

Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

Проф., д.т.н. *Скотникова Маргарита Александровна*
Skotnikova@mail.ru

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

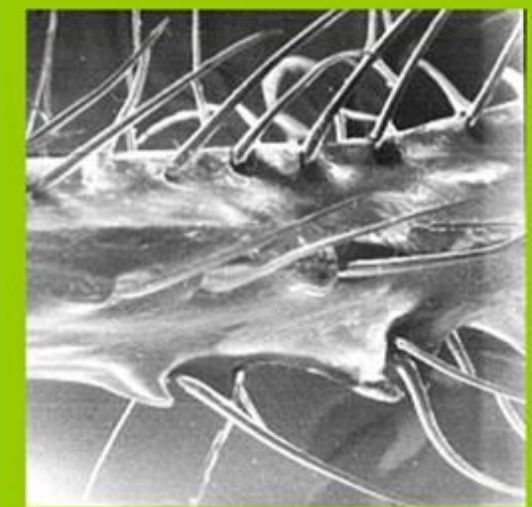
Кафедра "Машиноведение и
основы конструирования"
ИММиТ САбПУ



x 1



x 100



x 10000

Тема 3. Технологические методы повышения ресурса и надежности работы деталей машин.

1. Ресурс и надёжность работы деталей машин.
2. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин.
Характеристики структурного и фазового состава качества поверхности деталей.
3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.
4. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) способом вибрационного накатывания.
5. Исследование шероховатости поверхности до и после нанесение регулярного микрорельефа (РМР) с разной величиной амплитуды синусоиды.
6. Схемы вибронакатывания РМР и их связь с эксплуатационными свойствами деталей.
7. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) с целью повышения износостойкости трибоузлов.
8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин .

3.1. Ресурс и надёжность работы деталей машин

Согласно Государственного. стандарта – **надежность** – понятие, обеспечивающее такие свойства конструкции, как **безотказность, ремонтоспособность, сохраняемость и долговечность, то есть способность к эксплуатации в заданный срок службы (ресурс).**

- Главным элементом **повышения надежности, например, гребных валов,** является статистический сбор информации о фактических условиях эксплуатации.

- Далее, на основе анализа наблюдающихся неисправностей, определения эксплуатационных свойств материала, оценки характера разрушения – проведение **уточняющих расчетов на прочность.**

- Завершающим этапом, обосновывающим увеличение ресурса гребных валов, прежде чем это найдет отражение в технических условиях, является **проведение стендовых ускоренных – эквивалентных испытаний** на малоцикловую долговечность в морской воде, моделирующих условия эксплуатации.

Работоспособность – мера надежности материала для устойчивой работы конструкции при заданных параметрах температуры, времени, величине и скорости нагружения.

Вид энергетической установки	Время работы (ресурс)
1-ая и 2-ая ступени ракеты, выводящие спутник на орбиту	несколько сек
Авиационная турбина	100... 3.000 ч.
Судовая турбина	10.000... 50.000 ч.
Паро-силовое оборудование различных стационарных электростанций	100.000... 200.000 ч.
Стационарные атомные электростанции	до 400.000 ч.

3.2. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин

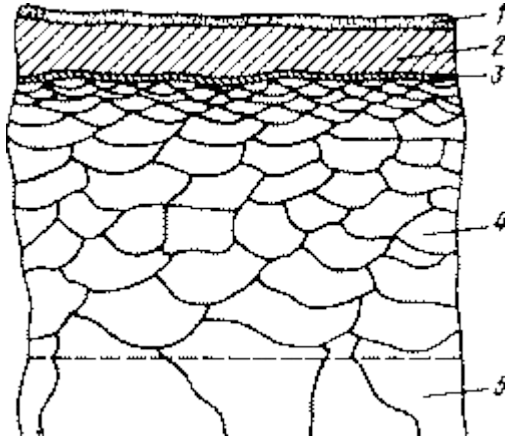


Схема поверхностного
слоя детали

Поверхностный слой детали - это слой, у которого структура, фазовый и химический состав отличаются от основного материала, из которого сделана деталь.

В процессе изготовления деталей машин на их поверхностях возникают неровности, изменяется структура, фазовый и химический состав, возникают остаточные напряжения.

Качество поверхности деталей машин определяется совокупностью характеристик:

- Геометрией поверхности – шероховатость, волнистость (профилометры);
- Микроструктурой поверхностного слоя (оптические и электронные микроскопы);
- Фазовым составом (рентгеноструктурные анализаторы);
- Химическими свойствами (спектральные анализаторы);
- Физико-механическими свойствами (измерение микротвёрдости);
- Остаточными напряжениями (рентгеновские приборы).

В поверхностном слое можно выделить следующие основные зоны:

- 1- зона** адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ. (например, воды, СОЖ, растворителей, промывочных жидкостей), **ее толщина 0,001...0.1 мкм.**
- 2- зона** продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов), **толщиной 0,001...1 мкм.**
- 3- граничная зона** толщиной несколько межатомных расстояний, имеющая иную, чем в объеме, кристаллическую и электронную структуры.
- 4- зона** с измененными по сравнению с основным металлом структурой, фазовым и химическим составом, который возникает при изготовлении детали и изменяется в процессе эксплуатации, **толщиной 10...100 мкм.**
- 5- исходное состояние материала.**

3.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОТВЕЧАЮЩИЕ ЗА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

- микрогеометрия поверхности
- фазовый состав
- структура (макро-, микро-, субмикро-, атомный уровень)
- химический состав
- остаточные напряжения

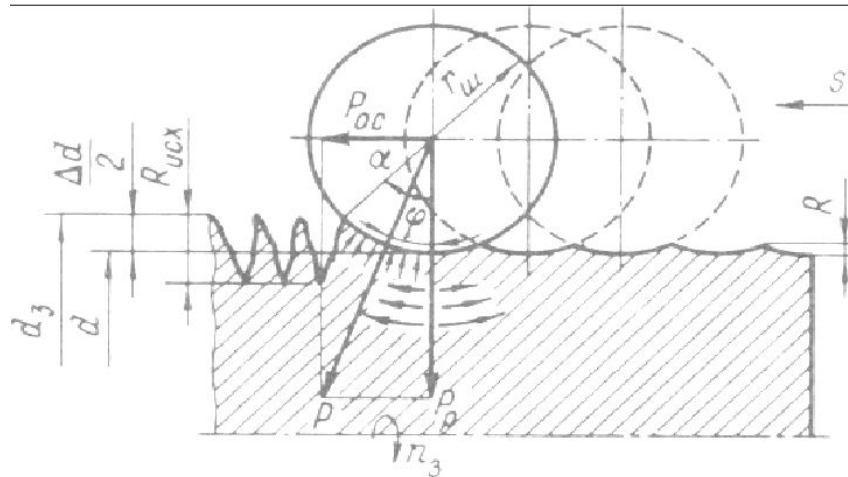
Химический состав материалов:

1) Ст. 40X

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	0,30	0,30	0,035	0,035

2) АМц

Mn	Fe	Si	Cu	Zn
1,5	0,7	0,6	0,2	0,1



Вклады

$\sigma_{\tau} \approx \sum_{i=1}^5 \sigma_i =$	σ_0	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5
Наименование вклада	сила трения решетки	твердорастворное упрочнение	дислокационное упрочнение	Дисперсионное упрочнение	упрочнение большеугловыми границами	упрочнение малоугловыми границами
Ф-ла для расчета	$2 \times 10^{-4} G$	$0,1 \times b \times G$ D	$\sum K_i \times C_i$	$0,8 \times b \times G$ λ	$M_0 b G \rho$	K_s d
Оценка вкладов, МПа	5,2	3,4 (D=120 мкм)	200 ($\sum K \approx 20$ $\sum C \approx 10$)	0,25 ($\lambda \approx 9$ мкм)	284 ($\rho \approx 10^{12}$)	130 ($d \approx 1$ мкм)

3.2. Характеристики структурного и фазового состава качества поверхности деталей

Классификация методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин

Все известные методы упрочнения подразделяются на 6 основных классов:

- упрочнение с образованием пленки на поверхности;
- с изменением химического состава поверхностного слоя;
- с изменением структуры поверхностного слоя;
- с изменением энергетического запаса поверхностного слоя;
- с изменением микрогеометрии поверхности и наклепом;
- с изменением структуры по всему объему материала.

3.2.1 Упрочнение с созданием пленки на поверхности

- а) осаждение химической реакции (оксидирование, сульфидирование, фосфатирование, нанесение упрочняющего смазочного материала, осаждение из газовой фазы).
- б) осаждение из паров (термическое испарение тугоплавких соединений, катодно-ионная бомбардировка, прямое электронно-лучевое испарение, реактивное электронно-лучевое испарение, электронно-химическое испарение).
- в) электролитическое осаждение (хромирование, никелирование, электрофорез, никельфосфатирование, борирование, борохромирование, хромофосфатирование).
- г) напыление износостойких соединений (плазменное напыление порошковых материалов, детонационное напыление, электродуговое напыление, лазерное напыление, вихревое напыление, индукционное припекание порошковых материалов).

3.2.2 Упрочнение с изменением химического состава поверхностного слоя металла

- а) диффузионное насыщение (борирование, цианирование, азотирование, нитроцементация и т.п.)
- б) химическое и физико-химическое воздействие (химическая обработка, ионная имплантация, электроискровая обработка и т.д.).

3.2. Характеристики структурного и фазового состава качества поверхности деталей

3.2.3 Упрочнение с изменением структуры поверхностного слоя

- а) физико-термическая обработка (лазерная закалка, плазменная закалка);
- б) электрофизическая обработка (электроконтактная, электроэрозионная, магнитная обработка);
- в) механическая (упрочнение вибрацией, фрикционно-упрочняющая обработка, дробеструйная, обработка взрывом, термомеханическая, электромеханическая);
- г) наплавка легированным элементом (газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов и т.д.).

3.2.4 Упрочнение с изменением энергетического запаса поверхностного слоя

- а) обработка в магнитном поле (термомагнитная обработка, импульсным магнитным полем, магнитным полем);
- б) обработка в электрическом поле.

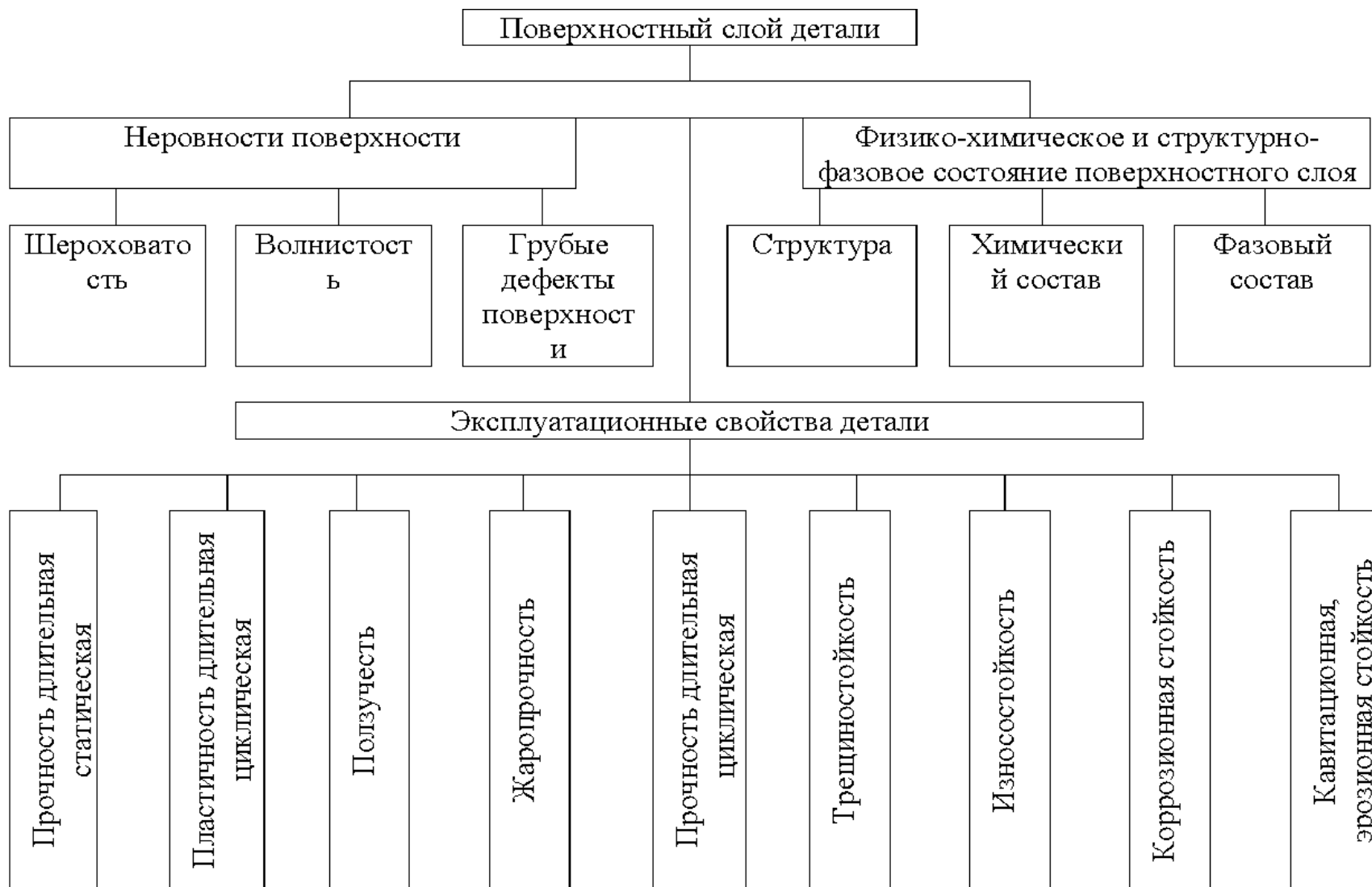
3.2.5 Упрочнение с изменением микрогеометрии поверхности и наклепом

- а) обработка резанием (точение, шлифование, сверхскоростное резание);
- б) пластическое деформирование (накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, вибронакатывание, вибровыглаживание, калибрование, центробежно-ударное упрочнение, виброударное и т.д.);
- в) комбинированные методы (анодно-механическая, поверхностное легирование с выглаживанием, резание с воздействием ультразвуковых колебаний, магнитно-абразивная обработка и т.д.).

3.2.6 Упрочнение с изменением структуры всего объема металла

- а) термообработка при положительных температурах (закалка, отпуск, улучшение, закалка ТВЧ, нормализация, термомагнитная обработка);
- б) криогенная обработка (закалка с обработкой холодом, термоциклирование).

