме неподвижная колодка — вращающийся ролик; вкладыш из стали 45, ролик — из стали У10А (HRC 60—64). Диаметр ролика и отверстия колодки 70 мм; размер колодки по хорде 29 мм, ширина 10,5 мм. Отверстия колодок обрабатывались тонким растачиванием с шероховатостью поверхности 5, 6, 7-го классов, шлифованием — с шероховатостью 6, 7-го классов, обкатыванием — 6, 7, 8, 9-го классов, вибронакатыванием — 6, 7, 8, 9-го классов.

¹ Выполнено автором совместно с А. Н. Кравцовым.

Значения высоты неровностей и других нестандартных геометрических характеристик микрорельефа приведены в табл. 11.

Ролик был обработан шлифованием (8-й класс шероховатости). Изнашивание образцов производилось при скорости скольжения $v = 1,1$ м/с поэтапно в четыре периода. В течение первого периода (27 000 циклов) давление на поверхности трения образцов изменялось соответственно до значений, равных 0,15; 0,18; 0,2 и 0,3 МПа через каждые 3000 циклов. При последующих периодах изнашивания (36 000 циклов каждый) давление было постоянным, равным 0,3 МПа. Общая продолжительность изнашивания равнялась 7,5 ч, или 135 000 циклам.

Для выявления доли влияния на износостойкость характера микрорельефа и упрочнения часть образцов отжигалась. Изнашивание этих образцов производилось при скорости скольжения 0,78 м/с поэтапно в четыре периода. В течение первого периода изнашивания (12 720 циклов) давление менялось так: 0,07; 0,11; 0,177; 0,216 МПа, через каждые 2120 циклов (10 мин). В последующих периодах изнашивания (12 720 циклов каждый, т. е. через 60 мин) давление оставалось постоянным и равнялось 0,22 МПа. Общая продолжительность изнашивания отожженных образцов составляла 4 ч, или 50 880 циклов.

Износ колодок оценивался по потере массы; взвешивание производилось на аналитических весах ВА-200 до и после каждого периода изнашивания. В процессе изнашивания образцов при помощи искусственной термодуговой пары (нихром — константан) производилось измерение температуры в зоне трения неподвижного образца — вкладыша.

Основные результаты исследования сводятся к следующему.

1. Микрорельеф поверхностей, обработанных различными способами с одинаковой высотой неровностей R_a , существенно различается по всем остальным геометрическим характеристикам:

а) наиболее близкие значения высоты неровностей поперечной ($R_{\text{поп}}$) и продольной ($R_{\text{прод}}$) шероховатостей у поверхностей, обработанных вибронакатыванием и шлифованием; у расточенных и раскатанных поверхностей эти значения существенно отличаются, при этом $R_{\text{поп}}$ всегда больше $R_{\text{прод}}$;

б) наименьшее различие в шаге неровностей поперечной и продольной шероховатостей у вибронакатанных поверхностей; у поверхностей, обработанных точением, шлифованием и раскатыванием, шаг неровностей продольной шероховатости намного превышает шаг неровностей поперечной шероховатости;

в) при всех способах обработки радиус закругления вершин неровностей возрастает, а угол наклона образующей уменьшается с уменьшением их высоты;

г) наибольший (минимум на порядок) радиус закругления вершин неровностей и наименьший угол наклона их образующих — у вибронакатанных поверхностей, наименьшие r и β — у шлифованных поверхностей;

д) при одинаковой высоте неровностей наименьшая неоднородность их по высоте была у вибронакатанных поверхностей, наибольшая — у шлифованных;

е) при одинаковой высоте неровностей наибольшая опорная поверхность была у раскатанных поверхностей, наименьшая — у шлифованных.

2. Качественная зависимость между нестандартными геометрическими параметрами и сопротивлением износу такова: сопротивление износу возрастает с увеличением радиуса закругления вершин неровностей, отношения r/R_{\max} , степени однородности и с уменьшением угла наклона образующих неровностей. Так, износостойкость шлифованной поверхности 7-го класса шероховатости, отличающаяся наименьшими значениями r , r/R_{\max} , σ_{R_2} и наибольшим значением β , в 1,2 раза меньше износостойкости расточенной поверхности, в 1,4 раза — раскатанной и в 3,5 раза — вибронакатанной.

3. При приработке качественная зависимость между геометрическими характеристиками микрорельефа и температурой в зоне трения такая же, как между ними и износостойкостью. Температура в зоне трения шлифованной поверхности 7-го класса шероховатости равнялась 124 °С, расточенной — 122,5 °С, раскатанной — 115 °С, а вибронакатанной — лишь 32 °С.

4. Испытания отожженных образцов показали, что упрочнение, сопровождающее процесс обработки металлов давлением, оказывает существенное влияние на условия трения и сопротивление изнашиванию. Так, при вибронакатывании доля влияния на повышение износостойкости оптимизации микрорельефа и упрочнения приближенно равна соответственно 70 и 30 %.

Большой радиус закругления вершин неровностей и малый угол наклона их образующих при высокой степени однородности по высоте способствует предотвращению внедрения их на значительную глубину; в результате почти или полностью отсутствуют микрорезание и глубинное вырывание, наблюдающиеся при контактировании поверхностей с заостренными неоднородными по высоте выступами. Большие радиусы закругления впадин неровностей уменьшают концентрацию напряжений и тем самым повышают сопротивление разрушению поверхности в результате повторного деформирования.

Уменьшение контактных давлений при соприкосновении выступов большого радиуса и в результате уменьшения градиента температуры и напряжений приводит к уменьшению и атомарного износа.

Большой шаг неровностей в сочетании с большим радиусом впадин и значительной поверхностной активностью наклепанного металла на участках впадин обеспечивают не только достаточную маслоемкость поверхности, но и хорошее удержание смазки во впадинах.

Второе исследование цилиндрической пары металл—металл (вращательное движение) ставило целью выявить

возможность повышения износостойкости за счет оптимизации микрорельефа такого весьма склонного к адгезионному износу материала, как титановые сплавы. При этом выявлялась склонность поверхностей с различным микрорельефом к микрорезанию при сборке сопрягаемых деталей и в процессе их эксплуатации при работе на трение. Этот показатель трущихся поверхностей очень важен в точном приборостроении, так как определяет загрязнение узлов и приборов продуктами истирания и износа деталей пары трения. Поэтому в данном исследовании¹ определялся износ как образцов — роликов из титанового сплава (BT1-1), так и контртел — колодок из чугуна СЧ 12-28.

Наружная цилиндрическая поверхность ролика ($d = 47$ мм) обрабатывалась с шероховатостью $Rz = 1,7 \div 3,1$ мкм четырьмя способами: точением, шлифованием, обкатыванием ($P = 294$ Н; $d_{ш} = 15$ мм; $s = 0,097$ мм/об; $n_3 = 84$ рад/с) и вибронакатыванием с образованием микрорельефа вида IV ($n_{дв.х} = 2600$ 1/мин; $l = 1$ мм. Отверстие колодок растачивалось с шероховатостью $Rz = 9$ мкм; ширина колодок равнялась 14 мм, а длина по хорде — 25 мм. Изнашивание образцов производилось при давлении 0,014 МПа и частоте вращения ролика 210 рад/с, при шести циклах по 15 мин каждый.

Наименьшим сопротивлением износу обладают образцы из титанового сплава, обработанные шлифованием; износ шлифованных образцов при 18 000 циклов истирания составил 6 мг, обточенных — 1,4, обкатанных — 0,8 и вибронакатанных — 0,6 мг.

Если принять износ шлифованных образцов за 100 %, то износ обточенных, обкатанных и вибронакатанных равен соответственно 23, 13 и 10 %.

Резко пониженная сопротивляемость износу шлифованных образцов может быть объяснена заостренностью неровностей и высокой степенью их неоднородности, что обусловлено плохой обрабатываемостью титана и его сплавов шлифованием.

Износостойкость образцов, обработанных другими способами, тем больше, чем более пологий профиль имеют неровности их рабочих поверхностей. Фактор микрогеометрии оказался определяющим и в отношении износостойкости чугунных колодок, работавших в паре с титановыми роликами. Большому износу титановых роликов соответствует большой износ испытывавшихся в паре с ними чугунных колодок.

Если за 100 % принять износ колодок, работавших в паре со шлифованными роликами, то износ колодок, работавших в паре с обточенными, обкатанными и вибронакатанными роликами, равен соответственно 20, 10,3 и 8 %.

Таким образом, оптимизация микрорельефа поверхностей деталей из титана и его сплавов обеспечивает не только повышение их износостойкости, но и снижает их «режущую способность», что

¹-Выполнено автором совместно с В. А. Гороховым.

приводит к уменьшению износа работающих с ними в паре контртел из других материалов и к уменьшению загрязнения узлов и приборов как в процессе сборки, так и эксплуатации.

Результаты данного исследования уже реализованы при разработке технологических процессов обработки деталей прецизионных пар из титановых сплавов.

Третье исследование пары трения металл—металл (вращательное движение) ставило целью выявить влияние регулярных микрорельефов созданных на одной из деталей, на износостойкость контртела¹, обработанного разворачиванием, протягиванием режущими и выглаживающими протяжками (дорнова-

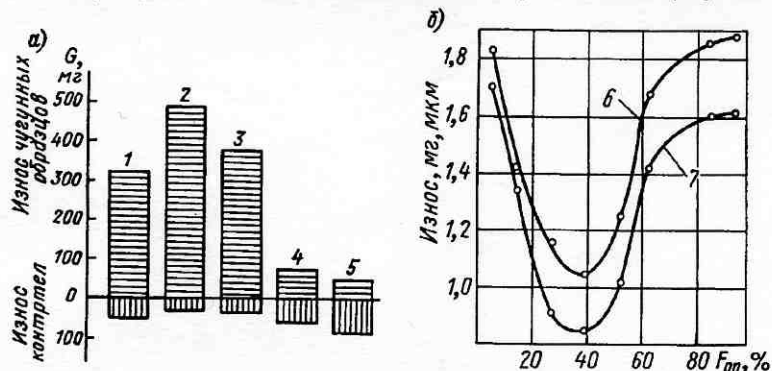


Рис. 98. Зависимость величины износа от способа обработки (а) и от величины опорной поверхности, образованной вибронакатыванием (б):

1 — растачивание; 2 — шлифование; 3 — протягивание; 4 — дорнование; 5 — вибронакатывание; материал контртел — сталь 40Х; 6 — весовой износ; 7 — размерный износ

нием), отличающимися образованием поверхностей с большой опорной площадью. Если в первых двух исследованиях определялась износостойкость стали и титана, то в данном случае — чугуна. Исследовавшиеся пары трения по материалу и условиям истирания были такими же, как подшипниковые пары, используемые в станках, в частности, в токарно-револьверных автоматах типа 1А136, 1А124 и др.

Втулки, из которых готовились колодки шириной 10 мм с длиной по хорде, равной 10 мм, с диаметром отверстия 40 мм, изготовлялись из антифрикционного чугуна АСЧ-1, а ролики — из стали 40.

Истирание производилось со скоростью 1,33 м/с при давлении 0,294 МПа. Первая серия опытов выполнялась с парами, в которых колодки обрабатывались растачиванием, разворачиванием, протягиванием по 6-му классу шероховатости и дорнованием по 7-му классу, а ролики — шлифованием по 8-му классу.

Результаты исследования приведены на рис. 98, а. Анализ

¹ Выполнено автором совместно с М. И. Голубом.

диаграммы свидетельствует о том, что во всех случаях поверхности, обработанные давлением (дорнование, вибронакатывание), обладают большей износостойкостью, чем обработанные резанием (расточивание, развертывание). Чугунные образцы, обработанные дорнованием, изнашивались примерно в шесть раз меньше, чем развернутые, и в четыре раза меньше, чем расточенные; вибронакатанные изнашивались меньше по сравнению с развернутыми и расточенными в десять и семь раз в зависимости от созданного микрорельефа. Это определило необходимость выявления оптимального микрорельефа при вибронакатывании. Кроме того, измерения износа контртела показали, что их износостойкость существенно зависит от микрорельефа контактирующих с ними деталей.

Из всего многообразия возможных микрорельефов, образующихся при вибронакатывании, на основе данных поисковых экспериментов и результатов первой серии исследований были приняты следующие режимы обработки образцов (пять вариантов).

Колодки из чугуна АСЧ-1: 1) $n_3 = 13,125$ рад/с; $s = 1$ мм/об; 2) $n_3 = 5,25$ рад/с; $s = 1,14$ мм/об; 3) $n_3 = 5,25$ рад/с; $s = 0,87$ мм/об; 4) $n_3 = 5,25$ рад/с; $s = 2,08$ мм/об; 5) $n_3 = 2,63$ рад/с; $s = 1,14$ мм/об. Остальные параметры режима вибронакатывания оставались неизменными: $d_m = 8$ мм; $P = 98,1$ Н; $n_{дв. х} = 1400$ 1/мин; $l = 2$ мм. Исходная обработка — протягивание.

Контртела (ролики) из стали 40Х: 1) $n_3 = 13,125$ рад/с; $s = 1,14$ мм/об; 2) $n_3 = 5,25$ рад/с; $s = 1,14$ мм/об; 3) $n_3 = 13,125$ рад/с; $s = 1$ мм/об; 4 и 5) $n_3 = 5,25$ рад/с; $s = 2,08$ мм/об. Остальные параметры режима вибронакатывания те же, что и при обработке колодок. Исходная обработка — шлифование.

Для испытаний контртела были обработаны также шлифованием с шероховатостью поверхности 7, 8 и 9-го классов и обкатыванием шаром диаметром 8 мм с усилием 494 Н.

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы:

1) для пар трения вибронакатанная втулка — шлифованный вал (контртело) и вибронакатанная втулка — обкатанный вал с увеличением шероховатости поверхности вала с 9 по 7-й класс повышает износостойкость обоих образцов пары вследствие увеличения маслостойкости поверхности вала;

2) у пар трения вибронакатанная втулка — обкатанный вал износ меньше, чем у пар вибронакатанная втулка — шлифованный вал. Износ обкатанного вала на 10—15 % меньше износа шлифованного вала. Однако износ вибронакатанного вала при оптимальном микрорельефе был в 1,5 раза меньше износа обкатанного и в 1,7 раза шлифованного.

Таким образом, выявляя оптимальный микрорельеф поверхности не одной, а обеих деталей пар трения при обработке их вибронакатыванием, возможно еще в большей степени оптимизировать условия трения и повысить износостойкость обеих деталей.

Четвертое исследование¹ пары трения металл—металл (вращательное движение) ставило целью выявить возможности повышения износостойкости оптимизацией микрорельефа при вибронакатывании термически обработанных деталей. Критерием оптимальности микрорельефа была принята опорная поверхность $F_{оп}$.

Образцы (ролики) диаметром 11,5 мм изготавливались из стали У10А, закаливались до HRC 60—62 и доводились до 11-го класса шероховатости. После доводки образцы вибронакатывались алмазным наконечником (радиус сферы 2 мм) при следующих постоянных значениях параметров режима: $P = 592$ Н; $s = 2$ мм/об; $n_{дв. х} = 2800$ 1/мин; $l = 2$ мм. Переменным параметром режима, за счет варьирования которого изменялась $F_{оп}$ (от 5 до 85 %), являлась частота вращения заготовки n_s . Контролем была втулка из стали 35. Смазка — веретенное масло. Во всех случаях на образцах создавался микрорельеф вида I.

Результаты исследования зависимости весового и размерного износа от опорной поверхности иллюстрируются рис. 98, б. Нелинейная зависимость между износом и опорной поверхностью оказалась характерной для большинства приводимых ниже случаев, что объясняется обратной зависимостью между величинами опорной поверхности и маслосемкостью поверхности. Как видно из графика, при малой величине опорной поверхности (до 25 %) вследствие больших давлений износ велик; при значениях $F_{оп}$, равных 30—45 %, — минимален, а при больших значениях снова резко возрастает, что объясняется уменьшением маслосемкости поверхности и ухудшением условий работы трения (данные получены при 41,4 тыс. циклов истирания).

Таким образом, варьируя величину опорной поверхности и соответственно маслосемкость трущихся поверхностей при вибронакатывании, становится возможным повысить их износостойкость (в данном исследовании до трех раз по сравнению с доводкой). Одновременно может быть сделан вывод о том, что при доводке, в частности по 11-му классу шероховатости, образуется поверхность, весьма далекая от оптимальной в отношении маслосемкости.

Пятое исследование² пары металл — наплавленный металл восстановленных деталей (вращательное движение) ставило целью выявить оптимальный способ обработки и микрорельеф металла наплавки, а также возможности повышения износостойкости восстановленных пар трения. Сравнительные исследования на изнашивание проводились на парах: восстановленный наплавкой вал — стальная колодка из стали 45; закаленная до HRC 52 и обработанная по 7-му классу шероховатости. Сопоставлялся и материал наплавки: Нп30ХГСА в CO_2 и Нп80 под слоем флюса АН-348 А с легирующими добавками. Сопоставлялись методы об-

¹ Выполнено автором совместно с В. А. Гороховым.

² Выполнено В. И. Садовниковым.

работки валов шлифованием, электромеханическим упрочнением и электромеханическим упрочнением с последующим вибронакатыванием. Такие характеристики наплавов и условия испытаний наиболее близки к технологии обработки восстанавливаемых деталей узлов трения машин для лесной промышленности.

Наибольший ресурс работы показали валы, обработанные по технологической схеме: электромеханическое упрочнение с последующей вибронакаткой и образованием микрорельефа вида I ($F_k = 35\%$); по сравнению с шлифованными их износостойкость была выше в 2,5—3 раза. Особенно велик был износ шлифованных образцов в период приработки; он превышал приработочный износ образцов электроупрочненных с последующим вибронакатыванием в пять—семь раз.

Испытание деталей машин для лесной промышленности, обработанных по новой технологии, в эксплуатационных условиях подтвердило результаты исследований: ресурс работы пар трения с такими валами повышается по сравнению с шлифованными и электроупрочненными в 2—2,5 раза. Исследования на реальных парах машин подтвердили правильность результатов и надежность стендовых исследований. Так, на Горьковском автомобильном заводе совместно с Брянским институтом транспортного машиностроения были проведены 35-часовые сравнительные стендовые испытания¹ по заводской методике шести двигателей ГАЗ 52-04 с парами шейки коленчатого вала — вкладыш. Сопоставлялись износостойкость вкладышей и шеек коленчатого вала при обработке рабочей поверхности вкладышей по действующей на заводе технологии и вибронакатыванием с образованием микрорельефа вида I. За основные параметры, характеризующие микрорельеф, были приняты глубина канавок h_k и длина волны канавки λ . Исследования и испытания выявили оптимальные в отношении образования надежной разделительной масляной пленки и износостойкости значения $h_k = 20 \div 24$ мкм и $\lambda = 2,89 \div 5,78$ мм для шатунных шеек коленчатого вала и $\lambda = 3,59 \div 7,17$ мм — для коренных шеек. Износ вибронакатанных вкладышей снижался в 1,9—2,3 раза, а работавших с ними в паре шеек — в 2,2—3,1 раза. Такие же результаты в отношении износостойкости вибронакатанных вкладышей тракторных двигателей были получены НИИ тракторсельхозмаш на Владимирском тракторном заводе. Перспективность применения процесса вибронакатывания для обработки вкладышей автомобильных и тракторных двигателей безусловна. Целесообразно изменение конструкции вала за счет образования системы канавок на его наружной поверхности в тех случаях, когда обработка вибронакатыванием отверстия затруднительна. При этом характер зависимости износа пары вал—подшипник (см. рис. 74, д) от площади, занимаемой канавками F_k , имеет тот же вид, что и при обра-

¹ Выполнено А. П. Моргаленко и В. А. Беловым.

ботке отверстия, и близкие по величине оптимальные значения $F_k = 30 \div 37 \%$.

Граничное трение скольжения. Цилиндрическая пара металл—металла. Поступательное движение. Были выполнены следующие исследования.

Первое исследование¹ поршневой пары тракторного дизельного двигателя Д-60К ставило целью выявить возможности повышения износостойкости деталей поршневой пары за счет образования микрорельефа рабочей поверхности гильзы. Гильзы цилиндров тракторных двигателей в соответствии с ГОСТ 655—75 изготавливаются из серого перлитного чугуна. После термической обработки (т. в. ч.) твердость внутренней рабочей поверхности на глубине не менее 1,5 мм не ниже HRC 40.

Длительность испытания 56 мото-ч наработки. Для интенсификации изнашивания деталей поршневой пары применялась кварцевая пыль (ТУ 13-101—58). Износ гильз и колец определялся методом искусственных баз прибором УПОИ-6. Лунки вырезались в пяти поясах по восемь в каждом. Замер лунок производился только со снятием головки блока через 10, 26, 36, 46 и 56 мото-ч наработки с момента начала испытания. Температура воды и масла поддерживалась в пределах 80—85 °С.