3.2. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин

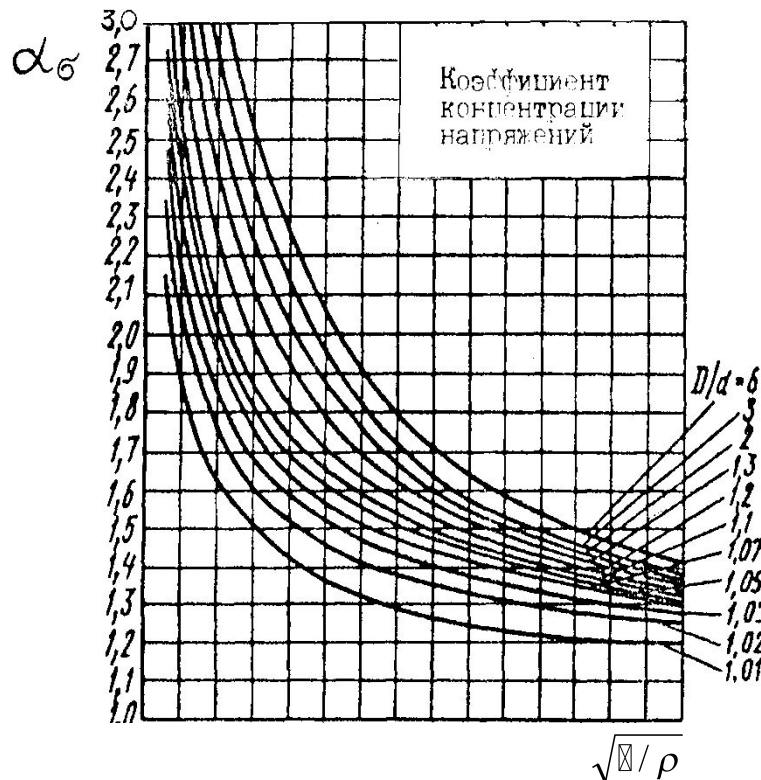


3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей

Концентраторы напряжений бывают

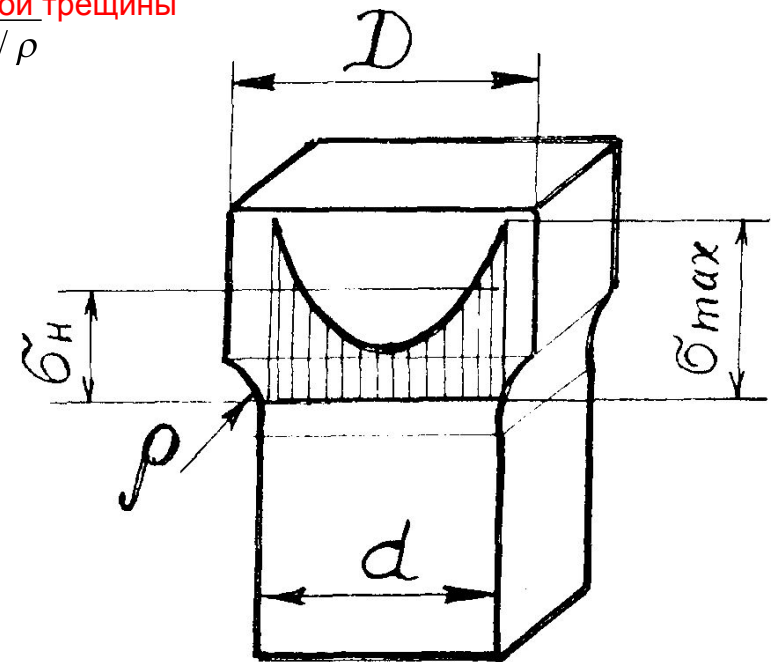
конструктивные (отверстия, резьба)
технологические (царапины, надрезы)
металлургические (несплошности,
грубые включения избыточных фаз)

- **Концентрацией напряжений** – называется явление местного увеличения внутренних напряжений по сравнению с уровнем приложенного номинального в зонах резкого изменения размеров и очертаний детали.
- Введем коэффициент концентрации напряжения (α_σ)



Для центральной
эллиптической трещины
 $\alpha_\sigma = 1 + 2\sqrt{r}/\rho$

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$



3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей. Концентраторы напряжений

На практике, в готовых конструкциях всегда присутствуют **концентраторы напряжений**. Это может быть **трещина, твердая вторая фаза, слабо связанная с матрицей – оксид, сульфит, графит в чугунах**, или не **заварившаяся при прокатке пора или усадочная раковина**, наконец конструктивный **надрез** при механической обработке. При изготовлении деталей машин, в отдельных его местах меняется сечение (например, в месте ступенчатого перехода, в канавке, в резьбе, у кромки отверстия, у шпоночного паза). Все это приводит к формированию в поверхностных и осевых слоях деталей машин **концентраторов напряжений**.

Подсчет **напряжений**, действующих в деталях **натурных размеров** (коленчатых валов, болтов, сварных элементов, осей вагонов и локомотивов и др.) производят по обычным формулам сопротивления материалов для различных случаев испытания (см. табл.). Напряжения, подсчитанные по этим формулам, называются **номинальными**.

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H}$$

Для центральной **эллиптической трещины**
 $\alpha_{\sigma} = 1 + 2 \sqrt{a} / \rho$

Для случая **сферической трещины** $\alpha_{\sigma} = 2$
 Для случая **цилиндрической трещины** $\alpha_{\sigma} = 3$

Вид испытания	Момент сопротивления круглого сечения детали	Площадь круглого поперечного сечения детали	Номинальное напряжение
Растяжение, сжатие	–	$\pi \cdot d^2 / 4$	$\sigma_H = P / \pi \cdot d^2 / 4$
Изгиб	$0,1 \cdot d^3$	–	$\sigma_H = M / 0,1 \cdot d^3$
Кручение	$0,2 \cdot d^3$	–	$\tau_H = T / 0,2 \cdot d^3$

В целом, **максимальные напряжения** в вершине концентратора ($\sigma_{\max}$) выражается формулой:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{2ES_n / \pi l}$$

где S_n – поверхностная энергия; $2l$ – длина концентратора; E – модуль нормальной упругости.

3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.

Таким образом, для повышения прочности деталей желательно максимальное **смягчение формы надреза**. Возможно нанесение дополнительных разгружающих надрезов, которые могут увеличивать или уменьшать концентрацию напряжений, в зависимости от формы тела, расположения надрезов и способа нагружения.

Геометрические параметры неровностей поверхности оцениваются параметрами шероховатости, волнистости, регулярных микрорельефов.

Шероховатость поверхности - это совокупность неровностей обработанной поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. Примерное отношение высоты неровностей к шагу менее 50. при $S/H \ll 0...50$ – называется **субмикрогеометрическое отклонение формы поверхности**.

Волнистость поверхности - это совокупность неровностей, имеющих шаг больший, чем базовая длина, используемая для измерения шероховатости. Отношение высоты к шагу более 50 и менее 1000.

при $S/H = 50...1000$ – называется **микрогеометрическое отклонение формы поверхности**.

Волнистость в России не стандартизирована, то для ее оценки используют параметры шероховатости.

Регулярные микрорельефы – это неровности, которые в отличие от шероховатости и волнистости, одинаковы по форме, размерам и взаиморасположению.

при $S/H > 1000$ – **макрогеометрическое отклонение формы поверхности**;

Регулярный микрорельеф получают обработкой резанием или поверхностным пластическим деформированием роликами, шариками, алмазами.

3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.

Влияние механической обработки на состояние поверхностного слоя обрабатываемой заготовки

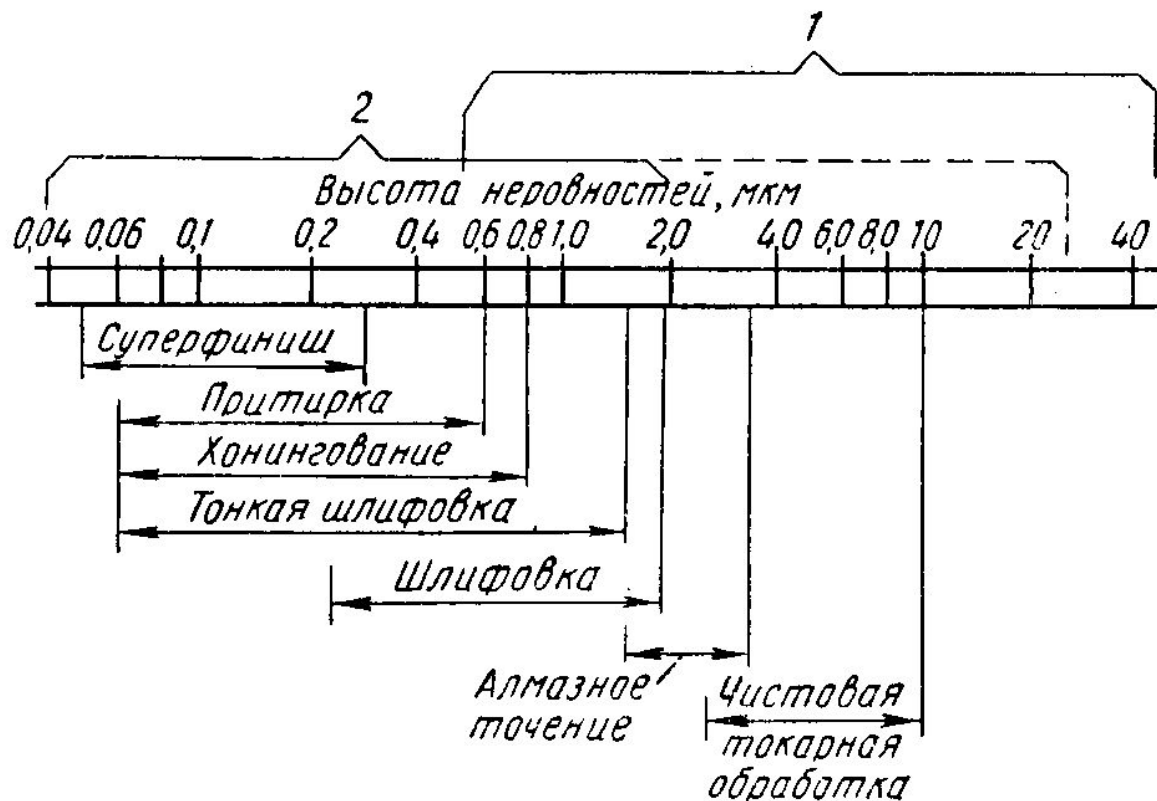


Рис. 320. Различные виды точной обработки поверхности и соответствующие им методы контроля (по Цейссу):

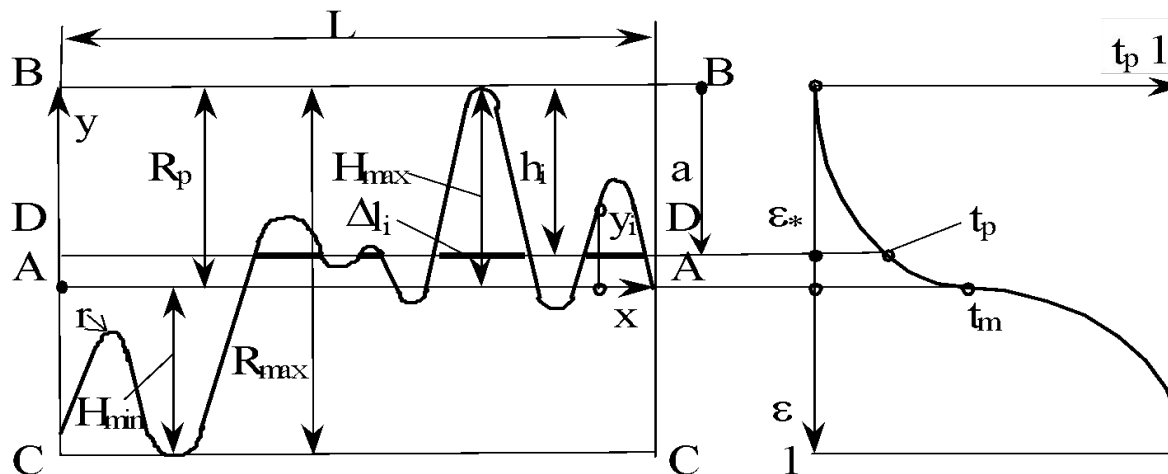
1 — с помощью оптического микроскопа. 2 — с помощью интерференционного микроскопа

3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.

Оценка шероховатости поверхностного слоя обрабатываемой заготовки

Основные характеристики микрогеометрии поверхностей регламентированы действующим в России ГОСТом 2789-73. Установленные этим стандартом характеристики шероховатостей иллюстрирует рис.

Основные из них: высотные - R_a , R_z и R_{max} и шаг микронеровностей - λ_m .



а – характеристики шероховатостей

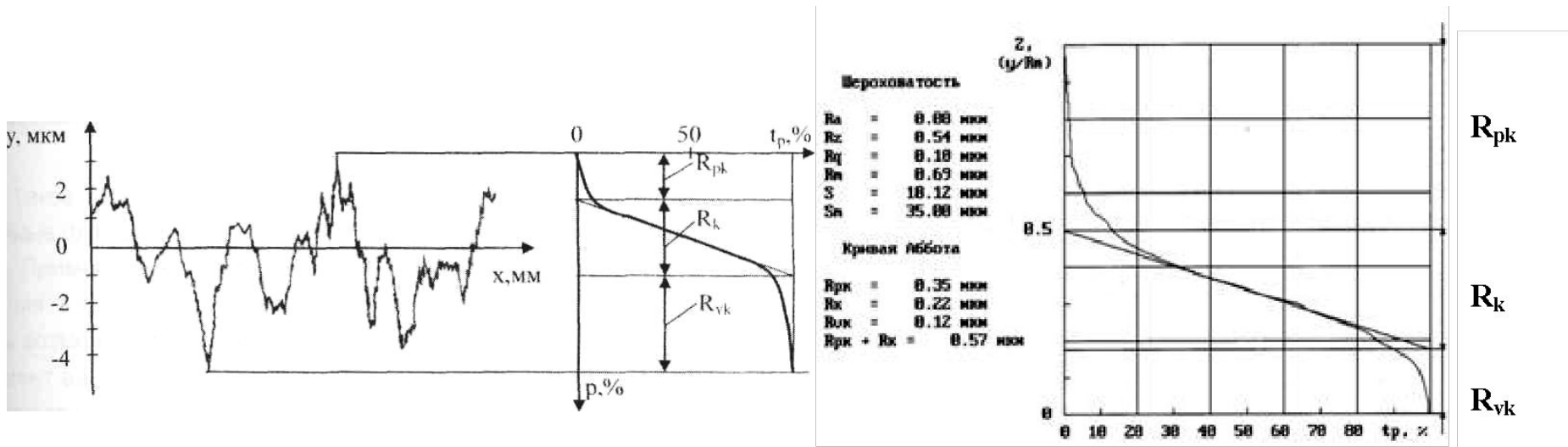
б – опорная кривая

R_a – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля шероховатостей от средней линии в пределах базовой длины L :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |h_i(x)| dx,$$

3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ КРИВЫХ АБОТА



- **R_a** - среднее арифметическое отклонение профиля;
- **R_z** - высота неровностей профиля по десяти точкам;
- **R_q** - среднее квадратическое отклонение профиля;
- **R_{max}** - наибольшая высота неровностей профиля;
- **S** - средний шаг местных выступов профиля;
- **S_m** - средний шаг неровностей профиля;
- **R_{pk}** - параметр, характеризующий высоту выступов быстро изнашивающихся в первый период эксплуатации (в период приработки);
- **R_k** - параметр, характеризующий основу профиля, которая длительное время находится в работе и является несущей площадью по мере срабатывания наружных слоев;
- **R_{vk}** - параметр, характеризующий глубину впадин профиля и соответственно смазывающую способность наружных слоев;
- **$R_{pk} + R_k$** - сумма параметров, характеризующая изнашиваемость рабочих поверхностей;

3.4. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) способом вибрационного накатывания

Параметры качества поверхностного слоя

Группа	Подгруппа	Наименование	Обозначение	Ед. измерения
Неровности поверхности	Шероховатость по ГОСТ 2789-73	Наибольшая высота неровностей профиля	$R_{\max}$	мкм
		Высота неровностей профиля по десяти точкам	R_z	мкм
		Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a	мкм
		Средний шаг неровностей профиля	S_m	мкм
		Средний шаг неровностей профиля по вершинам	S	мкм
	Не стандартизованные параметры шероховатости	Относительная опорная длина профиля	t_p	%
		Радиус при вершине неровностей	r	мкм
		Радиус при впадине неровностей	r'	мкм
		Угол наклона образующих неровностей	β	град.
		Число выступов на ед. длины (площади) поверхности	N	$\text{см}^{-1}(\text{см}^{-2})$
	Волнистость	Неоднородность неровностей	$\sigma(R_a)$	мкм
		Высота волн	H	мкм
	Направление неровностей	Шаг волн	L	мкм
		Угол между направлением неровностей и направлением действия внешней нагрузки	α	град.
Физико-химическое состояние поверхностного слоя	Степень деформации	Угол между направлением неровностей и направлением действия внешней нагрузки	α	град.
		Степень деформации отдельных зерен	ε_z	%
	Деформационное упрочнение	Степень деформации совокупности зерен	ε	%
		Глубина наклепа	h_N	мкм
	Структура	Степень наклепа	U_N	%
		Размеры зерен	$\bar{D}_z$	мкм
		Размеры субзерен	$\bar{D}_{\text{бл}}$	мкм
		Угол разориентировки зерен	α_z	град.
		Угол разориентировки субзерен	$\alpha_{\text{бл}}$	град.
		Параметры решетки	$a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$	A , град.
		Плотность дислокаций	ρ	см^{-2}
		Концентрация примесных и легирующих элементов	C	%
Напряжения	Остаточные напряжения	Первого рода	$\sigma_{\text{ост}}^I$	МПа
		Второго рода	$\sigma_{\text{ост}}^{II}$	МПа
		Статические искажения	$\sigma_{\text{ост}}^{III}$	МПа