Загрузка двигателя составляла 118,5—148Н при частоте вращения коленчатого вала в минуту 1570 ± 10 . Полученные результаты испытаний по выявлению оптимального вида микрорельефа иллюстрируются эпюрами на рис. 99. Из эпюр следует, что износ по всем поясам в различных точках по окружности достаточно неравномерен, однако во всех случаях в результате вибронакатывания заметно снижается.

Создание системы канавок любого вида значительно снижает скорость изнашивания хонингованной поверхности 9-го класса шероховатости (в дальнейшем этот вывод подтвердился многократно).

Если принять за 100 % износ гильз, хонингованных в соответствии с действующим технологическим процессом их обработки, то износ вибронакатанных гильз с системой канавок видов III, II и I соответственно был равен 49, 91; 45,78 и 24,08 %.

Для выявления оптимального значения площади, занимаемой канавками F_k , и был выбран микрорельеф вида I с некасающимися друг друга канавками. Исследовались поверхности гильз с площадями канавок, равными 24,3 % ($n_3 = 3,7$ рад/с; $s = 6,08$ мм/об), 32,7 % ($n_3 = 3,73$ рад/с; $s = 5,28$ мм/об), 45,2 % ($n_3 = 2,71$ рад/с; $s = 5,28$ мм/об) и 55,9 % ($n_3 = 2,71$ рад/с; $s = 5,28$ мм/об). Результаты исследования приведены на рис. 100, а (кривая I).

Близкой к оптимальному значению F_k для поршневой пары была площадь канавок, равная 32,7 %.

¹ Выполнено Ю. С. Дворяновым в СибгосНИТИ (научно-исследовательский тракторный институт).

Если относительный износ гильзы с площадью $F_k = 24,3\%$ принять за 100 %, то для площадей, равных 32,7; 45,2 и 55,9 %, износ соответственно равнялся 54,67; 67,5 и 70,83 %. Для данной поршневой пары характерно то, что зависимости между износом

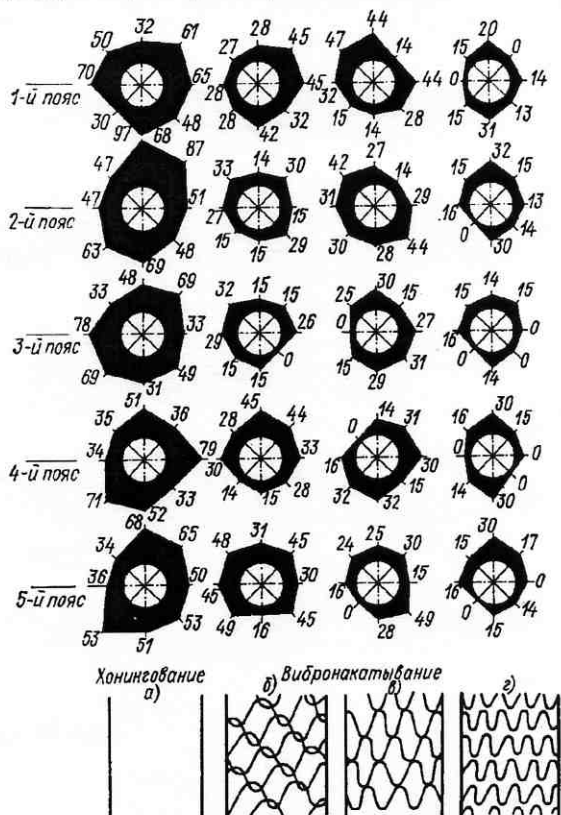


Рис. 99. Эпюры износа (мкм) гильз, обработанных хонингованием (а) и вибронакатыванием с микрорельефами видов III, II и I (соответственно б, в, г)

и площадью F_k для гильз (рис. 100, а, кривая 1) и поршневых колец (рис. 100, а кривая 2) идентичны. Весьма близкие зависимости получены для двигателя ЗИЛ-130 (см. рис. 74, в; 1 — износ гильзы; 2 — износ колец). Во всех случаях при площадях канавок, обеспечивающих минимальный износ гильз, минимальным был и износ работавших с ними в паре поршневых колец, аналогично выше описанной паре шейка коленчатого вала — вкладыш. Это же исследование показало, что увеличение маслосъемности за

счет вибронакатывания позволяет устранить такую дорогостоящую операцию, как сульфидирование (рис. 100, б). Однако, небезразлична последовательность выполнения операций вибронакатывания и сульфидирования. Из рис. 100, б видно, что износ гильз, обработанных вибронакатыванием с последующим сульфидированием (кривая 5), меньше (на 10—12 %), чем износ сульфидированных гильз с последующим вибронакатыванием (кривая 3).

Второе исследование¹ цилиндрической пары металл—металл (поступательное движение) имело целью проверить правильность выводов по первому исследованию о возможности значительного повышения износостойкости гильз поршневой пары путем оптимизации микрорельефа ее рабочей

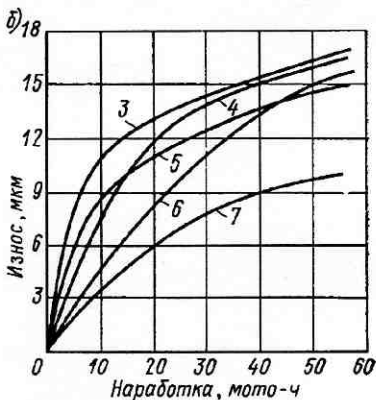
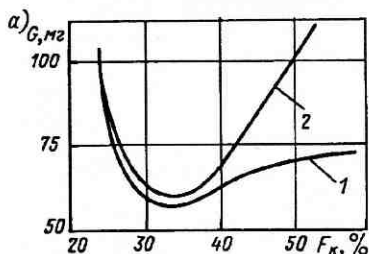


Рис. 100. Зависимость износа от площади F_k вибронакатанных канавок (а) и времени наработки гильз, обработанных различными способами (б):

1 — износ гильз; 2 — износ поршневых колец; 3 — хонингование, сульфидирование и вибронакатывание; 4 — хонингование и сульфидирование; 5 — хонингование, вибронакатывание и сульфидирование; 6 — хонингование; 7 — хонингование и вибронакатывание

поверхности. Это исследование выполнено на гильзах цилиндров двигателя М-412, изготавливаемых из серого чугуна твердостью $HV 197—235$. Оптимальным в отношении износостойкости микрорельефом оказался микрорельеф вида I с площадью, занимаемой выдавленными при вибронакатывании канавками, равной 44,8%. Создание такого микрорельефа приводит к повышению износостойкости гильз по сравнению с хонингованными в 1,5—1,7 раза. Такой вид микрорельефа и площадь F_k канавок образовывались при следующем режиме вибронакатывания: $n_{\text{в}} = 2,63 \text{ рад/с}$; $s = 3 \text{ мм/об}$; $n_{\text{дв. х}} = 1400 \text{ 1/мин}$; $l = 1,38 \text{ мм}$; $d_{\text{ш}} = 7,94 \text{ мм}$; $P = 392 \text{ Н}$.

При этом режиме выдавливалась канавка глубиной 5,5 мкм, форма и размеры которой в сопоставлении с микрорельефом исходной поверхности показаны на профилограмме рис. 67. Увеличение маслосъемности рабочей поверхности гильзы цилиндра за счет образования дополнительной системы канавок — существен-

¹ Выполнено автором совместно с Г. Г. Лебединским и М. Е. Гутиним.

ный резерв повышения их износостойкости. Этот вывод полностью подтвердили ходовые испытания двигателей.

Износостойкость деталей трущихся пар может быть повышена путем подбора материала деталей пар и, в частности, материала гильзы. Разработанный в НАМИ хромо-кремнистый сплав для гильз оказался исключительно износостойким. Гильзы двигателей ЗИЛ-130, ГАЗ-53 и ЯМЗ из этого сплава обладали износостойкостью, соответствующей пробегу 300 000—400 000 км. Однако выявилась и чрезвычайно плохая прирабатываемость этого сплава вследствие склонности к адгезии. Первые уже испытания гильз различных двигателей, на рабочей поверхности которых создавалась вибронакатыванием система масляных канавок любого из трех первых видов, показали хорошие результаты в отношении прирабатываемости. Наилучшим микрорельефом оказался хонингованный с наложением канавок вида II — с касающимися канавками, занимающими площадь, равную 40—50 %, глубина которых составляла 0,01—0,014 мм¹.

По-видимому, при таком виде микрорельефа обеспечиваются наилучшие условия для перетекания масла и равномерного его распределения по поверхности в зоне трения; однако решающим фактором, определяющим улучшение прирабатываемости, является увеличение маслостойкости поверхности. В течение двух лет НАМИ совместно с ЛИТМО проводились стендовые и ходовые испытания двигателей с гильзами из хромо-кремнистого сплава, обработанными вибронакатыванием. При этом выявилось влияние нового микрорельефа не только на прирабатываемость, но и на другие характеристики работы поршневой пары и двигателей в целом. Некоторые результаты испытаний приведены в табл. 12.

Анализ данных табл. 12 свидетельствует о том, что создание системы канавок и увеличение маслостойкости рабочей поверхности гильз надежно повышают противозадирные свойства поверхностей деталей, изготовленных из металлов, даже наиболее склонных к образованию поверхностных дефектов и схватыванию, особенно в приработочный период работы пары трения. Как видно из табл. 12, создание системы смазочных канавок на рабочих поверхностях гильз приводит и к заметному повышению их износостойкости.

Расход масла, по результатам стендовых и ходовых испытаний двигателей ГАЗ-21, ЗИЛ-130 и ЯМЗ-236, не изменился. Особо ощутимым оказался эффект повышения износостойкости в результате создания системы масляных карманов (вид I, $F_n = 45\%$) на рабочей поверхности гильз двигателей ЗИЛ-130, испытывавшихся на машинах дальнего рейса. Износ гильз и колец измерялся через 5, 10, 15 и 35 тыс. км пробега. Износостойкость вибронакатанных гильз по сравнению с хонингованными оказалась выше в 1,5—2 раза, а колец — в 2,5—3,5 раза.

¹ А. с. № 300647.

Применение вибронакатывания оказалось эффективным также для предотвращения появления натиров и задиров на поверхности юбки поршня¹ и шатунных втулок² двигателей.

12. Результаты испытания различных двигателей с вибронакатанными гильзами из различных металлов

| Марка двигателя | Гильза цилиндра | | Режим вибронакатывания | | | | | |
|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|----------|-------|---------------------|------|-------------------------|
| | d, мм | Материал | n _з , рад/с | s, мм/об | l, мм | d _ш , мм | P, Н | n _{дв} х-1/мин |
| ЯМЗ-236 | 130 | Хромо-кремнистый сплав | 119,38 | 1,56 | 1 | 4 | 343 | 1400 |
| ЗИЛ-130 | 100 | То же | 119,38 | 1,74 | 1 | 4 | 343 | 1400 |
| ГАЗ-21 | 92 | » | 119,38 | 1,56 | 1 | 4 | 343 | 1400 |
| М-412 | 82 | Серый чугун | 238,75 | 3 | 1,38 | 7,94 | 392 | 1400 |
| ЗИЛ-130 | 100 | То же | 191,0 | 2,08 | 1 | 4 | 343 | 1400 |
| Д-60К | — | Чугун СЧ 21—40 | 339,03 | 5,28 | 1 | 3,15 | 687 | 2800 |

| Марка двигателя | Глубина канавки, мм | Шаг волнистости канавки, мм | Вид микро-рельефа | Площадь, занимаемая канавкой, % | Объем канавок, мм ³ | Эффект применения вибронакатывания |
|-----------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| ЯМЗ-236 | 0,0129 | 3,58 | 11 | 37,6 | 0,003062 | Устранение задиров, натиров, схватывания |
| ЗИЛ-130 | 0,008 | 2,73 | 11 | 34,8 | 0,001858 | То же |
| ГАЗ-21 | 0,0095 | 2,565 | 11 | 39,7 | 0,002398 | » |
| М-412 | 0,0055 | 4,604 | 1 | 44,8 | 0,001600 | Увеличение износостойкости в 1,5—1,7 раза |
| ЗИЛ-130 | 0,020 | 4,43 | 1 | 35,6 | 0,004734 | То же в 1,4—1,6 раза |
| Д-60К | 0,020 | — | 1 | 32,7 | — | То же в 1,5—1,8 раза |

Третье исследование³ пары гильза — поршневое кольцо (поступательное движение) ставило целью выявить величину пускового и основного износа и противозадирные свойства как вибронакатанных гильз, так и работающих с ними в паре компрессионных и масляесъемных колец. Исследования и испытания проводились на двигателях ЗИЛ-130. Приводим лишь основные результаты исследований и испытаний:

¹ А. с. № 300647.

² А. с. № 315814.

³ Выполнено В. С. Иваненко.

1) при одинаковой площади, занимаемой канавками, большое влияние на темп износа деталей цилиндрической группы ДВС оказывает объем канавок: с увеличением объема пропорционально (в 1,6—3,5 раза) повышается износостойкость гильз, однако, начиная с определенной величины объема канавок, износостойкость снижается. Оптимальным оказался частично регулярный микрорельеф вида I $F_R = 32 \div 34 \%$; объемом канавок $V_K = 317 \div 324 \text{ мм}^3$, углом сетки $\alpha = 24^\circ$;

2) при оптимальных значениях параметров микрорельефа износостойкость вибронакатанных гильз по сравнению с обработанными по действующей технологии повышается на 60—90 %, компрессионных колец на 100 %, маслосъемных — на 30—50 %, поршня — на 30—40 %, при этом пусковой износ снижается в два-три раза; во всех случаях большое влияние на приработку и износ оказывает угол сетки α и наличие наплывов;

3) выяснилось, что интенсивный износ гильз цилиндров в период пуска и прогрева не происходит, так, пусковой износ за 120 запусков при температуре 20°C для серийных гильз составил 16 мкм, что составляет примерно 12,5 % от общих эксплуатационных износов;

4) влияние систем канавок на рабочей поверхности гильзы на эксплуатационные свойства ДВС: а) динамические и экономические показатели сохраняются неизменными; б) заметного изменения компрессии в цилиндрах не обнаружено; в) увеличение прорыва газа отсутствует (в пределах 18—22 л/мин); г) угар масла при снятых наплывах остается в пределах нормы (0,4—0,5 от объема израсходованного топлива).

Практически впервые было выявлено ухудшение прирабатываемости и увеличение прорыва газов как следствие наплывов, образующихся по краям выдавливаемых на поверхности гильзы, канавок. Улучшение прирабатываемости и исключение патологических видов износа (образование натиров, задиров, схватывания) за счет наплывов, по-видимому, имеет место лишь при контактировании металлов близких по твердости, при относительно значительных допустимых зазорах, при трении поверхностей с устойчивой разделительной смазочной пленкой. Поэтому, как показали результаты третьего исследования в каждом отдельном случае необходимо опытным путем устанавливать допустимость оставления на поверхности с частично регулярным микрорельефом наплывов или удаления их методами резания (притирка, доводка) или пластическим деформированием (гладким обкатыванием роликом или шаром), при котором металл наплывов частично «закатывается» во впадины исходного микрорельефа, частично — в выдавленные канавки.

Высота наплывов h_n определяется величиной усилия вдавливания деформирующего элемента в обрабатываемую поверхность P , диаметром обрабатываемой заготовки d_3 , радиусом сферы деформирующего элемента $d_{ш}$, пластичностью обрабатываемого мате-

риала. Экспериментально выявленные значения h_n для различных реальных деталей инструмента приведены в табл. 13.

Высота наплывов h_n (мкм) может быть с некоторым приближением рассчитана по эмпирической формуле В. С. Иваненко

$$h_n = 217,41 \frac{P}{HBd_3} \quad (118)$$

Глубину канавки h_k (мкм) можно рассчитать по формуле

$$h_k = 381,58d_3 \left(\frac{P}{HBd_{III}^2} \right)^{0,977} \quad (119)$$

Ниже приведены лишь возможные варианты изменения размеров заготовок при вибронакатывании, связанные с образованием

13. Глубина выдавливаемых канавок и высота наплывов, образующихся при вибронакатывании

| Наименование детали или образца | Диаметр обрабатываемой поверхности, мм | Марка материала образца | Радиус шара или алмаза, мм | P, Н | h_k^* мкм | h_n^* мкм |
|--|--|-------------------------|----------------------------|------|-------------|-------------|
| Крутильное кольцо KB-58 | 58 | Сталь 45 | 392 | 392 | 10 | 6 |
| То же | 58 | Сталь 45 | 4,03 | 392 | 5 | 2,3 |
| Крутильное кольцо KB-62 | 62 | Сталь 4X13 | 1,9 | 392 | 7,5 | 4,0 |
| Корпус каретки вертикального суппорта токарного автомата | 30 | СЧ 32-52 | 3,02 | 392 | 8,9 | 3,5 |
| То же | 35 | СЧ 32-52 | 2,75 | 392 | 10,4 | 4,6 |
| » | 30 | СЧ 32-52 | 2,0 | 392 | 10,7 | 4,7 |
| Ось гониометра ГУР-5 | 32 | Сталь ХВГ | 1,4 | 245 | 4,9 | 2,2 |
| Направляющие колонки штампов | 40 | Сталь X12 | 1,2 | 196 | 2,7 | 1,1 |
| То же | 40 | Сталь ШХ15 | 1,2 | 196 | 2,75 | 1,2 |
| Втулка направляющих колонок | 40 | Сталь X12 | 1,2 | 196 | 1,9 | 0,53 |
| То же | 40 | Сталь ШХ15 | 1,2 | 196 | 1,9 | 0,53 |
| Калибр-пробка | 35 | Сталь У12А | 1,2 | 245 | 3,1 | 1,27 |
| » | 27 | Сталь У12А | 1,2 | 245 | 3,1 | 1,32 |
| » | 23 | Сталь У12А | 1,2 | 245 | 3,2 | 1,7 |
| » | 6 | Сталь У10А | 1,5 | 245 | 2,5 | 1,4 |

наплывов по краям канавок частично регулярного микрорельефа (рис. 101). Как видно из рис. 101, изменение размера зависит от соотношения высот неровностей исходной поверхности и наплывов. Микрорельефы видов I и II образуются при вибронакатывании с относительно малыми усилиями. В этом случае выдавленный из впадин металл образует наплывы по высоте, не выходящие за пределы высот неровностей исходной под вибронакатывание по-

верхности (вид I) или равные по высоте (вид II); размер и форма заготовки не изменяются. Близкое к такому соотношению имеет место при вибронакатывании закаленных гильз дизелей на ЯМЗ на специальном полуавтомате, работающем по схеме на рис. 11, б. Такого вида микрорельефы могут создаваться как при вибронакатывании грубо обработанных исходных поверхностей 4 и 5-го классов термически необработанных заготовок, так и тщательно обработанных по 7—9-му классам, закаленных или азотированных. В первом случае при выдавливании даже относительно глубоких канавок образующиеся напльвы меньше или равны по высоте исходным неровностям, во втором — малы неровности

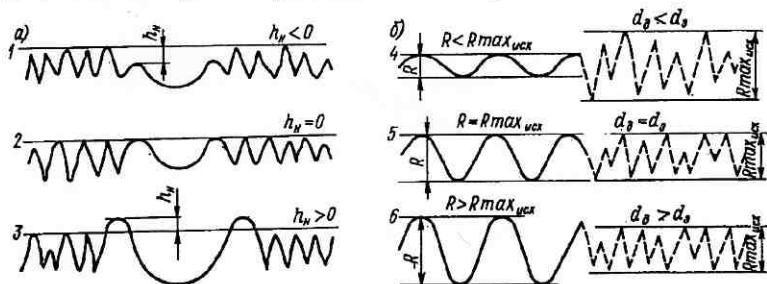


Рис. 101. Изменение размеров при образовании частично регулярного (а) и регулярного (б) микрорельефов

исходной поверхности, но соответственно мала и глубина выдавливаемых канавок. Установленная пока опытным путем глубина канавок, выдавливаемых на термически необработанных сталях и цветных металлах (на трущихся поверхностях), не превышает 18—25 мкм, а на термически обработанных сталях — 3÷5 мкм.

В табл. 13 приведены значения глубин канавок и высот напльвов, образующихся при вибронакатывании деталей из различных металлов в зависимости от назначения этого процесса. Таким образом, при образовании микрорельефов видов I и II изменение размеров и формы заготовок можно не учитывать.

При образовании микрорельефа вида III, когда высота напльвов превышает высоту максимальных по высоте неровностей, определяющих размер заготовки, пренебрегать изменением размера допустимо лишь в тех случаях, когда размер обработанной детали не выходит за пределы поля допуска. Вероятность сохранения размера в пределах допуска тем больше, чем больше размер обрабатываемой поверхности и ниже его точность, чем грубее предварительная обработка под вибронакатывание и меньше глубина выдавливаемых канавок.