3.4. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) способом вибрационного накатывания

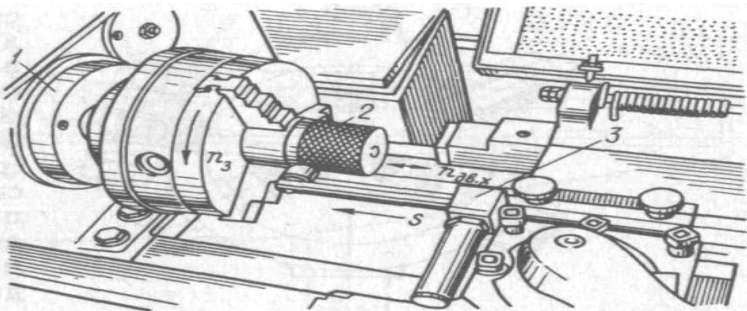
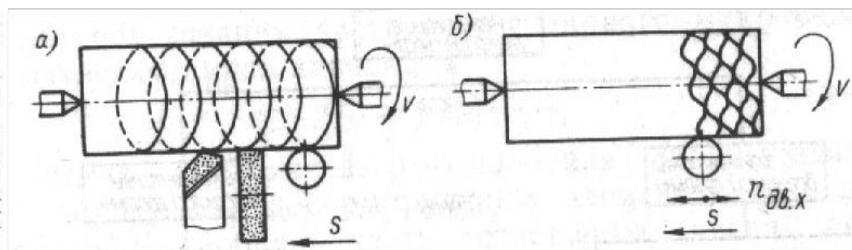
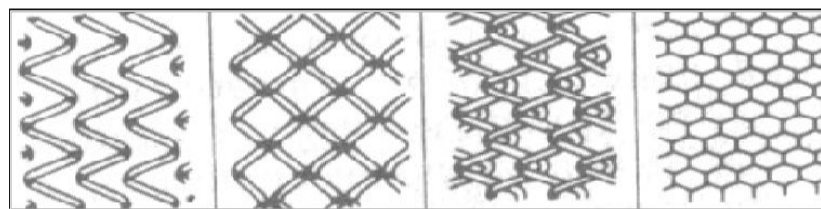


Схема виброголовки к токарному станку с осцилляционным движением:

1 — станок; 2 — заготовка;
3 — виброголовка.



Принципиальные схемы обработки: а- точение, шлифование, обкатывание шаром; в- вибронакатывание шаром



Тип I

Тип II

Тип III

Тип IV

Тип I - канавки не касаются друг друга

Тип II - канавки касаются, друг друга

Тип III - канавки пересекаются

Тип IV - создан полностью новый регулярный микрорельеф

С увеличением ширины канавки и уменьшением подачи s все большая часть исходной поверхности будет перекрываться новым регулярным микрорельефом.

Параметры режима: виброобкатывания, n дв.х. — частота осцилляций (двойной ход деформирующего элемента)

n_3 — частота вращения заготовки.

S — подача

инструмента P —

усилие вдавливания.

Параметры режима виброобкатывания:

l - амплитуда

осцилляций

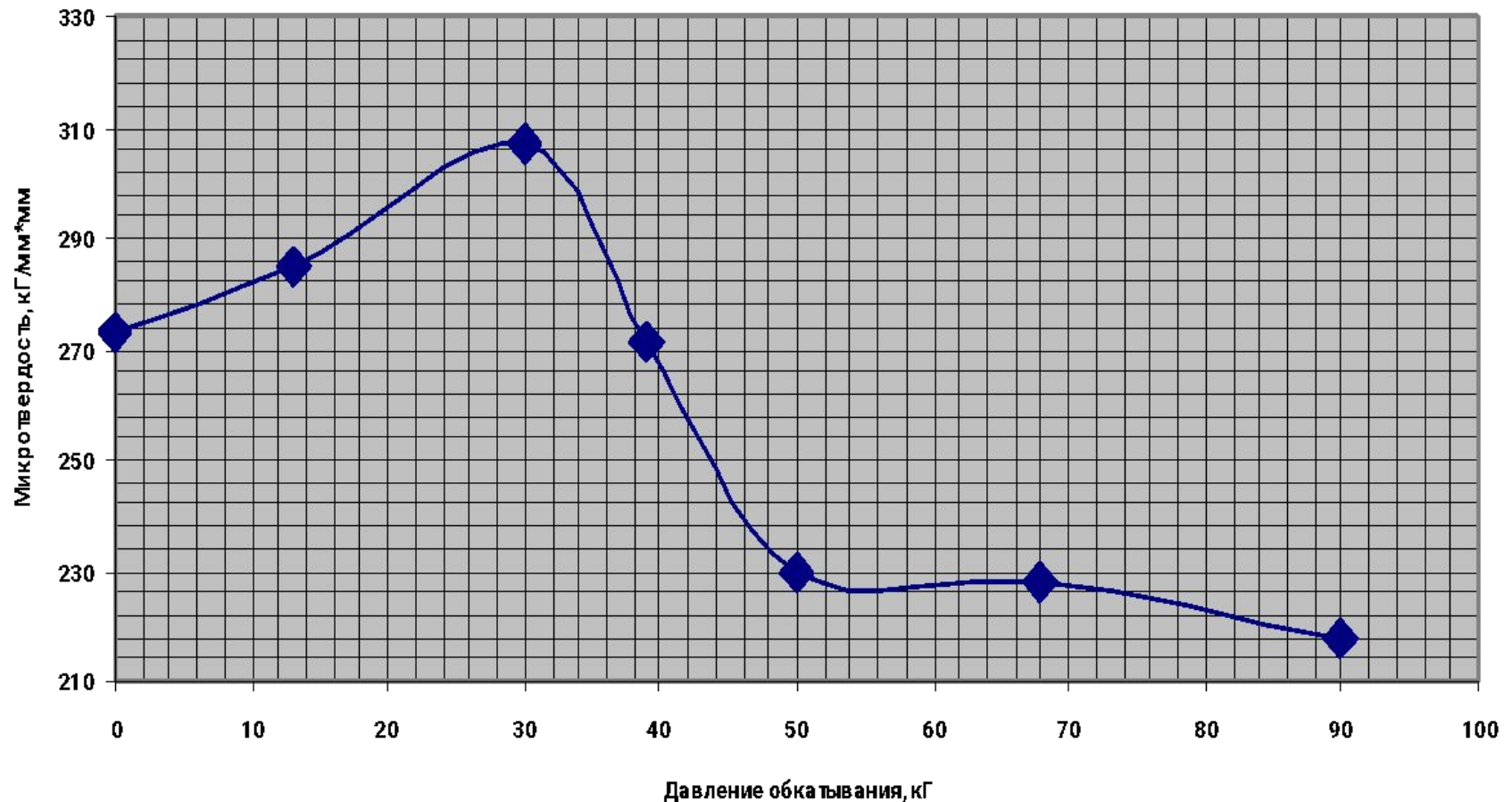
T - период

осцилляций

Параметры виброобкатывания:

$P=30$ кг, $S = 5.3$ мм/об, $n_3 = 30$ об/мин, $d_{ш}=8$ мм, $F_k=30-40\%$, n дв.х = 1400 об /мин;

Повышение износостойкости поверхности за счёт нанесения регулярного микрорельефа (РМР)



3.4. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) способом вибрационного накатывания

Синусоидальный РМР

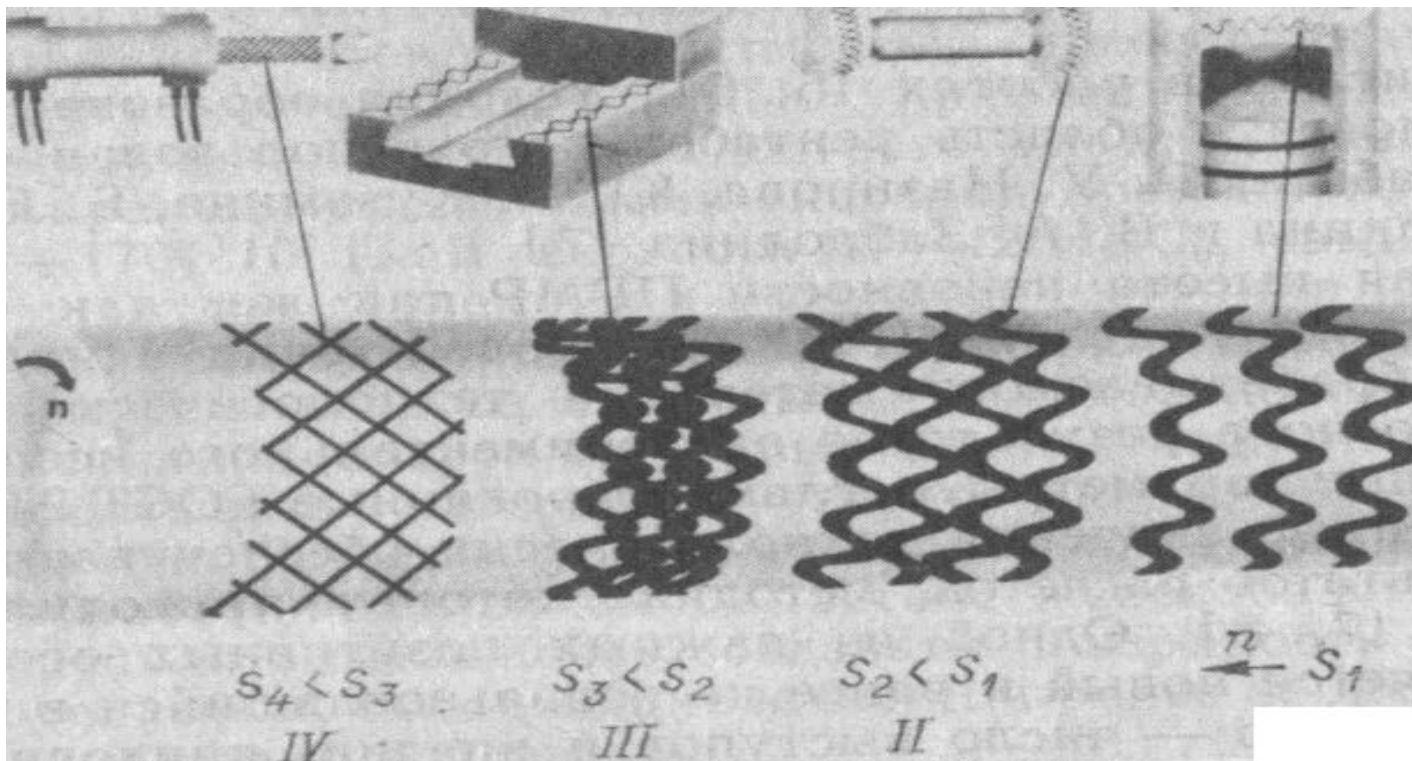


Схема нанесения регулярных микрорельефов (РМР) различных видов:

/ — канавки не касаются друг друга (частично регулярный микрорельеф);

// — канавки касаются, друг друга;

/// — канавки пересекаются;

IV — исходная поверхность полностью перекрыта канавками — создан полностью новый регулярный микрорельеф

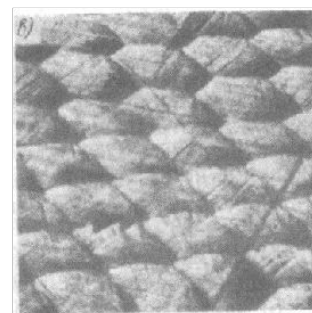
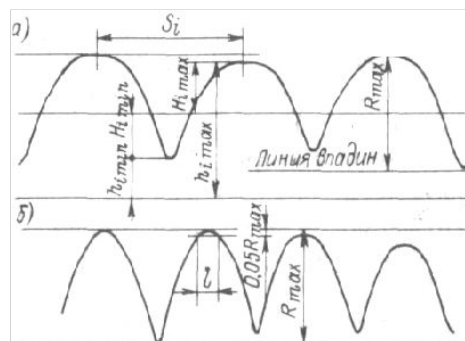
3.5. Исследование шероховатости поверхности до и после нанесения регулярного микрорельефа (РМР) с разной величиной амплитуды синусоиды.

Измерения характеристик микрогеометрии профилей поверхности до и после нанесения регулярного микрорельефа (РМР) были выполнены с помощью немецкого профилометра «MarSurf PS1» в пределах базовой длины 2555 мкм.

Были получены: профилограмма; относительная опорная длина профиля t_p ; стандартные параметры шероховатости R_a , R_z , R_m , R_q , S_m , S .



Профилометр «MarSurf PS1»

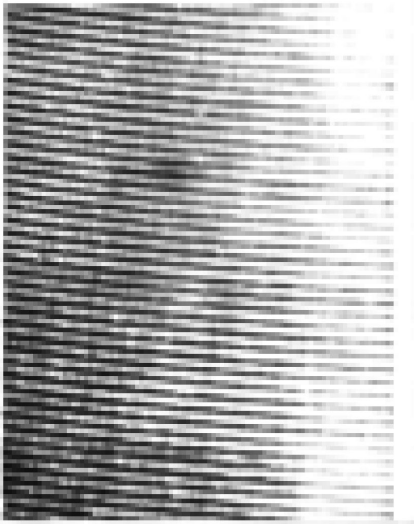
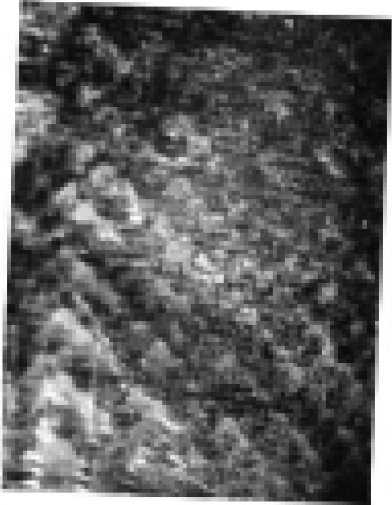


Профилограммы поверхностей с РМР холоднокатаного листа в направлении:
а — продольном, б — поперечном (вертикальное увеличение 2000^x, горизонтальное—80^x); в — поверхность прокатанного листа с РМР четырехугольным выпуклым ПРМР;

Материалом для исследования были выбраны цилиндрические заготовки из **сплава АМц** диаметром 20 мм как в исходном состоянии (после точения), так и после нанесения с помощью вибронакатывания регулярных микрорельефов в виде касающихся синусоид II типа.

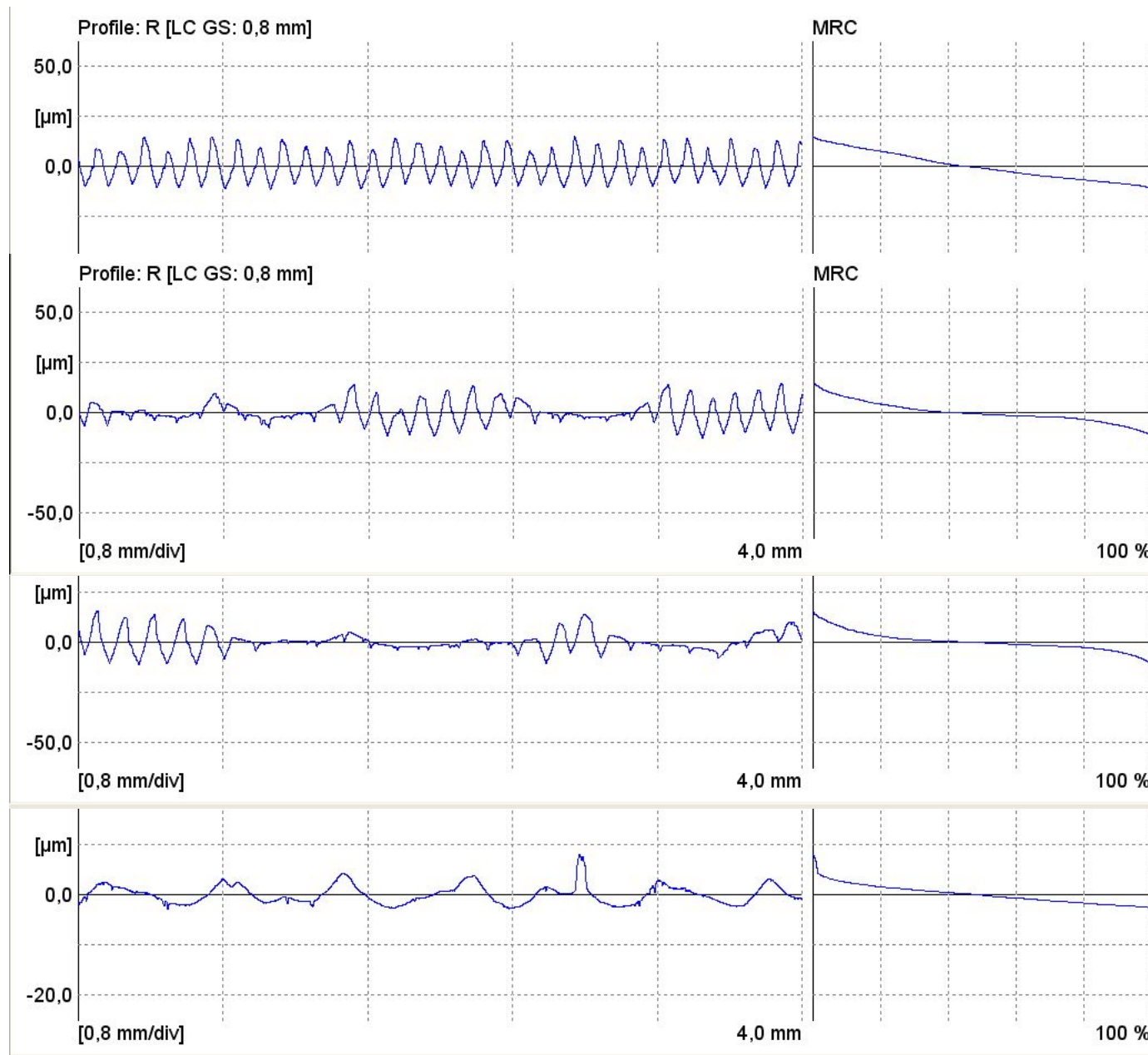
Обработки **РМР-II-1; РМР-II-2; РМР-II-3** отличались величиной амплитуды синусоиды, которая была равна **0,88; 0,65 и 0,10 мм**, соответственно.

Повышение износостойкости поверхности за счёт нанесения регулярного микрорельефа (РМР)

ТОЧЕНИЕ	РМР-II-1	РМР-II-2	РМР-II-3
			

Обработки **РМР-II-1;** **РМР-II-2;** **РМР-II-3**
отличались величиной амплитуды синусоиды, которая
была равна **0,88;** **0,65;** **0,10 мм,**
соответственно.

Изменение шероховатости до и после нанесения регулярного микрорельефа (РМР)



ТОЧЕНИЕ

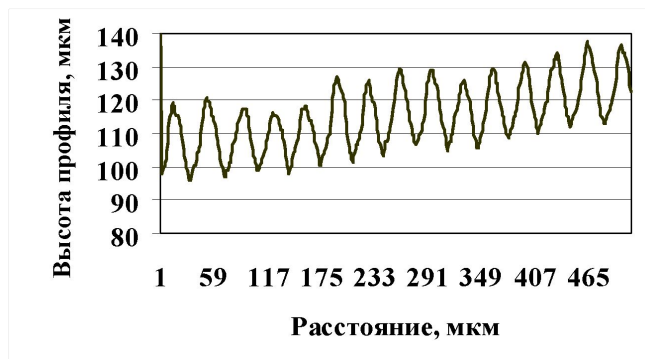
PMP-II-1

PMP-II-2

PMP-II-3

Повышение износостойкости поверхности за счёт нанесения регулярного микрорельефа (РМР)

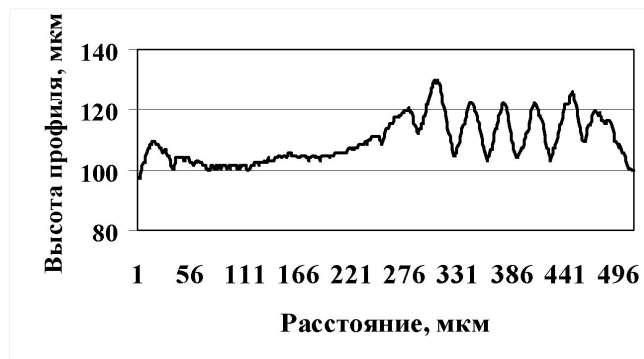
ТОЧЕНИЕ



РМР-II-1



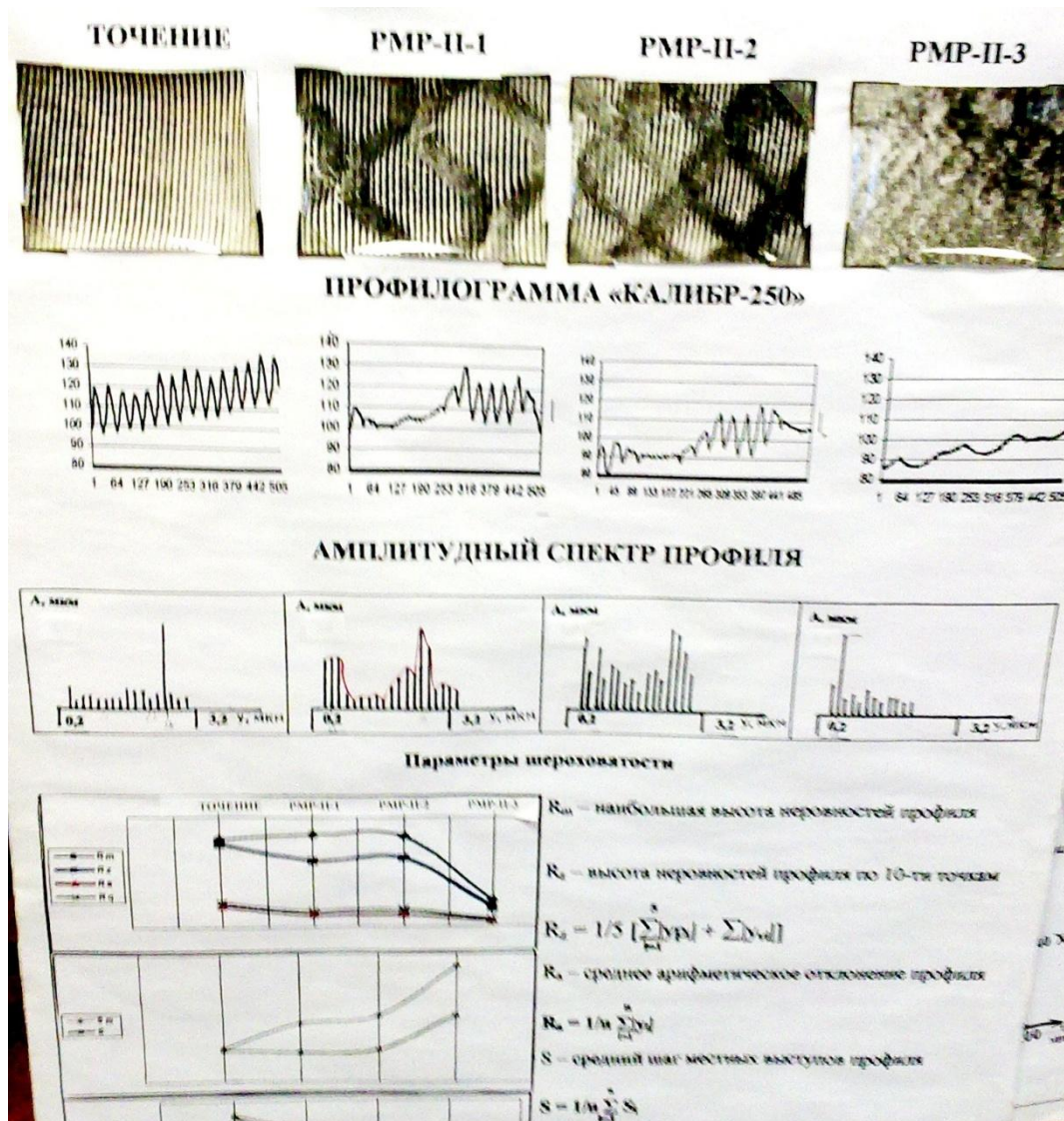
РМР-II-2



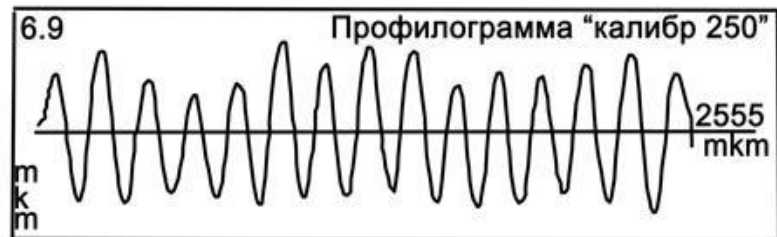
РМР-II-3



ВЛИЯНИЕ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ РМР

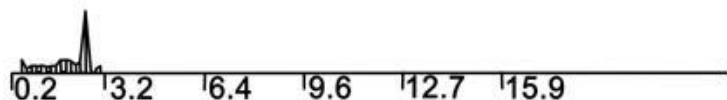


ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ (ИСХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ)

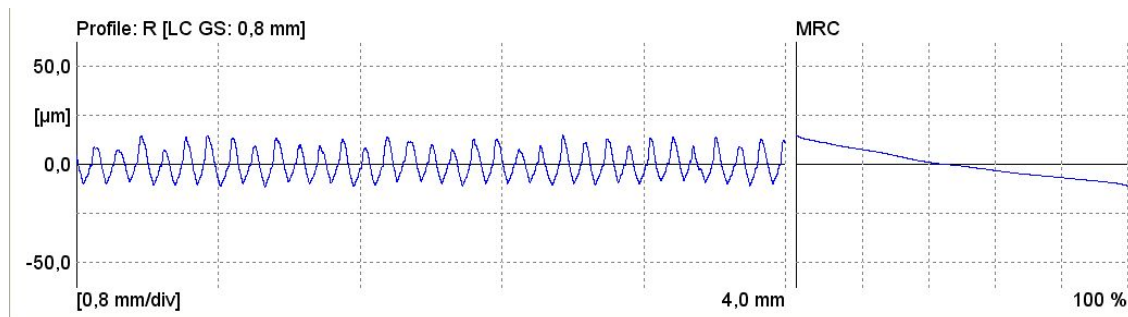
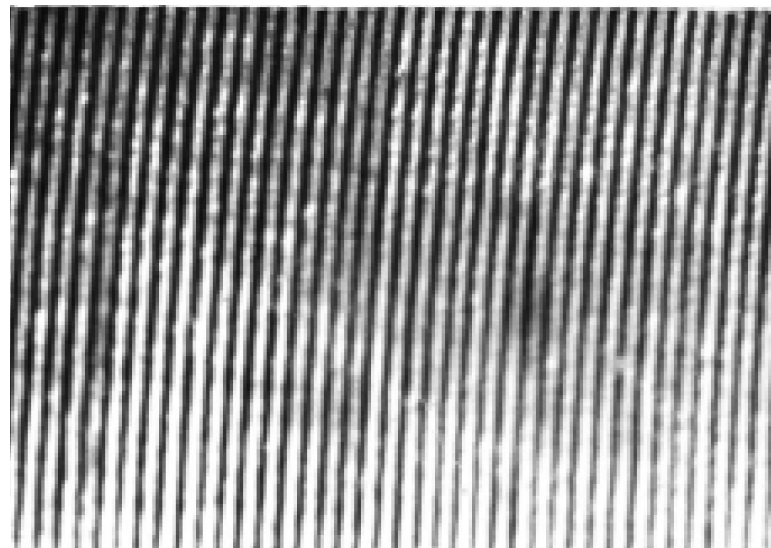
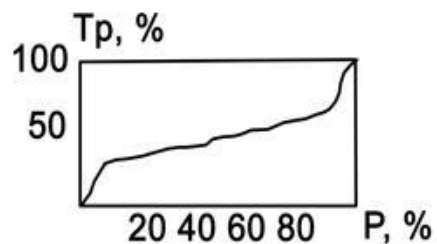


$R_m = 12.904$ $R_a = 3.234$ $S_m = 182.50$
 $R_z = 12.001$ $R_q = 3.655$ $S = 170.33$

Амплитудный спектр профиля



Кривая опорной длины профиля

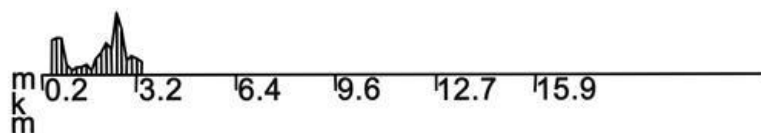


ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ (ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ РМР-II-1)

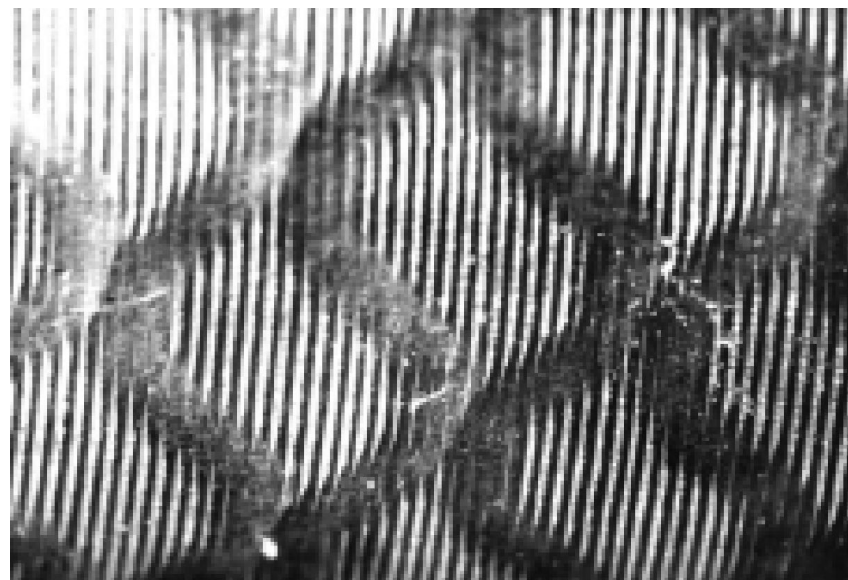
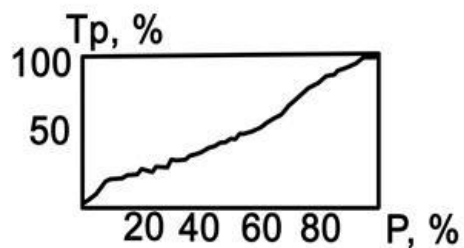


$R_m = 13.568$ $R_a = 1.938$ $S_m = 319.38$
 $R_z = 9.859$ $R_q = 2.496$ $S = 159.69$

Амплитудный спектр профиля

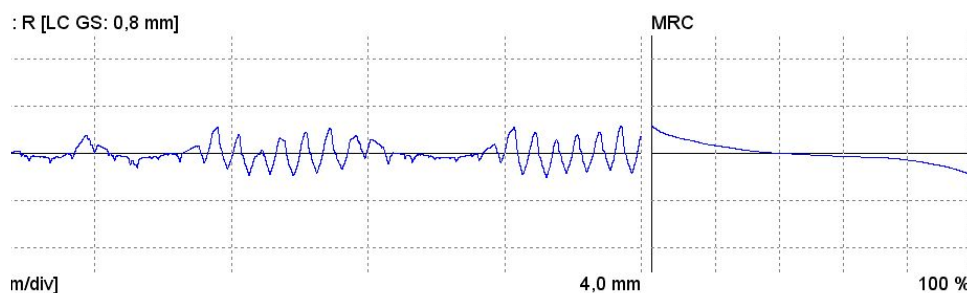


Кривая опорной длины профиля



амплитуда синусоиды была равна 0,88 мм

: R [LC GS: 0,8 mm]