Так, лишь в двух случаях после вибронакатывания пришлось производить доводку: при обработке вала прецизионной пары, допуск на размер которого (\varnothing 30 мм) составлял 0,0015 мм, а высота

образовавшихся наплывов была порядка 1—1,5 мкм, и калибров 1-го класса точности.

При образовании полностью нового микрорельефа, когда на обработанной поверхности не остается участков с исходной подвиброакатывание поверхностью (вид IV), размер заготовки может уменьшиться, остаться неизменным (теоретически) или увеличиться (рис. 101, б).

Уменьшение размера происходит в результате выглаживания исходной поверхности за счет заполнения металлом выступов исходной поверхности, смежных с выступами впадин (вид IV, рис. 101, б).

Уменьшение размера заготовки происходит при вибронакатывании с усилиями, не выходящими за пределы значений, соответствующих левой ветви кривой (до точки К) на рис. 64.

При вибронакатывании с усилиями, превышающими эти значения (правая ветвь от точки К, рис. 64), происходит выдавливание металла выше уровня максимальных микронеровностей исходной поверхности и увеличение размера заготовки (рис. 101, б). Так же, как уменьшение, увеличение размера заготовки зависит от усилия вибронакатывания и пластичности обрабатываемого металла. Вероятность сохранения размера в пределах допуска тем больше, чем больше размер обрабатываемой поверхности и соответственно величина поля допуска, чем ниже ее точность, чем грубее исходная поверхность и чем меньше высота выдавливаемых выступов микрорельефа.

В подавляющем большинстве случаев практики при образовании вибронакатыванием полностью новых микрорельефов размеры окончательно обработанных по чертежу деталей остаются в пределах поля допуска. Форма и волнистость обрабатываемых вибронакатыванием поверхностей как при обкатывании [18] изменяются незначительно, лишь в пределах остаточной деформации. Таким образом, заготовки под вибронакатывание должны обрабатываться окончательно под размер, при этом точность формы и волнистость должны быть обеспечены предварительной обработкой в соответствии с требованиями чертежа. Когда изменение размера в результате вибронакатывания выводит деталь из поля допуска, величина припуска на последующую обработку может быть выявлена опытным путем. Высота наплывов в этом случае не превышает 0,5—1,5 мкм (см. рис. 11, а).

При вибронакатывании поверхностей с частично или полностью регулярным микрорельефом с усилиями вдавливания деформирующего элемента, значения которых лежат на правой ветви кривой от точки К (см. рис. 64), возможно применение этого способа обработки с целью восстановления размеров деталей в пределах 8—10 мкм (на диаметр) термически необработанных сталей и цветных металлов и 4—6 мкм — закаленных сталей твердостью до HRC 60. При этом форма деталей в осевом и радиальном сечениях остается практически неизменной. Известно использование способа вибро-

накатывания для восстановления деталей, в частности, типа прецизионных закаленных валов и измерительных калибров-пробок.

Четвертое исследование цилиндрической пары металл—металл (поступательное движение) ставило целью выявить эффективность применения способа вибронакатывания для улучшения условий трения и повышения износостойкости закаленных

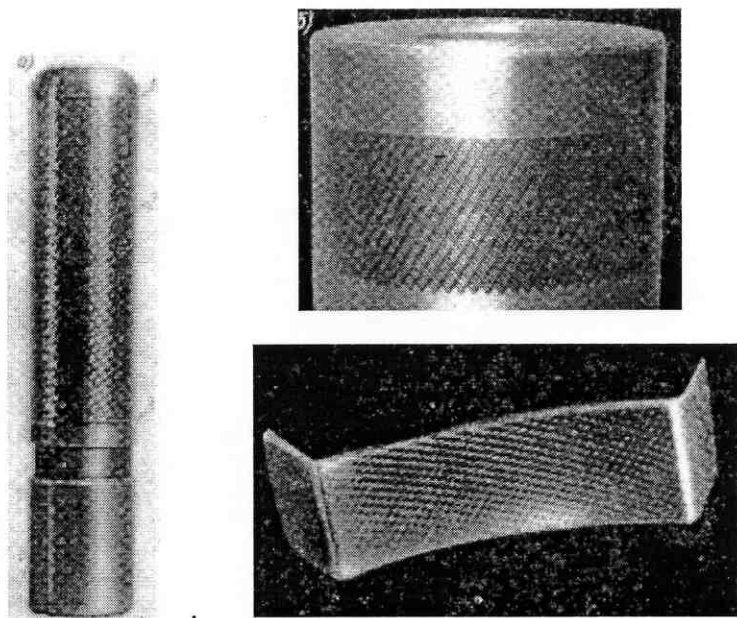


Рис. 102. Вибронакатанные поверхности с микрорельефом: *а* — вида III (2) и круговыми канавками (1 и 3); *б* — вида IV

деталей пар трения, с малыми зазорами и плохой смазкой (эпизодическая, осуществляемая вручную). Объектом исследования была пара направляющая колонка—втулка вырубных штампов (рис. 102, *а*). Вибронакатывалась наружная рабочая поверхность колонок диаметром 12; 22 и 40 мм из стали У10А. Поскольку после термической обработки твердость была высокой ($HRC\ 61-63$), испытывались два варианта технологического процесса: 1) вибронакатывание до термической обработки и до шлифования с выдавливанием шаром глубоких канавок с учетом припуска на шлифование после термической обработки; 2) вибронакатывание после термической обработки и шлифования с выдавливанием канавки алмазным наконечником.

Оба варианта оказались приемлемыми для производства. Во втором случае при соединении пары колонка—штулка с малыми зазорами (3—1 мкм) необходимо перед сборкой производить нетрудоемкую доводку для снятия образующихся по краям канавки наплывов. Помимо системы вибронакатанных канавок с двух сторон выдавливались две круговые канавки, в которые «вливались» вибронакатанные канавки, образуя замкнутую систему смазки. Круговые канавки выдавливались тем же шаром или алмазным наконечником, что и при вибронакатывании, с одной установки. Испытание вибронакатанных колонок производилось при работе вырубных штампов на прессах. Наилучшим оказался микрорельеф вида II с площадью канавок 45—50 %. При вибронакатывании шаром колонки диаметром 22,4 мм это достигалось при следующем режиме: $n_s = 16,8$ рад/с; $s = 1,4$ мм/об; $n_{дв.х} = 4200$ 1/мин; $l = 1,45$ мм; $d_{ш} = 5,5$ мм; $P = 981$ Н. При этом режиме глубина канавки была равна 0,2 мм; после шлифования глубина канавки уменьшалась до 0,05 мм. Образование системы канавок и двух круговых канавок требовало не более 40 с машинного времени.

При сравнительных испытаниях два штампа с обычными шлифованными колонками вырубili из листовой трансформаторной стали соответственно 233 000 и 245 000 Ш-образных пластин до переточки матриц; штампы с вибронакатанными колонками вырубili 420 000 деталей каждый и не имели следов износа или повреждений. При этом шлифованные колонки смазывались через каждые 3 ч, а вибронакатанные — один раз за смену. По-видимому, в данном случае решающую роль играет улучшение условий смазки.

Граничное трение скольжения. Цилиндрическая пара резина—металл. Вращательное движение. Резино-металлические уплотнения — один из широко применяемых, весьма ответственных узлов современных машин, аппаратов и приборов. От качества уплотнений во многом зависит срок службы машин и приборов, их надежность в эксплуатации. Потеря смазки, ее загрязнение приводят к ухудшению теплообмена, к возникновению сухого трения и в результате к ускоренному износу деталей. Поэтому повышение надежности, удлинение срока службы уплотнений — важная для промышленности задача. Одно из направлений решения этой задачи, в частности для уплотнений вращающихся валов, повышение гладкости их рабочих поверхностей, контактирующих с резиновыми манжетами, увеличение твердости за счет термической обработки и хромирования.

Однако все эти конструктивные изменения, удорожающие и повышающие трудоемкость изготовления валов, не являются радикальными и в большинстве случаев малоэффективны. Это относится и к весьма распространенному уплотнению при помощи резиновых манжет типа УМА, которое и было принято как объект исследования¹, ставившего целью выявить возможность улучше-

¹ Выполнено автором совместно с Г. А. Бунгой.

ния качества и в первую очередь износостойкости этих уплотнений за счет оптимизации микрорельефа рабочей поверхности вращающегося вала (в данном уплотнении подманжетной втулки). Втулка диаметром 65 мм изготавливалась из стали 45 (НВ 229) и подвергалась опытной обработке на участке длиной 27 мм с исходной под вибронакатывание шероховатостью 5—6-го классов. В соответствии с описанной методикой первоначально выявлялся наилучший вид микрорельефа.

Таким оказался полностью новый микрорельеф вида IV (рис. 102, б).

По-видимому, это определяется особенностью контактирования резины с металлом по сравнению с контактированием металлических деталей. Относительно острые кромки канавок (первоначально ограниченные с обеих сторон

напльвами) и особенно узлы в местах касания и пересечения канавок микрорельефов видов II и III затрудняют «обтекание» резиной вибронакатанной поверхности и приводят к увеличению контактных давлений на данных участках. Поэтому в дальнейшем исследование проводилось лишь на втулках с вибронакатанным микрорельефом вида IV.

В табл. 14 приведены экспериментальные режимы вибронакатывания подманжетных втулок, позволившие создать гамму микрорельефов, из которых и был выявлен наилучший по износостойкости и гидроплотности. Как видно из табл. 14, варьировались значения как динамических ($d_{ш}$, P), так и кинематических (n_3) параметров режима вибронакатывания, а также исходная шероховатость поверхности. В результате шероховатость вибронакатанных поверхностей изменялась в больших пределах — от 5 до 10-го классов.