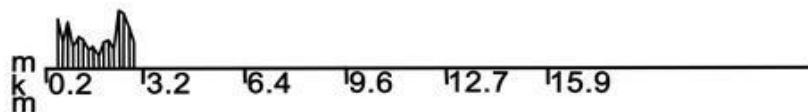


ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ (ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ РМР-II-2)

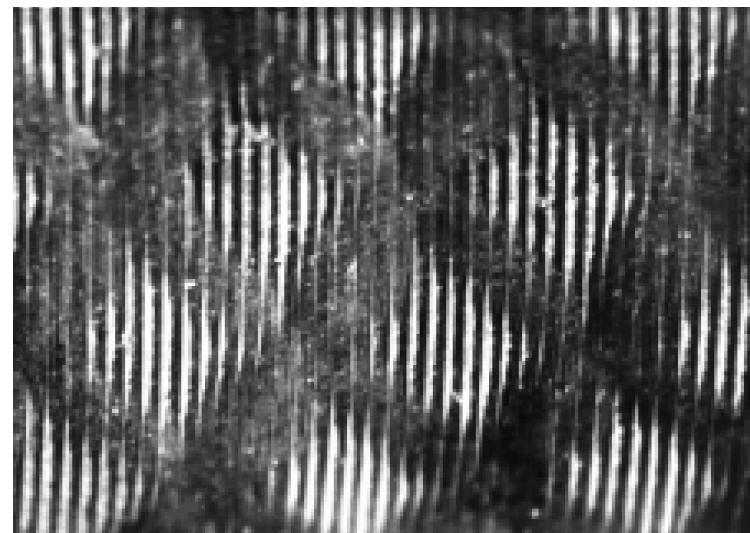
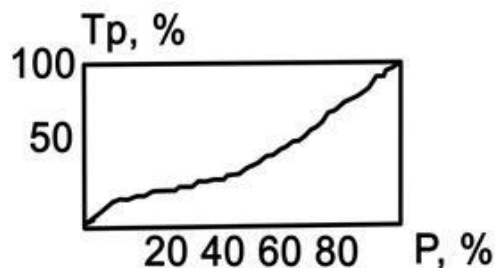


Rm = 13.370 Ra= 1.941 Sm= 365.00
Rz = 10.203 Rq = 2.596 S = 182.50

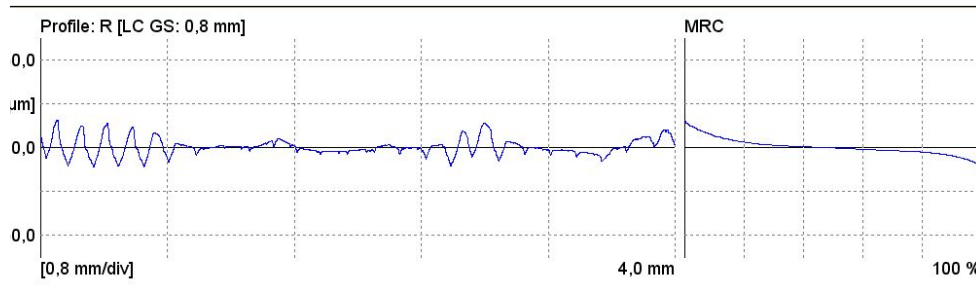
Амплитудный спектр профиля



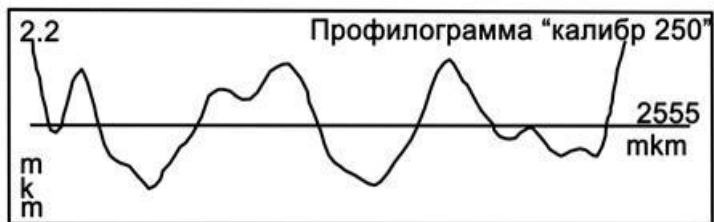
Кривая опорной длины профиля



амплитуда синусоиды была равна 0,65 мм

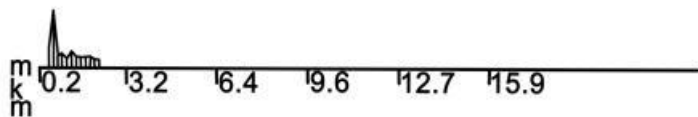


ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ (ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ РМР-II-3)

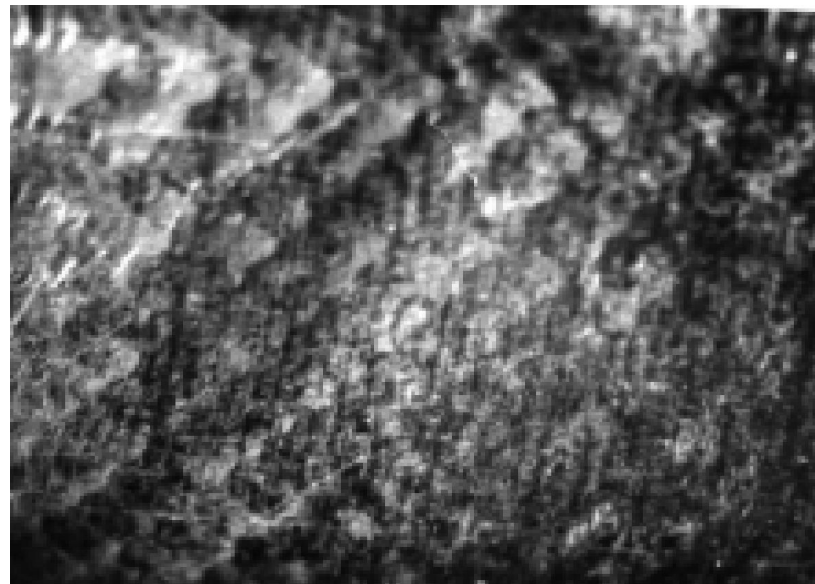
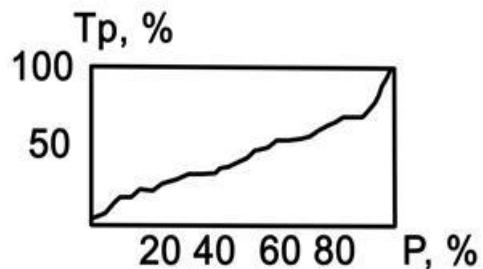


$R_m = 3.863$ $R_a = 0.875$ $S_m = 638.75$
 $R_z = 2.613$ $R_q = 1.011$ $S = 365.00$

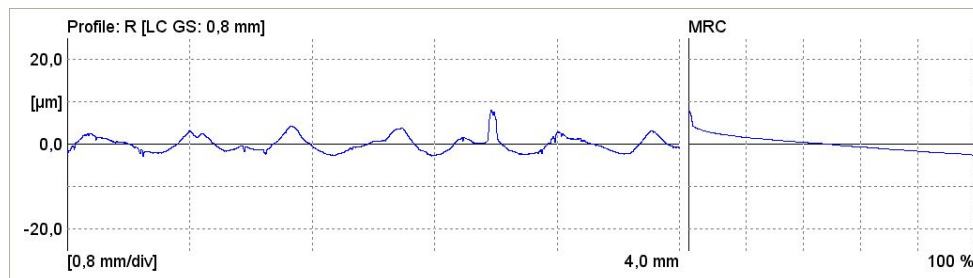
Амплитудный спектр профиля



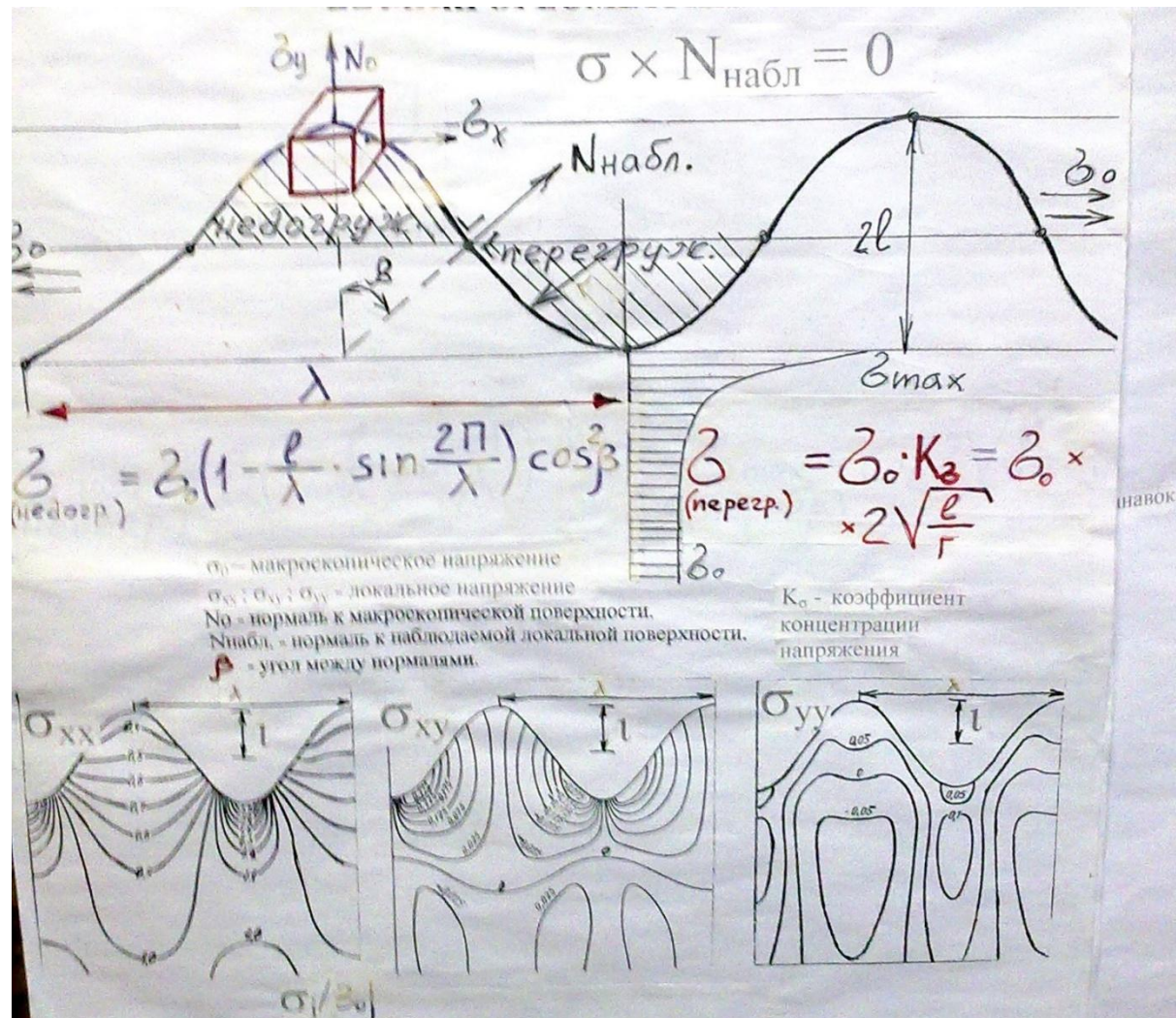
Кривая опорной длины профиля



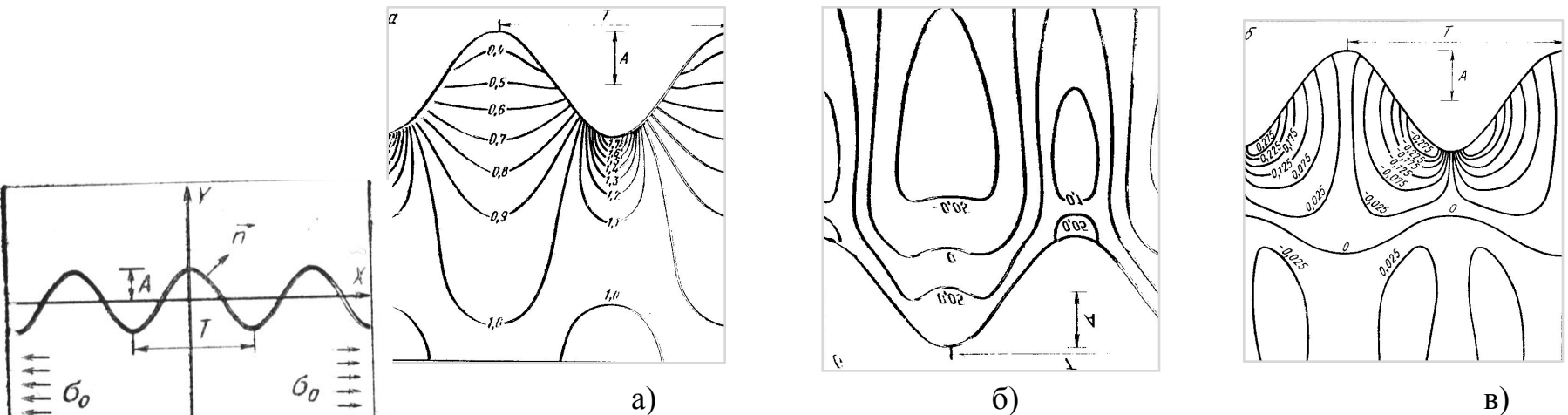
амплитуда синусоиды была равна 0,10 мм



3.5. Исследование шероховатости поверхности до и после нанесения РМР



3.5. Исследование шероховатости поверхности до и после нанесения РМР



Распределение внутренних напряжений в приповерхностном слое

σ_{xx} (а); σ_{yy} (б); σ_{xy} (в).

Локальное напряжение, σ_0^i , действующее **в выступе**, связано следующим соотношением с "макроскопическим напряжением" σ_0 , действующим в толще детали:

$$\sigma_0^i (\text{недогр.}) = \sigma_0 \cdot (1 - R/S \cdot \sin 2\pi/S) \cdot \cos^2 \beta \quad (1)$$

В любой точке поверхности **во впадине**, которые являются концентраторами напряжения, вероятно, должно выполняться соотношение:

$$\sigma_0^i (\text{перегр.}) = \sigma_0 \cdot 2 (R/r)^{1/2} = \sigma_0 \cdot K \quad (2)$$

где K – коэффициент концентрации напряжений в вершинах неровностей во впадинах размером R и радиусом закругления r .

Как видно из рис., в поверхностном слое детали, имеющем волнообразную **шероховатость с амплитудой R , периодом S , и их отношением R/S** , происходит перераспределение внутренних напряжений: выступы оказываются **недогруженными**, а впадины **перегруженными**.

3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

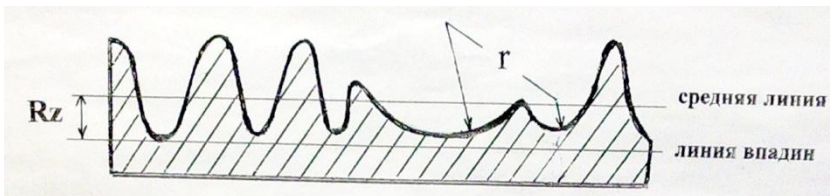
ДО И ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ РМР С РАЗНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ АМПЛИТУДЫ
СИНУСОИДЫ

l мм	Вид обработки	Y мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	S мкм	$\frac{Ra}{S}$	$\frac{Rz}{S}$	Г, мкм	К
-	исходное (точение)	2,56	3,234	12,08	170,3	0,019	0,010	16	1,75
0,88	РМР- II-1	2,56 0,84	1,938	9,86	159,7	0,012	0,062	40	0,98
0,65	РМР- II-2	2,56 0,84 0,52	1,941	10,20	182,5	0,011	0,056	155	0,513
0,10	РМР- II-3	0,68	0,875	2,61	365,0	0,002	0,007	962	0,104

Обработки **РМР-II-1; РМР-II-2; РМР-II-3** отличались величиной **амплитуды синусоиды**, которая была равна **0,88; 0,65 и 0,10 мм**, соответственно.

3.5. Исследование шероховатости поверхности до и после нанесения РМР с разной величиной амплитуды синусоиды

$$K_{\sigma} = 2 \cdot (R_z/r)^{1/2}$$

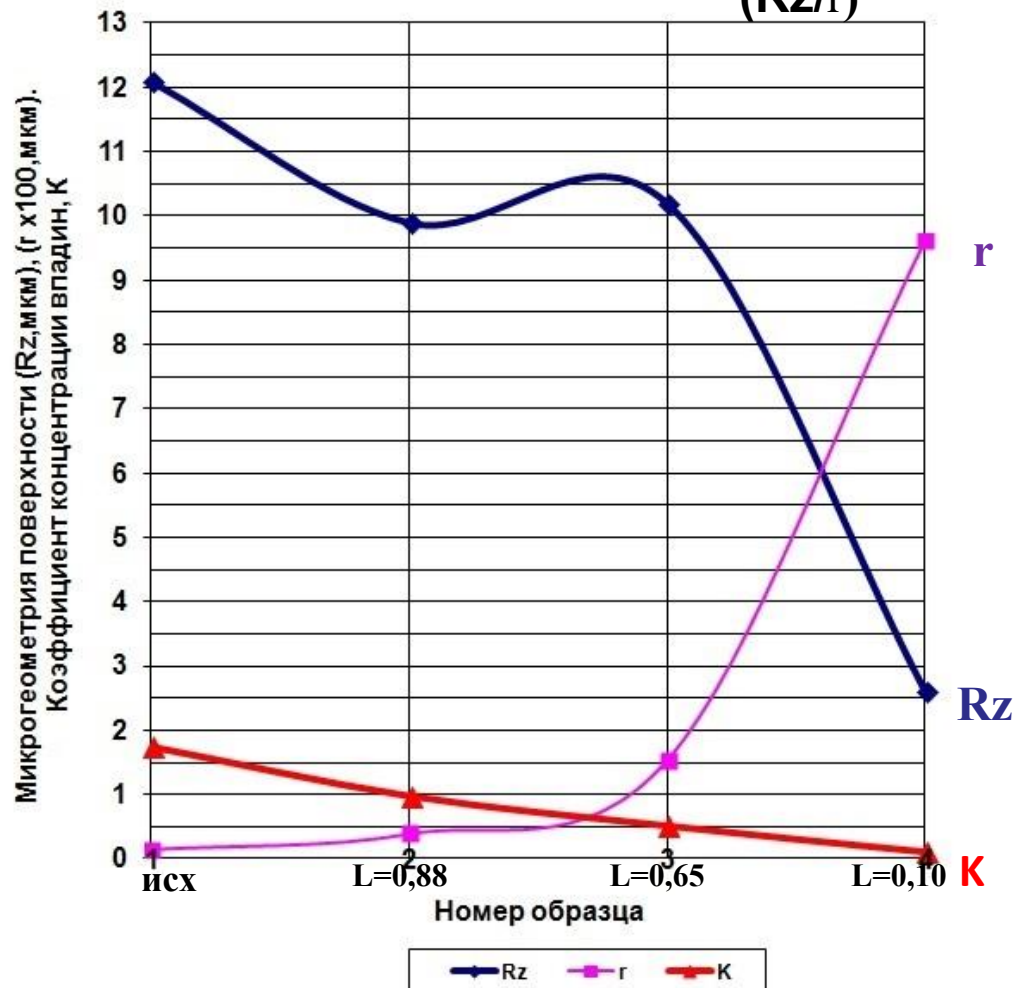


№	Вид обработки	Rz, мкм	r, мкм	K σ	L мм
1	исходное (точение)	12,1	16	1,75	исх
2	РМР- II-1	9,9	40	0,98	0,88
3	РМР- II-2	10,2	155	0,513	0,65
4	РМР- II-3	2,6	962	0,104	0,10

Rz – шероховатость, мкм

r – радиус закругления
неровностей при впадинах, мкм

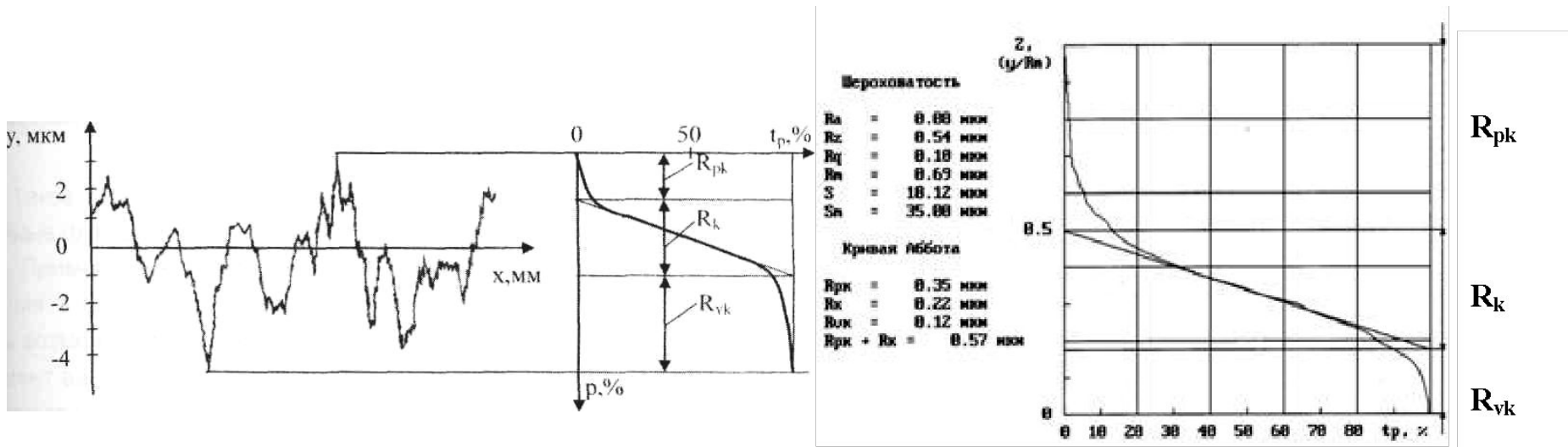
K σ – коэффициент концентрации
напряжений в вершинах
неровностей при впадинах



Концентрация напряжений во впадинах в исходном состоянии (1) и после различных видов нанесенного РМР. РМР-II-1 (2); РМР-II-2 (3); РМР-II-4) с величиной **амплитуды синусоиды**, которая была равна **0,88; 0,65 и 0,10 мм**, соответственно.

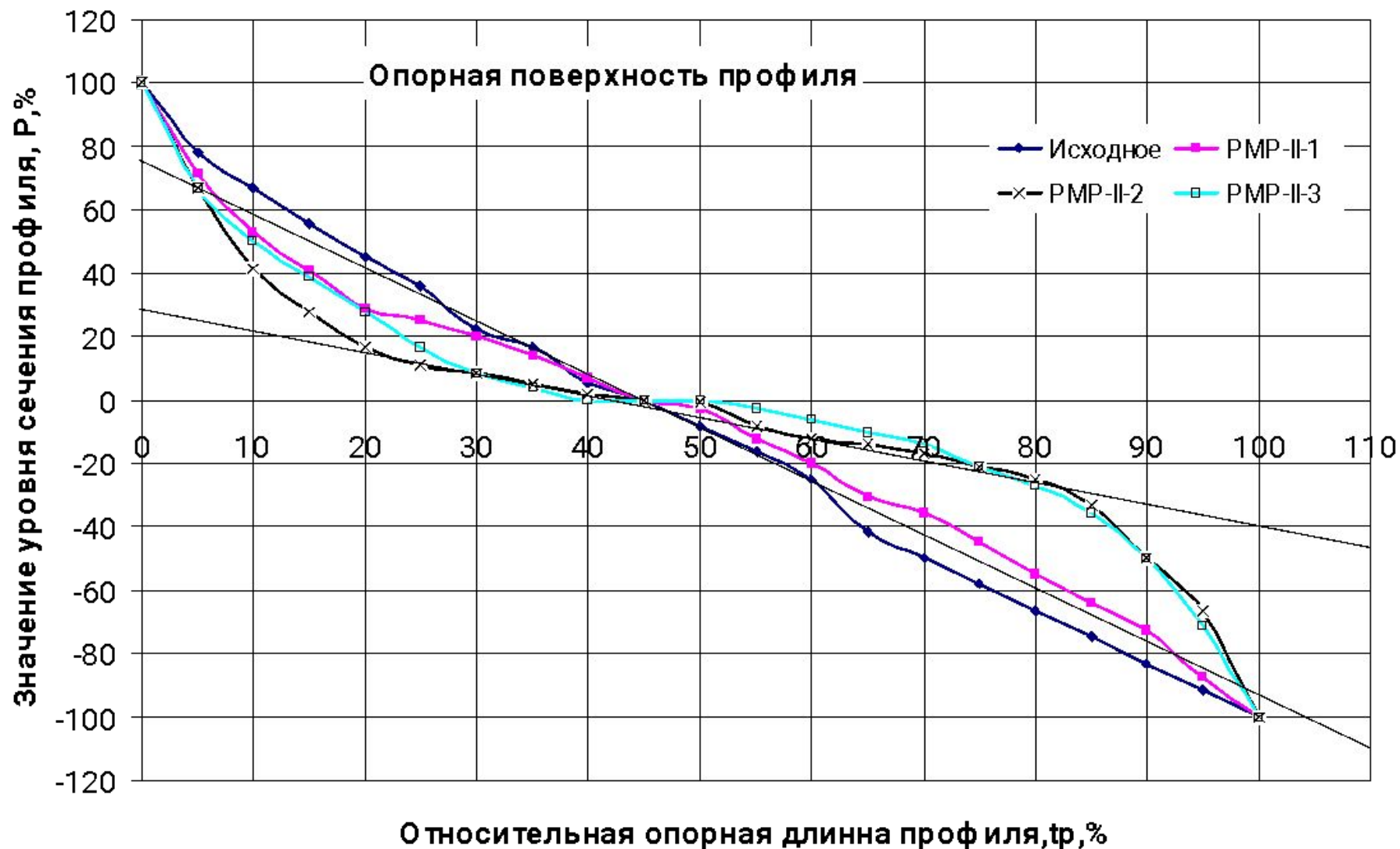
3.5. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ КРИВЫХ АБОТА



- R_a - среднее арифметическое отклонение профиля;
- R_z - высота неровностей профиля по десяти точкам;
- R_q - среднее квадратическое отклонение профиля;
- R_{max} - наибольшая высота неровностей профиля;
- S - средний шаг местных выступов профиля;
- S_m - средний шаг неровностей профиля;
- R_{pk} - параметр, характеризующий высоту выступов быстро изнашивающихся в первый период эксплуатации (в период приработки);
- R_k - параметр, характеризующий основу профиля, которая длительное время находится в работе и является несущей площадью по мере срабатывания наружных слоев;
- R_{vk} - параметр, характеризующий глубину впадин профиля и соответственно смазывающую способность наружных слоев;
- $R_{pk} + R_k$ - сумма параметров, характеризующая изнашиваемость рабочих поверхностей;

3.5. Исследование шероховатости поверхности до и после нанесения РМР с разной величиной амплитуды синусоиды



Обработки **РМР-II-1; РМР-II-2; РМР-II-3** отличались величиной **амплитуды синусоиды**, которая была равна **0,88; 0,65 и 0,10 мм**, соответственно.

3.6. Схемы вибронакатывания РМР и их связь с эксплуатационными свойствами деталей

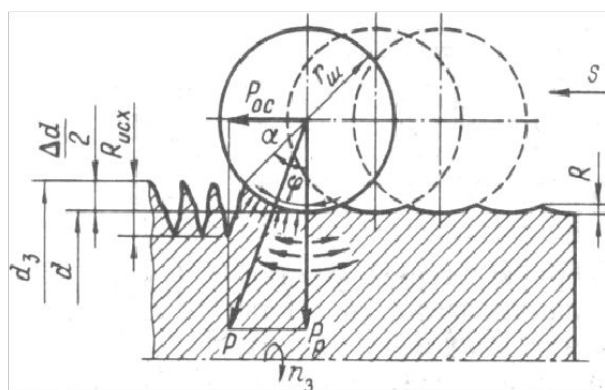
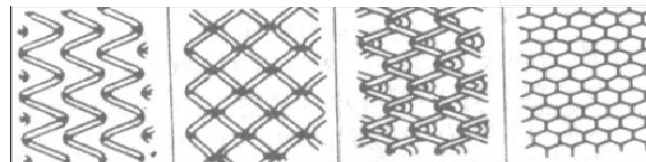


Схема деформации
поверхностных
неровностей

d_3 — диаметр заготовки;
 d — диаметр детали;
 Δd — величина остаточной деформации;
 $R_{исх}$ — высота неровностей исходной поверхности заготовки;
 R — высота неровностей детали после обкатывания.



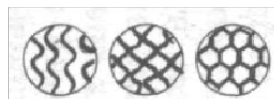
Тип I

Тип II

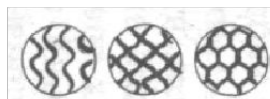
Тип III

Тип IV

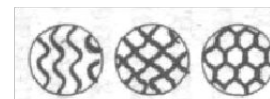
Улучшена
прирабатываемость



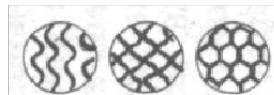
Снижены
потери на трение



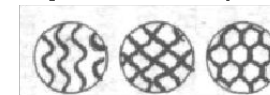
Снижено
трение в вакууме



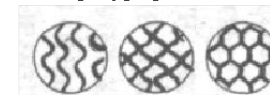
Улучшены
эстетические свойства



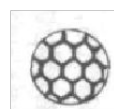
Повышено
сопротивление ползучести



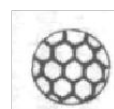
Повышен
ресурс работы



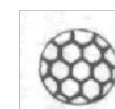
Повышена
контактная жёсткость



Повышена
противозадирность

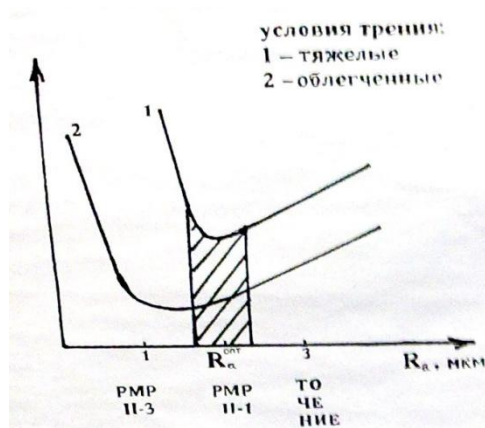


Повышение
сопротивления коррозии

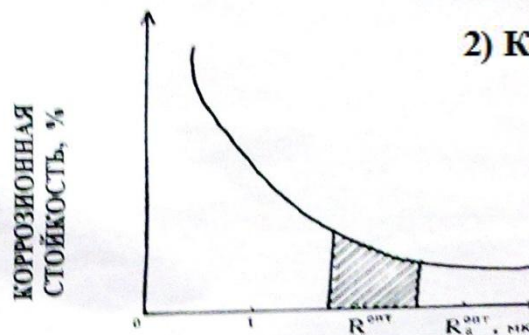


3.6. Схемы вибронакатывания РМР и их связь с эксплуатационными свойствами деталей