Испытания производились на специальном стенде ДонугИ (Донецкий научно-исследовательский угольный институт), на котором испытывались одновременно десять уплотнительных пар; в камеру подавалось масло (индустриальное 45) под давлением 0,4 МПа. На стенде измерялся износ, момент трения, потребляемая мощность, температурный режим и утечка масла; определялась также установившаяся температура нагрева уплотнительной кромки манжеты и температура зоны контакта втулки с манжетой. Уплотнительные пары прирабатывались 40 ч, а испытания после приработки продолжались 160 ч. Наряду с парами с вибронакатанными втулками (термически не обработанными) испытывались серийные уплотнительные пары с втулками, обработанными по действующему технологическому процессу (закалка Т. В. Ч. до

14. Режимы вибронакатывания подманжетных втулок (микрорельеф вида IV; исходная шероховатость 5-го класса; $n_3 = 1,5$ рад/с; $e = 1$ мм)

| Номер втулки | s , мм/об | P , Н | $d_{ш}$, мм | $Rz_{исх}$, мкм |
|--------------|-------------|---------|--------------|------------------|
| 23/27 | 0,21 | 392 | 11,9 | 15 |
| 26/33 | 0,3 | 294 | 7,9 | 14,5 |
| 36/42 | 0,11 | 343 | 11,7 | 17 |

15. Исходные данные и результаты испытаний уплотнительных пар

| Вид обработки | Номер втулки | Высота неровностей, мкм | Класс шероховатости | Максимальная высота неровностей, мкм | Радиус закругления неровностей, мкм | Шаг неровностей, мм | Количество выступов на 1 см ² |
|------------------|--------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|--|
| Вибронакатывание | 23 27 | 9,04 | 6 | 10 | 2850 | 0,712 | 14,1 |
| | 36 42 | 3,67 | 7 | 3,85 | 3740 | 0,416 | 24,1 |
| | 26 33 | 6,63 | 6 | 8 | 2750 | 0,783 | 12,8 |
| Шлифование | 1 2 | 1,42 | 9 | 1,88 | 39,4 | 0,021 | 476 |

HRC 50, шлифование по 9-му классу шероховатости с последующим хромированием). Результаты испытаний приведены в табл. 15. Данные таблицы позволяют сделать следующие выводы.

1. Во всех случаях уплотнительные пары с вибронакатанными, термически не обработанными втулками с шероховатостью поверхности 6—7-го классов оказались более износостойкими, чем пары с закаленными шлифованными (9-й класс) и хромированными втулками. В зависимости от режима вибронакатывания и соответственно микрорельефа и степени упрочнения износ был меньшим на 38—71,5 %.

2. Момент трения, потребляемая мощность, температура в зоне трения деталей пар с вибронакатанными втулками были меньшими, чем у пар со шлифованными втулками. Момент трения уменьшился на 5—39 %, потребляемая мощность — на 4—38 %, температура в зоне трения — на 4—19 %.

3. Если учесть, что микротвердость наиболее сильно упрочненных вибронакатанных втулок была в 2,1—2,3 раза меньше микротвердости закаленных шлифованных хромированных втулок, а шероховатость их поверхности на два-три класса грубее, то станет очевидным решающее значение для износостойкости уплотнительных пар формы микронеровностей. Достаточно сравнить характеристики микрорельефа шлифованных и вибронакатанных поверхностей втулок, определяющие форму микронеровностей: радиус закругления вершин микронеровностей у первых 39,4 мкм, у вторых минимальный 2580 мкм; отношение r/R_{\max} у первых

| Опорная поверхность, % | | Микротвердость, МПа | | Износ уплотнений, мг | Момент трения, Н·м | Потребляемая мощность, Вт | Температура, °С | | Утечка смазки | |
|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|----------|-----------------|------------------------------------|
| при $F_{оп} = 20\%$ | при $F_{оп} = 30\%$ | исходная $HD_{иск}$ | после эксплуатации HD | | | | манжеты | втулки | см ³ | 10 ⁻³ м ³ /с |
| 16,2 | 22 | 37,43 | 41,46 | 659,9 655,8 | 0,29 0,39 | 46 61 | 50 47 | 50 | 39 | 4,07 |
| 18 | 28,5 | 36,0 | 37,03 | 863,8 805,75 | 0,43 0,39 | 67 61 | 42 49 | 45 49 | 232,5 | 24,17 |
| 14,5 | 27,5 | 42,84 | 39,37 | 897,6 824,2 | 0,23 0,31 | 43 49 | 46 49 | 46 49 | 310,5 | 32,33 |
| 15,3 | 30,2 | 90,07 | 77,47 | 954,35 1393,35 | 0,44 0,45 | 69 70 | 50 52 | 52 54 | 337,2 | 35 |

20,9, у вторых минимальное 258; шаг микронеровностей у первых 0,021 мм, у вторых минимальный 0,416 мм.

Схемы контактирования резины с контртелом со шлифованной и вибронакатанной поверхностью представлены на рис. 94, а.

Граничное трение скольжения. Цилиндрическая пара резина—металл. Поступательное движение. Уплотнения узлов возвратно-поступательного движения более широко распространено и не менее ответственно, чем узлов вращательного движения. Требования к качеству таких уплотнений также непрерывно повышаются. Поэтому проверка возможности повышения долговечности и надежности уплотнений, работающих при иной схеме движения, чем вращательное, за счет оптимизации микрорельефа представляло интерес. Сравнительное исследование¹ зависимости сил трения от микрорельефа поверхностей металлического штока проводилось на уплотнительных парах: шток из стали 45 (HRC 37) — резиновое кольцо круглого сечения с внутренним диаметром 60 мм и наружным 63 мм.

Первое исследование ставило целью сопоставить работоспособность уплотнений со штоками, обработанными точением (5-й класс шероховатости), вибронакатыванием (5-класс) и шлифованием (7-й класс). При вибронакатывании создавался полностью новый микрорельеф вида IV, так как первые же испытания выявили непригодность вибронакатанных поверхностей с системой канавок, как и в уплотнительных парах с вращательным движе-

¹ Выполнено автором совместно с А. Л. Рейнусом.

нием. Исследование проводилось на гидростенде с установкой двух резиновых колец с поджатием, равным 20 %. В уплотнительную зону ручным гидронасосом подавалась жидкость АМГ-10 под давлением 30,3 МПа. Штоки цилиндров соединялись упругим элементом, на который наклеивались тензодатчики для определения силы трения между штоком и резиновым кольцом после 5100 циклов. Рабочий ход был равен 200 мм при скорости возвратно-поступательного движения штока 5 м/мин.

При данных условиях в уплотнительной паре с обточенным штоком наблюдался столь сильный износ резиновых колец, что уже после 40—50 циклов происходила разгерметизация уплотнения. Это объяснялось интенсивным разрушающим действием на резину относительно высоких ($Rz = 13,8$ мкм), но главные заостренных ($r = 150$ мкм) и весьма неоднородных по высоте выступов неровностей. При испытании в тех же условиях пара с вибронакатанным штоком с такой же высотой неровностей ($Rz = 13,9$ мкм), но отличавшихся более пологой формой ($r = 900$ мкм) и несравнимо большей однородностью (см. рис. 94, а) работала нормально по всем показателям, так же как пара со шлифованным штоком, обработанным значительно чище ($Rz = 5,1$ мкм).

При дальнейших испытаниях штоки с обточенными поверхностями как объекты исследования были исключены, так же как вибронакатанные с системами канавок видов I, II и III.

Второе исследование ставило целью выявить оптимальный регулярный образующийся вибронакатыванием микрорельеф в отношении работоспособности уплотнительных пар с возвратно-поступательным движением.

Анализировались пары такого же типа, что и в первом исследовании. Твердость резиновых колец равнялась 40 единицам по Шору, поджатие 20 %. Скорость возвратно-поступательного движения штока составляла 5 и 10 м/мин, рабочее давление 5,05; 10,1; 15,15 и 30,3 МПа. Испытывались штоки, обработанные вибронакатыванием по 5 и 8-му классам шероховатости (микрорельеф вида IV) и шлифованные по 7 и 8-му классам.

На рис. 93 осциллограмма 1 наглядно фиксирует снижение силы трения (на 15—20 %) при перемещении резинового кольца со шлифованного участка штока на вибронакатанный и увеличение ее при смещении вновь на шлифованный участок. На осциллограмме 2 зафиксировано увеличение скорости возвратно-поступательного движения штока при входе на кольцо со шлифованного на вибронакатанный его участок и уменьшение ее при входе вновь на кольцо со шлифованным участком. Эти осциллограммы показывают влияние микрорельефа на характеристики трения и скорости относительного перемещения деталей резино-металлического уплотнения. Усилия трения в гидропарах с вибронакатанным штоком 5-го класса шероховатости были близки по величине усилиям трения на шлифованных штоках 7-го класса (скорости 5 и 10 м/мин) давления 10,1 и 30,3 МПа.

Форма микровыступов и микровпадин определялась методом наложения профилограмм. Запись изменения микропрофиля по сечениям осуществлялась при помощи специальной приставки к профилографу «Калибр». Она позволяла снимать профилограммы через 0,02 мм в направлении, перпендикулярном вертикальной плоскости, проходящей через ось штока.

Микровпадины, полученные при наложении профилограмм, представляют собой эллиптические чечевицеобразные лунки, высоко однородные по форме, размерам и расположению. Длина лунок может изменяться в пределах 50—1000 мкм, ширина — 50—500 мкм и глубина — в пределах 0,02—20 мкм.

После приработки шероховатость поверхности вибронакатанного штока уменьшается с 8 до 13—14-го классов при сохранении формы и расположения лунок уже значительно меньшей по сравнению с исходной глубиной. Сдвиговые усилия в уплотнительных парах с вибронакатанным штоком (8-й класс шероховатости) после стоянки 1 мин; 1,2 и 7 ч были во всех случаях на 40—50 % меньшими, чем в парах со шлифованными штоками того же класса шероховатости.

Высокая степень регулярности образующегося при вибронакатывании микрорельефа позволяет с достаточной для практики точностью рассчитать полную площадь приработанной поверхности штока по формуле (получена А. Л. Рейнусом)

$$S = \pi (d_s L + h^2 N), \quad (120)$$

где L — длина вибронакатанного участка; h — глубина лунки; N — количество лунок.

Глубина лунки определяется через параметры режима вибронакатывания

$$h = \frac{S^2}{4d_m}. \quad (121)$$

Количество лунок определяется по формуле

$$N = \frac{1250i}{\pi d_s s}.$$

где $i = h_{дв. х} / h_{э.}$

Таким образом, применение способа вибронакатывания для оптимизации микрорельефа рабочих поверхностей контртел уплотнительных пар вращательного и возвратно-поступательного движения обеспечивает не только значительное повышение их износостойкости, но и возможность аналитического расчета таких важных характеристик, как площадь фактического контакта резины с металлом и ряда других. Данные исследования убедительно показали недостаточность нормирования конструктором лишь высотных характеристик микрорельефа рабочих поверхностей контртел уплотнительных пар и необходимость назначения комплекса геометрических параметров.

Для повышения производительности вибронакатывания при образовании регулярного микрорельефа вида IV обработка ведется на повышенных режимах и, в частности, с числом осцилляций $n_{дв. х} = 3000$ 1/мин, с соответственно увеличенными подачами до $s = 0,2$ мм/об и диаметрами шаров $d_{ш}$ до 10 мм (так обрабатываются гидропневмоцилиндры диаметром 300—400 мм).