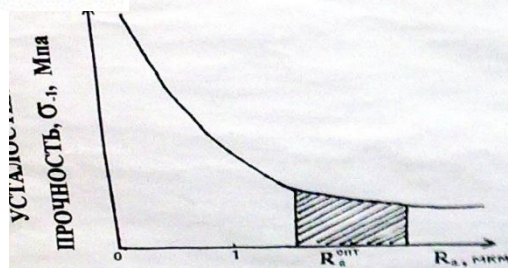
1) Износ



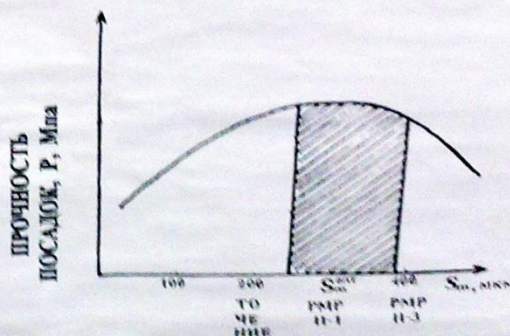
2) Коррозионная стойкость



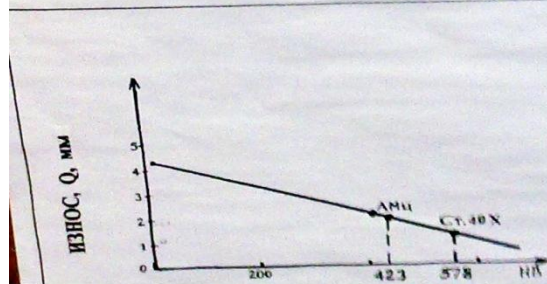
3) Усталостная прочность



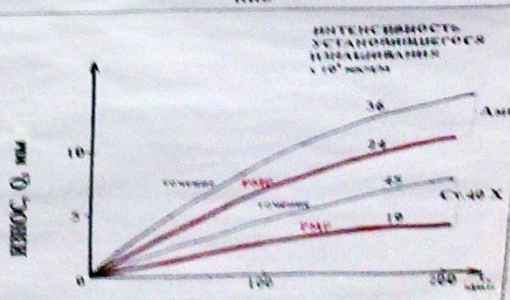
4) Прочность посадок



4) Износ

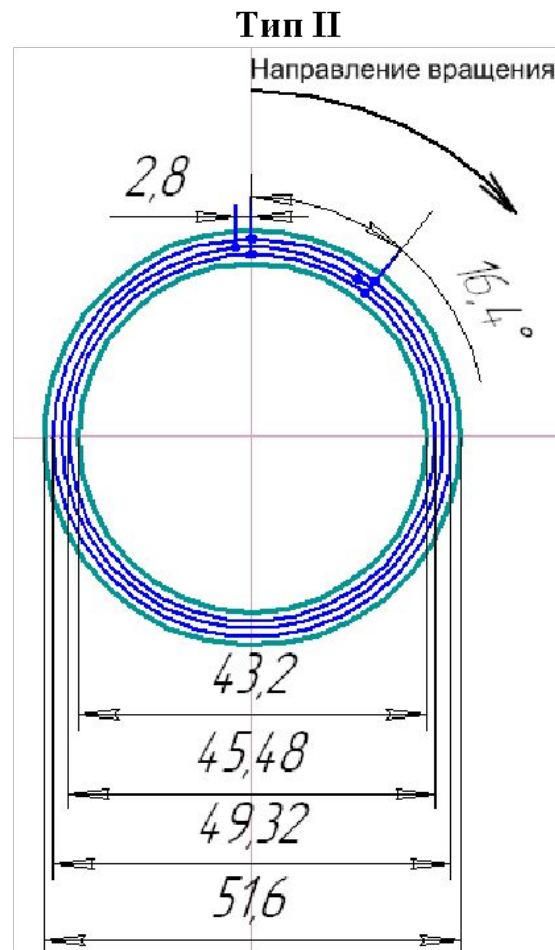
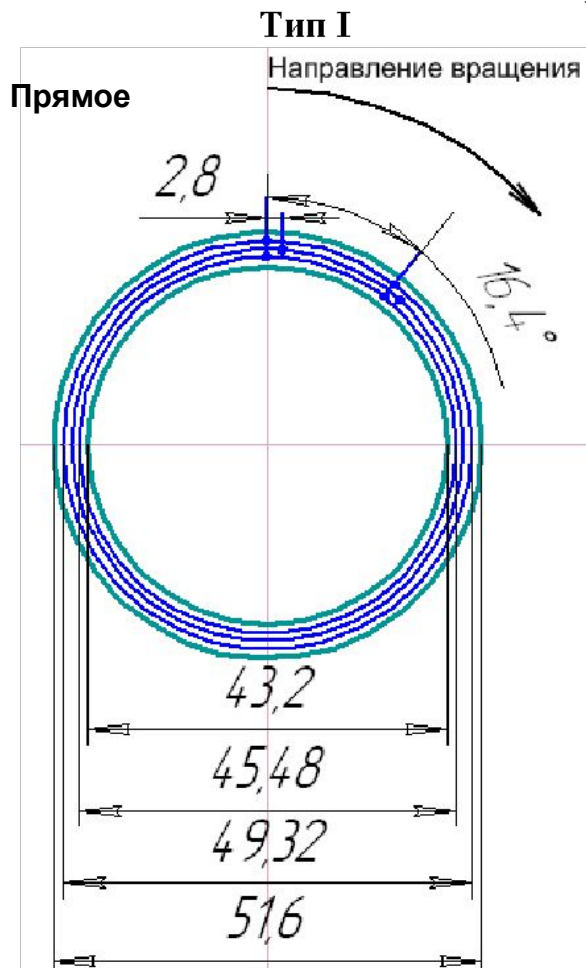


5) Износ



3.7. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) с целью повышения износостойкости трибоузлов.

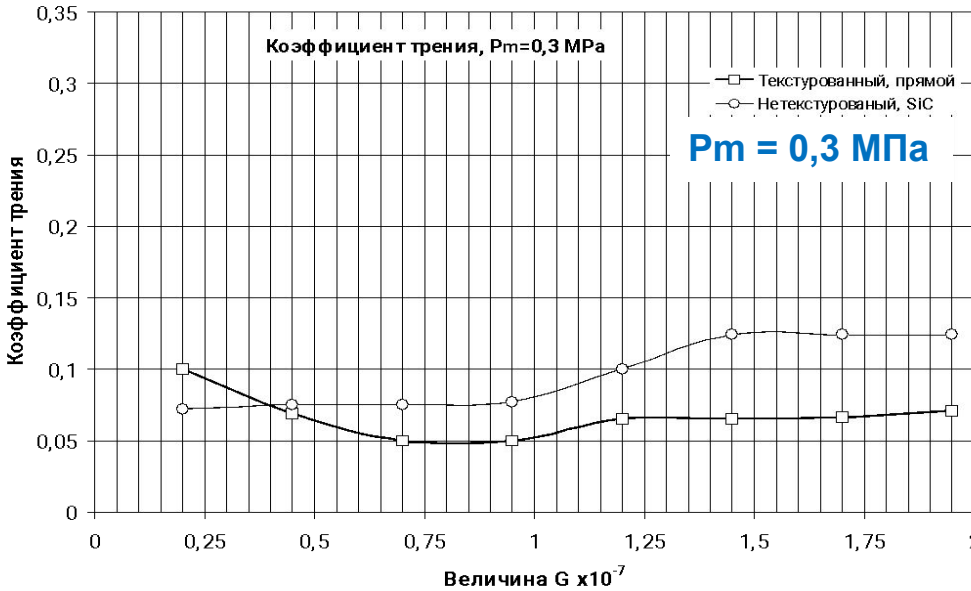
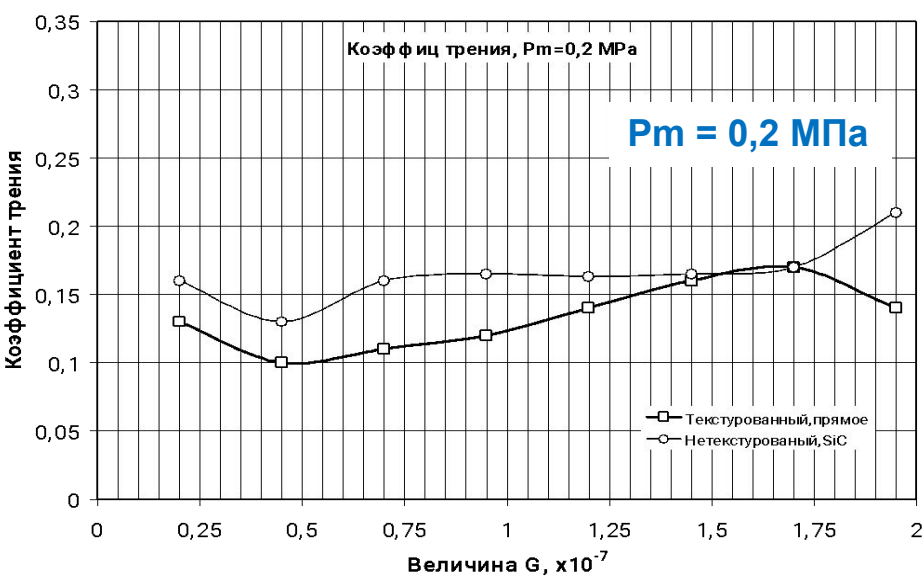
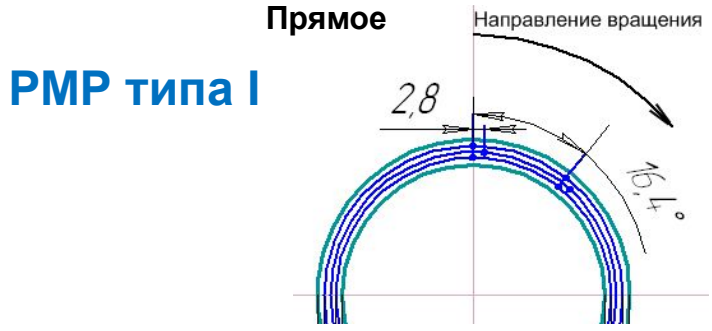
Микроточечный РМР



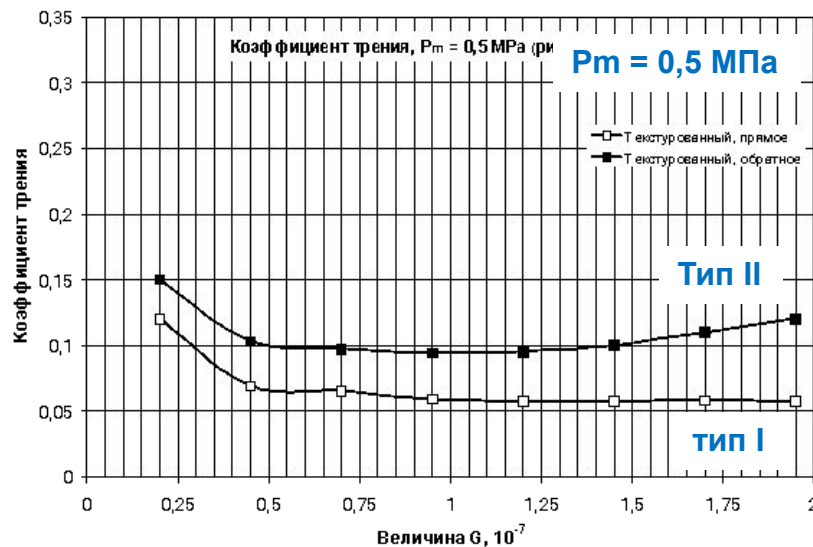
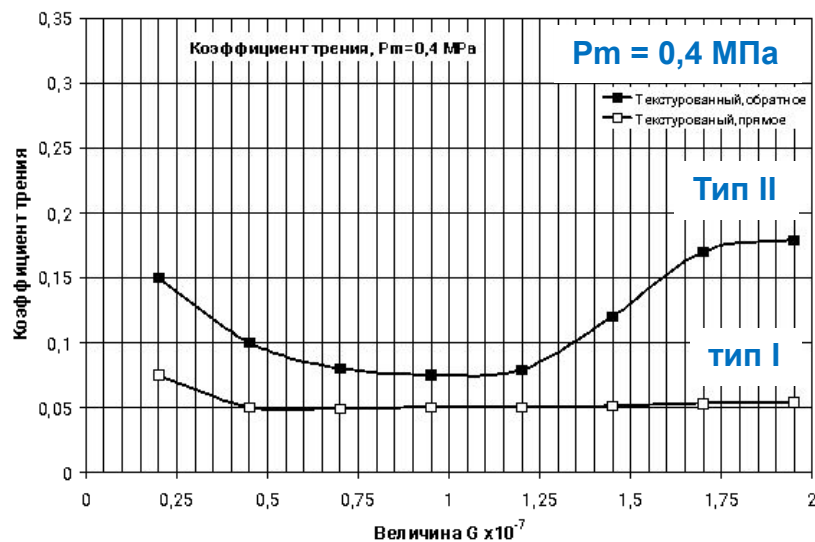
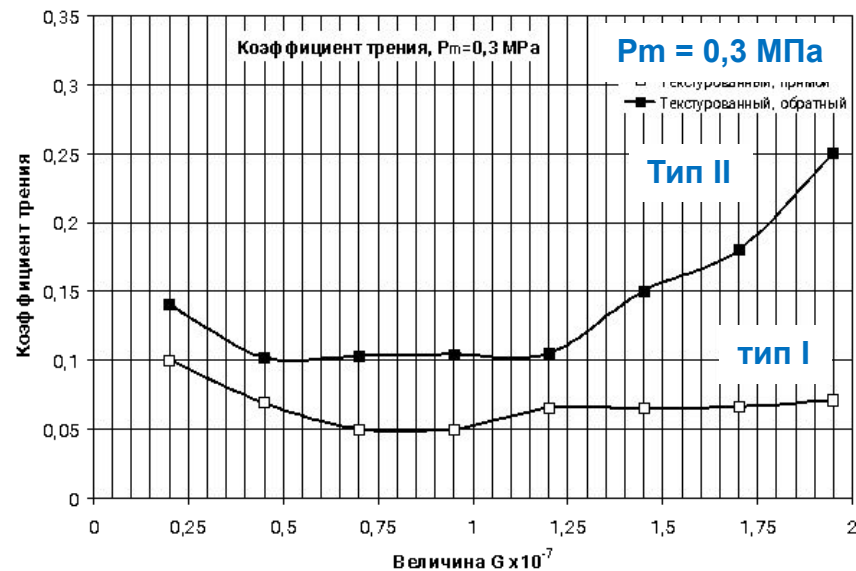
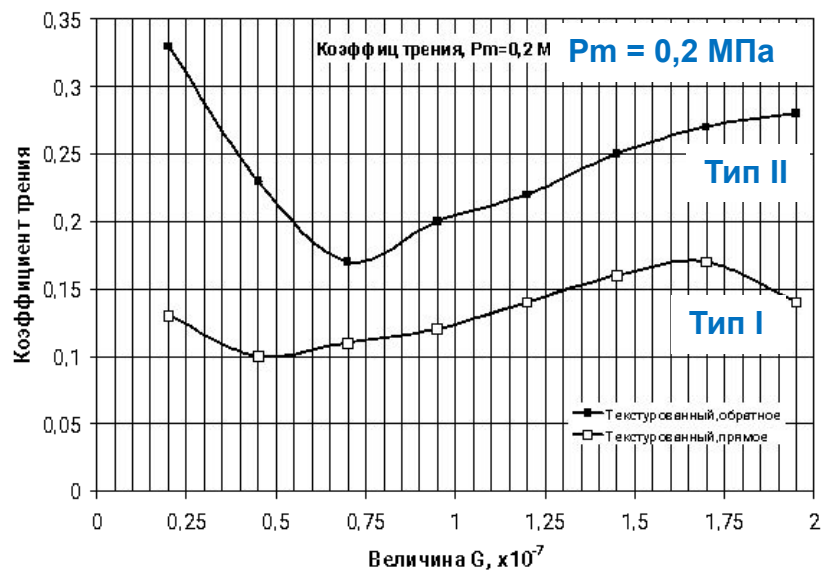
3.7. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) с целью повышения износостойкости трибоузлов.

Результаты оценки коэффициента трения до и после нанесения регулярного микрорельефа типа I

Зависимость коэффициента трения от числа Герси G в трибопаре карбон – карбид кремния

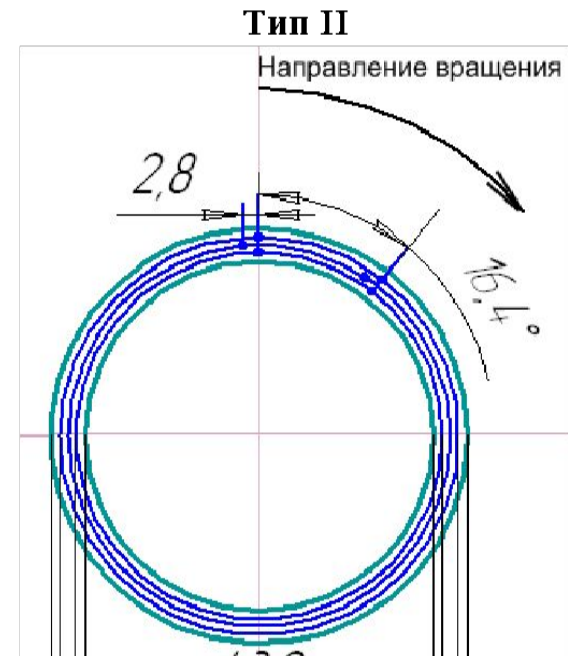
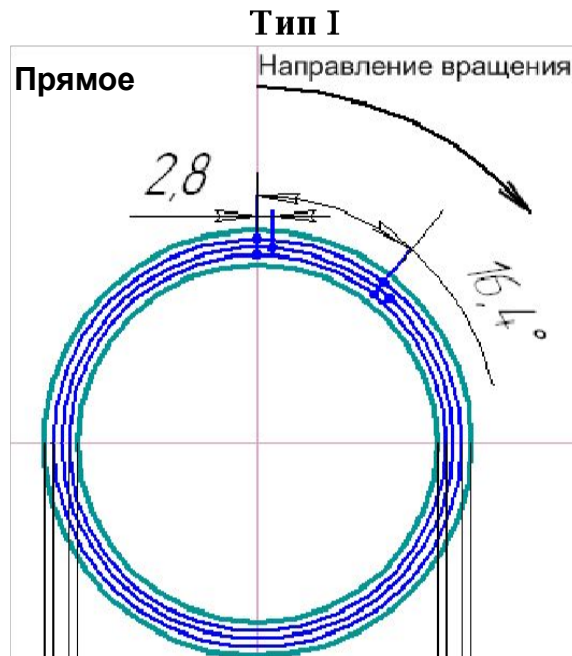


3.7. Сравнительные результаты оценки коэффициента трения при нанесении регулярного микрорельефа типа I и типа II



3.7. Нанесение регулярного микрорельефа (РМР) с целью повышения износостойкости трибоузлов.

Микроточечный РМР



1. В случае совпадения ориентации микрорельефа с направлением движения образца (**РМР тип I**), коэффициент трения оказывается почти в 2 раза меньше по сравнению со случаем противоположной ориентации микрорельефа по направлению движения образца (**РМР тип II**).
2. В диапазоне чисел **Герси $G = 0,75...1,0$** и при контурном давлении $P_m = 0,3...0,35$ достигается минимальный коэффициент трения **$f = 0,05...0,1$**
3. Коэффициент трения уменьшается с увеличением контурного давления P_m

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин.

В машиностроении используют различные технологические методы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей с учетом заданных условий их эксплуатации: рабочих нагрузок, температуры нагрева, окружающей среды и продолжительности физико-химического воздействия.

Упрочнение поверхностным деформированием, обеспечивающее получение в поверхностном слое структур с повышенным содержанием дефектов, широко используется для повышения сопротивления усталости как деталей без концентраторов напряжений, так и деталей с концентраторами напряжений, работающих при умеренных температурах нагрева (до температур возврата).

Химико-термические и термические поверхностно-упрочняющие методы обработки (поверхностная закалка, цементация, азотирование, алитирование, борирование) позволяют резко изменить физико-химическое состояние поверхностного слоя деталей и обеспечить требуемые эксплуатационные свойства (износостойкость, сопротивление усталости, жаростойкость и др.). Применение этих методов является не только эффективным, но в ряде случаев единственно возможным способом обеспечения заданного ресурса и надежности работы деталей.

Жаропрочность, износостойкость и сопротивление коррозии могут быть существенно повышены при нанесении на рабочую поверхность детали металлических и неметаллических покрытий. Высокая теплостойкость детали обеспечивается **плазменным напылением** (соединение двух материалов происходит в результате механического сцепления и диффузии при температуре, равной нескольким тысячам градусов).

Практическое применение получили также **наплавление, лазерная обработка, ионное легирование** и т.д. Некоторые из этих технологических процессов одновременно повышают сопротивление усталости, сопротивление коррозии и другие эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали.

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин.

Упрочнение наклепом – является эффективным способом упрочнения поверхности деталей на глубину до 0,7 и 15 мм с помощью дробеструйной и роликовой обработок, соответственно.

При этом происходит наклеп поверхности детали, позволяющей повысить ее усталостную прочность. Наклепу подвергают готовые детали, прошедшие механическую и термическую обработку.

При дробеструйной обработке на поверхность деталей (рессор, пружин, зубчатых колес, звеньев гусениц, гильз, поршней и др.) из специальных дробометов с большой скоростью направляют поток стальной или чугунной дроби диаметром 0,5...1,5 мм.

Обработку роликами применяют обычно для цилиндрических деталей (шеек валов, осей железнодорожных вагонов, коленчатых валов) с помощью специальных приспособлений на обычных токарных станках. Обкатка, помимо упрочнения, повышает чистоту обрабатываемой поверхности.

Удары дроби и роликовая обкатка вызывают пластическую деформацию поверхностного слоя. В результате наклепа:

- поверхность детали становится более твердой, что компенсирует действие обезуглероженного слоя;
- в ней создаются остаточные напряжения сжатия, позволяющие повысить ее усталостную прочность;
- при наличии в поверхностных слоях остаточного аустенита, происходит фазовое превращение с образованием мартенсита, что дополнительно увеличивает твердость и износостойкость;
- на поверхности сглаживаются мелкие поверхностные дефекты, риски, являющиеся концентраторами напряжений.

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин.

Поверхностная закалка токами высокой чистоты – является эффективным способом упрочнения только поверхностных слоев деталей на глубину от 1 до 10 мм. При этом сердцевина детали остается вязкой, а поверхностный слой приобретает высокую твердость. Поверхностный слой детали можно нагреть в расплавленных металлах или солях, газовой горелкой, в электролитах, лазерным излучением. Однако, наиболее часто нагрев под закалку стали (выше A_{C3}) производят токами высокой частоты (ТВЧ). Деталь помещают внутри специального индуктора, который изготовлен в виде спирали из медных трубок. В связи с этим индуктор имеет высокую стоимость и является индивидуальным для каждой детали. Через индуктор пропускают электрический ток высокой частоты (от 599 Гц до 10 МГц) и большой силы. Возникшее при этом электромагнитное высокочастотное поле возбуждает вихревые токи, которые и разогревают поверхность детали. Глубина нагретого слоя (δ) зависит от частоты тока:

$$\delta = 5030 (\rho/\mu f)^{1/2} \approx 250 / (f)^{1/2}$$

где, f – частота тока, Гц; δ – глубина проникновения тока, см; ρ – удельное электросопротивление, ом · см; μ – магнитная проницаемость, Гс/э.

Например, при частоте $f = 1500 \text{ сек}^{-1}$, глубина проникновения $\delta = 2 \text{ мм}$. Регулируя частоту тока и время нагрева, можно достигнуть требуемой глубины прогрева, а следовательно требуемой глубины закаленного слоя.

Плотность тока по сечению детали неравномерна, на поверхности она значительно выше, чем в сердцевине. Поэтому основное количество тепла выделяется в тонком поверхностном слое.

Охлаждение поверхностного слоя производится через индуктор или с помощью специального охлаждающего устройства. После закалки деталь подвергают низкому отпуску при температуре 180...220°C.

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин.

Преимуществом высокочастотной закалки является:

- быстрота, время нагрева до 10 сек;
- скорость нагрева составляет 100...1000 °C/сек;
- нагрев не сопровождается окислением и обезуглероживанием;
- устраняется коробление;
- получается более высокая твердость поверхности, чем после обычной закалки;
- регулируется глубина закаленного слоя;
- высокая производительность и возможность автоматизации.

Токами высокой частоты обычно подвергают закалке коленчатые и кулачковые валы, гильзы цилиндров, поршневые пальцы, детали гусениц, пальцы рессор и т.д. из сталей содержащих свыше 0,4 % углерода (с низкой глубиной прокаливаемости).

Если поверхностная закалка разработана для упрочнения поверхностей деталей машин при сохранении химического состава по сечению изделия, то при химико-термической обработки (ХТО) происходит изменение химического состава стали.

Химико-термической обработкой – называется насыщение поверхности изделия углеродом, азотом, бором, алюминием, хромом и др.

Назначение ХТО состоит в том, чтобы путем изменения химического состава поверхностных слоев изделия и последующей термической обработки повысить твердость (при сохранении вязкой сердцевины), износостойкость, сопротивление усталости, коррозионную стойкость.

К основным видам ХТО относятся: цементация (насыщение углеродом), азотирование (насыщение азотом), цианирование (насыщение углеродом и азотом)

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин.

К основным видам ХТО относятся: цементация (насыщение углеродом), азотирование (насыщение азотом), цианирование (насыщение углеродом и азотом одновременно), диффузионная металлизация (насыщение алюминием, хромом, никелем и др.)

В самом общем случае процесс ХТО состоит из трех стадий:

диссоциации – процесса формирования атомарного (несвязанного) насыщающего элемента;

абсорбции – процесса поглощения поверхностью металла атомов насыщающего элемента;

диффузии – процесса проникновения атомов насыщающего элемента вглубь металла;

Следует отметить, что, химико-термическая и лазерная обработки несколько ухудшают точность обработки деталей.

Классификация технологических методов обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя деталей машин для заданных условий эксплуатации приведена в таблице.

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин.

Таблица. Характеристики технологических методов обработки
поверхностного слоя деталей машин

Методы обработки и способы нанесения покрытий	Твердость или степень упрочнения	Толщина модифицированного слоя, мкм	Максимальные напряжения, МПа	Шероховатость, Ra, мкм	Назначение и условия обработки
1. Упрочнение поверхностным пластическим наклепом					
Обработка дробью (стальными шариками диаметром 0,5...1,5 мм)	50...55 HRC,	200...700	200...750	16...2,5	Повышение усталостной прочности
Роликовая обработка	упрочнен 20...50%	100..15000	500...700	1,25..0,04	Повышение усталостной прочности и износостойкости
2. Поверхностная термическая обработка					
Поверхностная закалка токами высокой частоты (ТВЧ) для сталей > 0,4% С	40...70 HRC,	200... ...10.000	300...800	не изменяется	Повышение усталостной прочности и износостойкости
Закалка с нагревом газовым пламенем	40...70 HRC,	500... ...10.000	300...800	ухудшается	

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин

3. Химико-термическая обработка					
Методы обработки и способы нанесения покрытий	Твердость или степень упрочнения	Толщина модифицированного слоя, мкм	Максимальные напряжения, МПа	Шероховатость, Ra, мкм	Назначение и условия обработки
Цементация $2\text{CO} \Leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{атомарн}}$ окись углерода $\Leftrightarrow$ углекисл. газ 900...950°C, 10...20 ч., + т/о (закалка + н.о.) – газовая (углеводороды) – твердая (древесный уголь, пасты) – жидкая (керосин)	58...62 HRC,	100...2000	400...800	не изменяется	Повышение износостойкости сталей 0,1...0,3 %C Науглероживание до 1%
Азотирование $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_{\text{атомарн}} + 3\text{H}_2$ аммиак 500...600°C, 20...60 ч.	30 HRC (чист. Fe) 120 HRC (легир ст Al, Cr, Mo, V)	10...650	400...800	не изменяется	Повышение износостойкости – т/о (улучшение) – механ. обработка – азотирование – тонкое шлифование.
Жидкое цианирование $\text{NaCN} \rightarrow \text{C}_{\text{атомарн}} + \text{N}_{\text{атомарн}}$ цианид натрия – низкотемпературное: (550...600°C, 1...5 ч.) – среднетемпературное: (800...850°C, до 1,5 ч.) – высокотемпературное: (900...950°C, 50...60 мин) т/о (закалка + н.о.)	62...64 HRC,	30...50 200...500 500...2000	400...800	не изменяется 0,7% C + 1,0% N 1,0% C + 0,3% N	Повышение износостойкости

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин.

Методы обработки и способы нанесения покрытий	Твердость или степень упрочнения	Толщина модифицированного слоя, мкм	Максимальные напряжения, МПа	Шероховатость, Ra, мкм	Назначение и условия обработки
Газовое цианирование (нитроцементация) $2 \text{NH}_3 \rightarrow 2 \text{N}_{\text{атомарн}} + 3 \text{H}_2$ 25% аммиака + 75% цементующего газа $\rightarrow$ $\text{C}_{\text{атомарн}}$ 800...850°C, до 5 ч. т/о (закалка + н.о.)	55...57 HRC,	400...500	400...800	не изменяется	Повышение износостойкости
Алитирование твердое (950-1000°C, 4-10 ч.) Al, AlFe, хлористый аммоний (порошок) жидкое (750-800°C, 1...1,5 ч) Al + (7... 8%)Fe (расплав) газовое (1000°C, 2 ч.) $\text{AlCl}_3 \rightarrow \text{Al} + \uparrow \text{Cl}_2$ хлористый алюминий	50 HRC,	100...2000 200...300 300...400		ухудшается	Повышение износостойкости, сопротивление эрозии, коррозии, жаростойкости

3.8. Основные технологические приемы обеспечения заданных параметров поверхностного слоя деталей машин

Методы обработки и способы нанесения покрытий	Твердос ть или степень упрочне ния	Толщина модифиц ированно го слоя, мкм	Максим альные напряже ния, МПа	Шерохов атость, Ra, мкм	Назначение и условия обработки
Хромирование 65% – CrFe (феррохром) 30% – глинозем 5% – хлористый аммоний $\text{CrCl}_2 \rightarrow \text{Cr} + \uparrow\text{Cl}_2$ хлористый хром Твердое (1050...1150°C, 12-15 ч.) Т/О (Зак.+Н.О.) –	100...20 0HV 20...25 HRC, 125...13 0 HRC,	20...200		ухудшает ся	Повышение износостойкос ти
Силицирование (950...1050°C, 2 ч.) через печь пропускают пары хлористого кремния $\text{SiCl}_4 \rightarrow \text{Si} + \uparrow 2\text{Cl}_2$	30 HRC, 100...12 5HV	50...200		не изменяет ся	
Борирование (930...950°C, 2...6 ч.) из расплава буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	200 HRC, 225...32 5HV	1...350		не изменяет ся	
4. Ионно-лучевая обработка					
Ионное легирование (имплантация)		0,01...10		не изменяет ся	Повышение сопротивлени я коррозии , эрозии, усталости, износостойкос ти
5. Лазерная обработка					
Термообработка		10..1000		ухудшает ся	

Контрольные вопросы по Теме 3.

- 1. Влияние концентратора напряжений на изменение номинального напряжения вблизи него.**
- 2. Определение качества поверхности как совокупность характеристик.**
- 3. Влияние радиуса закругления в вершине концентратора напряжений приводит к изменению максимального напряжения.**
- 4. Оценка параметров R_k , R_{vk} , R_{pk} по кривой Аббота, согласно немецкого стандарта.**
- 5. Изменение напряжений в выступах и впадинах на поверхности микрорельефа, относительно номинального напряжения.**
- 6. Определение шероховатости, волнистости поверхности материала по изменению высоты неровностей и величины среднего шага между неровностями.**
- 7. Влияние нанесения регулярного микрорельефа на износостойкость поверхности изделия.**
- 8. Определение Цианирования, как химико-термической обработки обогащения поверхностного слоя деталей машин.**
- 9. Определение Азотирования, Цементации как химико-термической обработки обогащения поверхностного слоя деталей машин.**
- 10. Определение Металлизации, как химико-термической обработки обогащения поверхностного слоя деталей машин.**

**Спасибо
за внимание**