Так, пневмоцилиндр ($d_3 = 100$ мм; $l = 150$ мм) вибронакатывается при режиме: $n_{дв. х} = 2800$ 1/мин; $s = 0,16$ мм/об; $l = 1$ мм; $d_{ш} = 6$ мм; $P = 392$ Н; $T_{маш} = 16$ мин. В результате применения такой технологии требования к шероховатости снижены с 9 до 6-го класса шероховатости и исключены операции второго шлифования и хонингования или доводки.

ГОСТ 14896—74 для пневмогидроприводов на давление управляющей среды (гидрожидкости) от 9,8 до 49,05 МПа дополнен примечанием: «Допускается обработку уплотнительных поверхностей цилиндра и штока производить с шероховатостью поверхности не ниже 6-го класса с последующей обработкой методом вибронакатывания, при этом количество выступов и впадин на 1 мм² обработанной поверхности должно составлять не менее 5, а шероховатость не ниже 6-го класса». До применения процесса вибронакатывания поверхности штоков и цилиндров обрабатывались хонингованием или доводкой с шероховатостью 9-го класса; примерно с таким же эффектом, вибронакатывание с образованием регулярного микрорельефа вида IV применено для обработки поршней. В этом случае достаточно высокая производительность достигается за счет применения многошариковых виброголовок.

В Болгарии в серийном производстве Варнинского завода Елпром процесс вибронакатывания применяется для обработки штоков автопогрузчиков (диаметр 40 мм, длина 700 мм) взамен тонкого шлифования с образованием регулярного микрорельефа вида IV. Высокая производительность достигается как за счет использования трехшариковой виброголовки, так и шаров большого диаметра ($d_{ш} = 20$ мм). Возможность работы шарами большого диаметра с соответственно большими усилиями их вдавливания ($P = 800 \div 900$ Н) и большей величиной отпечатка обеспечивается схемой многоэлементной обработки при расположении шаров через 120° (см. рис. 15, б), при которой значительные радиальные усилия взаимогасятся и относительно маложесткая заготовка ($l/d_3 = 700/40$) не деформируется. Новая конструкция (с новой микрогеометрией) штоков обеспечила повышение гидроплотности и существенное снижение себестоимости их обработки.

Граничное трение скольжения. Плоские пары металл—металл. Возвратно-поступательное движение. Основным представителем таких пар являются пары направления возвратно-поступательного движения главным образом в станках, измерительных приборах и различного рода, чаще всего, прецизионных устройствах.

Повышение точности, надежности и долговечности деталей таких пар — важнейшая задача, что обусловлено также высокой

стоимостью их обработки, связанной с применением до сих пор выполняемой вручную такой дорогостоящей и несовершенной операции, как шабрение. Даже в тех случаях, когда шабрение применяется лишь с целью «разбивки» поверхности, создания масляных карманов и улучшения условий трения, оно весьма трудоемко и требует использования высококвалифицированного труда.

Первое исследование [5] ставило целью выявить влияние микрорельефа плоских линейчатых поверхностей, вибронакатанных строчечным способом (по схеме на рис. 76, с использованием виброголовки, показанной на рис. 19), на условия их трения и износ.

Исследование проводилось на плоских образцах из стали Ст3, и стали 45 и чугуна СЧ 21—40. Сопоставлялись по износостойкости плоские поверхности образцов, обработанные торцовым фрезерованием, шлифованием и вибронакатыванием по 8-му классу шероховатости. При предварительном исследовании были выявлены следующие режимы вибронакатывания, обеспечивающие наилучшие результаты по износостойкости:

| Материал | $R, \mu\text{H}$ | $s, \text{мм/ход}$ стола |
|---------------------|------------------|-----------------------------|
| Сталь Ст3 | 500 | 1 |
| Сталь 45 | 250 | 1 |
| Чугун | 250 | 0,5 |

Во всех случаях $d_{\text{ш}} = 16 \text{ мм}$, $s = 300 \text{ мм/мин}$, $v = 12 \text{ м/мин}$. Основные результаты исследования сводятся к следующему.

1. При различных способах обработки плоских поверхностей с одинаковой шероховатостью несущая их способность, характеризующая фактической площадью, существенно различна. Так, при сближении $r = 0,8 \text{ мкм}$ фактическая площадь фрезерованной поверхности составляет лишь 4 % от номинальной, шлифованной — 7 %, а вибронакатанной — 20 %, при сближении $r = 0,6 \text{ мкм}$ соответственно — 16; 30 и 67 %.

2. Износостойкость поверхностей с одинаковой фактической площадью, но обработанных разными способами, различна и определяется микрорельефом и степенью упрочнения поверхностного слоя металла. Так, при фактической площади поверхностей образцов из стали 45, равной 60 % от номинальной, за 72 ч изнашивания в условиях граничной смазки относительный износ фрезерованных поверхностей составил 30 %, шлифованных 22 % и виброобкатанных 13 %.

Второе исследование ставило целью проверить результаты первого и сопоставить свойства плоских линейчатых поверхностей, вибронакатанных строчечным способом, с обработанными вибронакатыванием по способу полного перекрытия всей поверхности за один проход (по схеме на рис. 20, б). Обработка производилась с помощью виброголовки, показанной на

рис. 21. Исследование¹ проводилось на образцах из чугуна имитировавших направляющие токарных станков. В табл. 16 приведены значения коэффициента трения, определенного на машине МПТ-1, при испытании пар образцов с поверхностями, обработанными шабрением, шлифованием, тонким строганием и вибронакатыванием, а также покрытых стиракрилом. Наименьший коэффициент трения (0,1) оказался у образцов, поверхности которых были обработаны шабрением и вибронакатыванием. Наименьшим оказался и износ деталей пар, у одной из которых поверхность была обработана вибронакатыванием (на 15—25 %).

16. Значения коэффициента трения в зависимости от способа обработки

| Способ обработки плоских поверхностей трения образца | | Коэффициент трения |
|--|----------------------|--------------------|
| верхнего | нижнего | |
| Шабрение | Вибронакатывание | 0,10 |
| » | Шабрение | 0,15 |
| » | Покрытие стиракрилом | 0,16 |
| » | Тонкое строгание | 0,13 |
| » | Шлифование | 0,15 |
| Покрытие стиракрилом | Вибронакатывание | 0,12 |
| То же | Шабрение | 0,12 |

Результаты исследования были проверены непосредственно в эксплуатационных условиях на станках моделей 1Е61 и ТВ320. Износ различных направляющих поверхностей токарного станка модели 1А62 (рис. 103, а) существенно различен (приведенные значения износа — средние из замеров износа десяти станков, работавших в нормальных эксплуатационных условиях в течение

трех лет). Поэтому сопоставление износостойкости производилось лишь по наиболее изнашиваемым поверхностям А и Б. Эти поверхности обрабатывались вибронакатыванием после тонкого строгания широким резцом и сопоставлялись по усилию сдвига и износостойкости. Режим вибронакатывания, обеспечивающий образование оптимального микрорельефа: $s = 4500$ мм/мин; $d_{ш} = 6$ мм; $P = 254$ Н. При этих условиях $F_n = 30$ % (см. рис. 74, б), глубина выдавливаемой канавки 0,02 мм, $T_{маш} = 30$ мин. Основные результаты испытания таковы. Условие, необходимое для страгивания каретки относительно направляющих, обработанных шабрением, составляло 75 Н, а обработанной вибронакатыванием — 56 Н; усилие, необходимое для поддержания движения каретки в первом случае, равнялось 52 Н, во втором — 50 Н. Износ направляющих вибронакатанных поверхностей составлял через 6 мес — 9 мкм; а через 1 год — 15 мкм, т. е. на 25 % меньше, чем у обработанных шабрением. Во всех случаях на вибронакатанных поверхностях отсутствовали задиры и другие дефекты.

¹ Выполнено автором совместно с Г. Д. Пекелисом.

Третье исследование¹ ставило целью выявить возможность и целесообразность применения вибронакатывания в условиях серийного основного производства направляющих прецизионных станков. Экспериментальные исследования, отладка и внедрение процесса вибронакатывания производились на Ленинградском заводе станков-автоматов. Испытания станков с вибронакатанными направляющими выполнялись на ряде заводов часового производства в течение восьми лет. Исследованию и испытаниям подвергались верхние грани направляющих чугуных станин автоматов продольного точения моделей 1Б10П, 1АКП

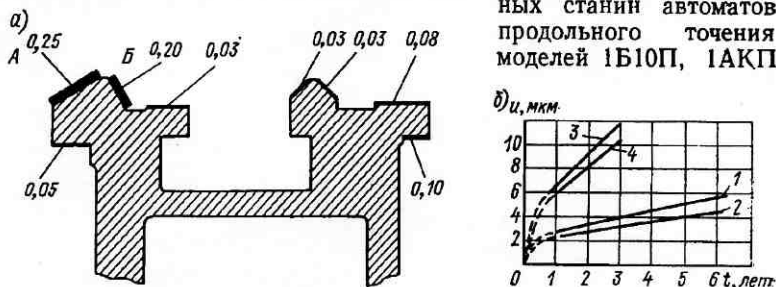


Рис. 103. Износ направляющих поверхностей станины токарного станка (а) и зависимость износа направляющих станин автоматов продольного точения различных моделей от длительности эксплуатации (б):

1 — моделей 1Б10А и 1АВ10В, направляющие шабренные; 2 — модель М-7, направляющие шабренные; 3 — модель 1Б10А, направляющие шабренные; 4 — то же, направляющие вибронакатанные

и 1П16, предварительно обработанные тонким торцовым фрезерованием на координатно-расточном станке модели 2В240 и вибронакатанные при помощи многошариковых виброголовок (см. рис. 22) [14]. Оптимальным оказался частично регулярный микрорельеф вида I с относительной площадью канавок 36—40 %, с их глубиной, равной 15—20 мкм, при исходной шероховатости 6-го класса, обеспечивающей требуемую плоскостность.

Исследование износа направляющих в условиях эксплуатации дает наиболее полное представление о влиянии отдельных факторов на характер и интенсивность изнашивания. Под наблюдением находилось 26 автоматов модели 1Б10П, в том числе 10 с вибронакатанными направляющими.

Результаты испытаний приведены на рис. 103, б. Четко выделяются два периода изнашивания: период приработки (штриховые линии) и период установившегося износа (сплошные линии). Обработка полученных данных по методу наименьших квадратов с учетом линейности математического ожидания случайной функции в период установившегося изнашивания дала следующие

¹ Выполнено автором совместно с Р. Х. Амбаряном.

результаты: для автоматов моделей 1Б10А и 1Б10В $V = 2,15 + 0,64t$; для автоматов модели 1Б10П с шабреными направляющими $V = 3,6 + 2,8t$; для автоматов модели 1Б10П с вибронакатанными направляющими $V = 3,4 + 2,4t$. Статистический анализ и проверка результатов эксплуатационных исследований показали следующее:

1) величина износа в период приработки и скорость изнашивания для станков моделей 1Б10А и 1Б10В, модели 1Б10П как с шабреными, так и с вибронакатанными направляющими существенно отличаются.

2) приработочный износ шабрённых направляющих в 1,2 раза больше, чем вибронакатанных, а скорость нормального изнашивания в 1,3 раза больше по отношению к вибронакатанным. Это объясняется увеличением маслостойкости и удержанием в канавках твердых частиц, интенсифицирующих износ.

Близкие к описанным выше результаты и выводы были сделаны при исследовании пары лопасть — направляющие¹ (см. рис. 74, ж), цилиндрической группы компрессора холодильных машин (обе детали закалены до HRC 61—63 и доведены соответственно до 11 и 10-го классов шероховатости). Как видно из рис. 74, ж, имеется четко выраженный экстремум значения F_n . Созданием на рабочей поверхности лопасти канавок вида I с площадью $F_n = 30 \div 40 \%$, глубиной $h_n = 2 \div 3$ мкм практически полностью исключено явление схватывания и снижен износ обеих деталей на 15—20 %.

В дальнейших исследованиях² была выявлена возможность повышения надежности и долговечности других пар трения холодильного герметичного компрессора (ДХ-2): подшипник — коленчатый вал, шатун — коленчатый вал. Рабочие поверхности деталей этих пар обрабатываются шлифованием и доводкой с высокой степенью гладкости (9—11-й классы шероховатости). Как показали исследования, такие пары работают в условиях недостаточной смазки, что приводит к частым случаям схватывания трущихся поверхностей и ускоренному их износу. Образование систем смазывающих канавок вида I ($F_n = 32 \div 35 \%$) практически исключает патологические явления (натиры, задиры, схватывание) и приводит к повышению износостойкости рабочих поверхностей подшипника, коленчатого вала, шатуна и компрессора в целом.

Граничное трение скольжения. Плоско-цилиндрические пары металл — металл. Вращательное движение. Представителем таких пар является используемая в крутильных и прядильных машинах пара кольцо — бегунок (рис. 104). Испытания и исследования³ проводились только на реальных парах: кольцо типа КВ по ГОСТ 3608—78Е (внутренний диаметр 58 мм) из стали 45 и

¹ Выполнено автором совместно с Я. В. Гузок.

² Выполнены автором совместно с Я. В. Гузок и Л. И. Опаринной.

³ Выполнены автором совместно с Ю. И. Мулиным.

стали 4X13 — латунный бегунок. Испытывались кольца как термически необработанные, так и подвергнутые высокотемпературному цианированию с последующей закалкой. Испытания проводились в два этапа длительностью 6 и 48 ч. Исследовалась зависимость износа и его динамики, а также длительности приработки, температуры в зоне трения и коэффициента трения от качества рабочих поверхностей кольца, определяемого способом обработки (ручное абразивное полирование, абразивное полирование в барабане, обкатывание шаром и обкатывание шаром с последующим вибронакатыванием).

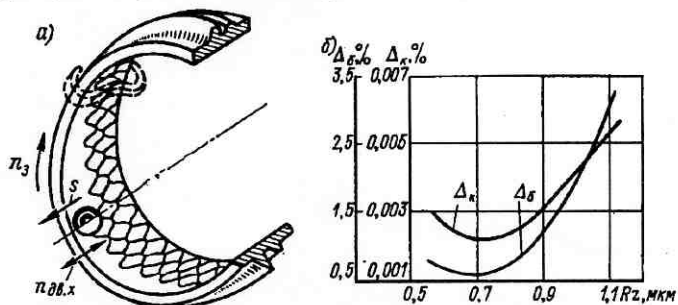


Рис. 104. Пара крутильное кольцо—бегунок (а) и зависимость относительного износа от шероховатости рабочей поверхности кольца (б): Δ_{κ} — кольца; Δ_{δ} — бегунка

Анализ графиков на рис. 74, г и 104, б позволяет сделать следующие выводы.

1. Зависимость износа колец и бегунков от шероховатости рабочих поверхностей кольца нелинейна; минимальный износ наблюдается при одинаковой шероховатости колец и бегунков (10-й класс), определяющей оптимальное для данных условий трения соотношение между несущей способностью и маслоемкостью трущихся поверхностей.

2. С уменьшением высоты неровностей рабочих поверхностей кольца с 1,2 до 0,8 мкм коэффициент трения заметно снижается, но при дальнейшем их уменьшении изменение незначительно.

3. Применение обработки давлением в качестве финишных операций при отделке как сырых, так и термически обработанных колец во всех случаях приводит к значительному повышению износостойкости и колец и бегунков. Износостойкость колец, полированных вручную до 10-го класса шероховатости по сравнению с обкатанными была несколько ниже. Это объясняется тем, что применение более мелкозернистых полированных порошков, увеличение длительности полирования и давлений, а соответственно и повышение температуры в зоне резания (при переходе от полирования по 9-му классу к 10-му) приводило к заметному уменьшению поверхностной твердости колец.

4. Увеличение маслостойкости основной внутренней рабочей поверхности колец путем образования на ней после обкатывания по 10-му классу шероховатости вибронакатыванием системы масляных каналов (оптимальным оказался микрорельеф вида II, $F_k = 48\%$) приводит во всех случаях к повышению износостойкости колец и бегунков (рис. 104, а, б) как в начальный период работы, так и в период нормального износа. Недостаточная маслостойкость полированных и обкатанных поверхностей колец увеличивает не только коэффициент трения, но и температуру в зоне трения. С созданием на поверхности отверстия колец системы канавок потребление масла возросло в несколько раз.

Таким образом, еще раз подтвердилась высокая эффективность сочетания упрочнения поверхностей с оптимизацией их микрорельефа. Правильность приведенных выводов была подтверждена данными эксплуатационных испытаний колец, обработанных по новой технологии на ряде комбинатов, которые выявили не только возможность исключения операции абразивной приработки вибронакатанных колец с бегунками при первоначальной их установке, но и заметное уменьшение обрывности нити.

Если учесть, что машинное время вибронакатывания колец (тип 2, исполнение 3 по ГОСТ 3608—78Е) с внутренним диаметром 58 мм составляет лишь 20 с, износостойкость обкатанных и вибронакатанных колец повышается почти в 3,5 раза (при повышении износостойкости работающих в паре с кольцами бегунков в три раза) по сравнению с эталонными, то очевидна рентабельность нового технологического процесса обработки крутильных и прядильных колец. В настоящее время крутильные кольца вибронакатываются шарами и роликами (см. рис. 42) и с высоким технико-экономическим эффектом применяются на многих комбинатах.

Граничное трение скольжения. Плоско-цилиндрическая пара металл — пластмасса. Вращательное движение. В парах кольцо — бегунок вместо металлического бегунка используются пластмассовые анидные бегунки. Поэтому представляло интерес сопоставление влияния способа обработки микрорельефа рабочей поверхности стального кольца при работе в паре с латунным и анидным бегунком на износостойкость и другие характеристики трения. Основные выводы этого исследования сводятся к следующему:

1) характер зависимостей износостойкости и температуры в зоне трения от способа обработки и микрорельефа внутренней поверхности кольца идентичен при работе его в паре с металлическим и пластмассовым бегунком;

2) коэффициент трения пары кольцо — латунный бегунок при прочих равных условиях почти в два раза меньше, чем пары кольцо — анидный бегунок и лишь при ручном полировании кольца коэффициент трения металлической пары оказался столь большим, что бегунок вылетал из кольца;

3) во всех случаях износостойкость кольца и пластмассового бегунка была выше, чем кольца и металлического бегунка;

4) температура в зоне трения пар кольцо — пластмассовый бегунок была ниже, чем у пар кольцо — металлический бегунок. Правильность этих выводов полностью подтверждена эксплуатационными испытаниями, а с 1976 г. и промышленной практикой.

Граничное трение скольжения. Торцовые пары металл — металл. Вращательное движение. Основным представителем таких пар являются подпятниковые пары. Задача повышения износостойкости и особенно надежности — предотвращение опасности схватывания деталей высоконагруженных подпятниковых пар — весьма важна и ответственна для ряда отраслей промышленности. Предстояло выяснить в такой же ли мере торцовые поверхности, образованные точением и шлифованием, а также обкатыванием недостаточно маслосъемки, как цилиндрические, и возможно ли увеличением их маслосъемки столь же эффективно бороться с явлением схватывания и износом. Исследование¹ проводилось на образцах типа подпятников из стали 45, дюралюминия Д1 и чугуна СЧ 15—32 диаметром 37 мм (ширина пояска 5 мм, номинальная площадь 5 см²); истирающий диск был изготовлен из стали У10А (HRC 61—63) по 9-му классу шероховатости.

Вибронакатывание осуществлялось по схеме, приведенной на рис. 5, б, при помощи виброголовки, показанной на рис. 12. При вибронакатывании торцовых поверхностей так же, как и цилиндрических, возможно образование системы канавок с микрорельефом видов I—III и полностью нового микрорельефа (см. рис. 61).

По данным предварительного исследования, выполненного в относительно небольшом объеме, в отношении прирабатываемости, сопротивления схватыванию и износа наилучшими оказались поверхности с микрорельефом вида IV. Поэтому исследование, основные результаты которого приведены ниже, было выполнено с поверхностями, микрорельеф которого был полностью новым. Поскольку при вибронакатывании торцовых поверхностей образуется микрорельеф, изменяющийся от центра к периферии, исследование проводилось на образцах с узкими поясками. Отработанный опытным путем, близкий к оптимальному в отношении износостойкости режим вибронакатывания: $n_3 = 70$ рад/с; $s = 0,07$ мм/об; $n_{дв. х} = 4200$ 1/мин; $d_{ш} = 3,5$ мм; $l = 14$ мм; $P = 508$ Н. Исследованием было выявлено следующее.

1. Наиболее правомерной является гипотеза, объясняющая явление схватывания трущихся поверхностей как процесс образования нароста на отдельных участках с чрезвычайно быстрым лавинным распространением его по всей поверхности. В этих условиях одним из основных факторов, определяющих отдаление момента образования нароста и начала схватывания, является не

¹ Выполнено автором совместно с Л. А. Бунгой.