

Рис. 1.4. Профилограмма поверхности

убедительно показало неверность данного подхода, так как при записи профиля в поперечном направлении учитываются и неровности продольного направления.

Работы по усталостной прочности показали, что она зависит от параметров шероховатости: R_{max} (максимальная высота профиля шероховатости) и S_m (шаг неровностей профиля шероховатости по средней линии) (рис. 1.4), которые характеризуют радиус впадин неровностей, определяющий концентрацию напряжений [38].

Все эти работы привели к тому, что в 1973 г., когда была принята в СССР Программа на повышение качества продукции, был введен стандарт (ГОСТ 2789-73) на параметры шероховатости: R_a , R_z , R_{max} , t_p , S_m , S и взаимное положение профиля шероховатости \parallel (параллельное), \perp (перпендикулярное) вместо классов чистоты. Аналогичные параметры шероховатости поверхностей деталей в эти годы были стандартизованы и в других странах (табл. 1.2).

1.2. Стандартизованные параметры шероховатости в различных странах¹

Страна	Параметры шероховатости														Число параметров
	R_a	R_p	R_m	RMS	R_z	R_{max}	R	l_t	t_p	A_r	S_m	S	k_p	k	
Австрия	+		+	R_z		R_t		L_t	+					+	7
Болгария	+				+	+									3
Великобритания	CLA						H_1								2
Венгрия	+	R_t	R_f	h_q	+	+			+				k_p	kh	10
Дания	+	R_u	+	+	+	+	+	Bb	Kb					+	10
Испания	hm			h_{rms}			H						kv		3
Италия	+	R_c	R_i	R_{aq}			+							k_p	7
Нидерланды	+														1
Польша	+					+	+								3
Румыния	+					+	+								3
Россия	+				+	+			+		+	+			6
Сербия	+				+	+		l_n	P_n	k					6
США	AA			+											2
Финляндия	+				+	+									3
Франция	+	+		R_q		+	R_v	L_c	T_c	A_v			+	kv	10
Германия	+	+			+	R_t		+	+						6
Чехия	+				+	+									3
Швеция	+	G					H								3
Швейцария	+	+		R_q		+	R_v, R_s	t	t_c				+	kv	10
Япония															1
ISO	+				+	+									3

¹ Знак «+» означает стандартизованные, пустые графы – нестандартизованные параметры.

В эти же годы правительством была поставлена цель: разработка опережающих стандартов для того, чтобы все организации имели время на подготовку производства для внедрения этих стандартов. Так, для нового стандарта на шероховатость (ГОСТ 2789–73) срок начала внедрения оговаривался с 1975 г. Но службы стандартизации организаций продолжали действовать в соответствии с установившимся ранее порядком. Получив в 1973 г. стандарт, срок внедрения которого значился с 1975 г., они отложили его до 1975 г. В начале 1975 г. ими было издано распоряжение по своим организациям о внедрении данного стандарта без соответствующей подготовки производства. За полтора года не было предпринято ни в отраслевых НИИ, ни на предприятиях никаких действий по разработке необходимых материалов по внедрению данного государственного стандарта. В приложении к нему была помещена таблица соответствия классов чистоты параметрам Ra и Rz из старого стандарта.

Это было сделано для того, чтобы можно было до 1980 г. временно пользоваться старыми чертежами, так как все чертежи за один-два года невозможно было переработать. Это привело к тому, что практически все конструкторы поместили на свои доски эту таблицу и при проектировании новых изделий вместо простановки на чертежах деталей параметров шероховатости поверхностей, определяющих их эксплуатационные свойства, а следовательно, и долговечность (табл. 1.3) стали проставлять параметр Ra или Rz .

1.3. Рекомендуемые параметры шероховатости рабочих поверхностей деталей машин

Эксплуатационные свойства	Параметры шероховатости рабочих поверхностей	Направление неровностей
Контактная жесткость	$Ra, Sm, tp, (Rp)$	или \perp
Износостойкость		
Прочность	R_{max}, Sm	
Усталостная прочность		
Контактная прочность	$Ra, Sm, tp, (Rp)$	
Фреттингостойкость		—
Виброустойчивость	Ra, Sm, S	
Коррозионная стойкость	Ra, Sm	
Прочность сцепления покрытий	$Ra, Sm, tp, (Rp)$	
Герметичность соединений	$Ra, tp, (Rp)$	
Прочность посадок	$Ra, Sm, tp, (Rp)$	или \perp
Теплопроводность		

Примечания. 1. (Rp) – нестандартизованный параметр шероховатости, оказывающий основное влияние на эксплуатационные свойства.

2. || или \perp – параллельное или перпендикулярное расположение следов обработки относительно изображенной на чертеже проекции.

Естественно, такой подход не мог способствовать повышению качества продукции, поскольку простановка только высотных параметров шероховатости Ra и Rz ничего не изменяла по сравнению со старым стандартом. Он изменил только обозначение, т.е. заменил классы чистоты, которые определялись значениями этих параметров, на численные значения самих параметров.

Достоинством данной модели является ее универсальность, позволяющая проводить теоретические расчеты контактного сближения сопрягаемых поверхностей, обработанных различными методами ($v > 0$), и учитывающая топографию через поперечный и продольный профили. Кроме того, модель эллиптического параболоида может быть использована для описания волнистости и макроотклонений поверхностей деталей машин.

Технологические исследования позволили уточнить возможности различных методов обработки в обеспечении всех стандартизованных и нестандартизованных параметров шероховатостей поверхностей характеризующих их несущую способность [19]. Наряду с экспериментальными зависимостями взаимосвязи всех этих параметров шероховатости с условиями обработки для различных технологических методов были получены и теоретические зависимости на основе описания физической картины их формирования при обработке [19]. Причем эти зависимости были получены как для отдельных методов обработки (точение, фрезерование, шлифование, накатывание), так и в общем случае для механической обработки (лезвийная, абразивная и отделочно-упрочняющая ППД).

При проведении этих работ было установлено, что для обеспечения и повышения надежности деталей недостаточно нормировать только параметры шероховатости поверхностей, так как она в большей степени зависит от других характеристик их качества: волнистости, макроотклонений и физико-химических свойств.

Было доказано, что формирование равновесной шероховатости поверхности трения в процессе приработки будет зависеть от других ее характеристик, в частности волнистости, макроотклонения и упрочнения. Это привело к введению понятия не равновесной шероховатости поверхностей трения, а равновесного их состояния [9]. Для оценки волнистости и макроотклонения поверхностей был предложен ряд параметров: средняя высота волн – Wz , высота сглаживания волн – Wr и средний шаг волн Sm_w , максимальная величина макроотклонения – H_{max} ; высота сглаживания макроотклонения – Hr .

Для оценки физико-химических свойств поверхностного слоя детали было предложено свыше 25 параметров (табл. 1.4) [13].

1.4. Параметры физико-химического состояния поверхностного слоя

Характеристика поверхностного слоя	Наименование параметра	Обозначение
Структура	Размер зерен, мкм	l_3
	Форма и распределение зерен	–
	Ориентация решетки монокристаллического материала	
	Текстура поликристаллического материала	
	Плотность дислокаций, см ⁻²	ρ_D
	Концентрация вакансий	c_v
	Размер (форма) блоков, нм	l_6
	Угол разориентировки блоков, град	α_6
	Размер областей когерентного рассеяния, нм	$\langle D \rangle$
	Среднее квадратическое смещение атомов, вызванное статическими искажениями решетки, нм ²	$\langle u_T^2 \rangle$
	Среднее квадратическое смещение атомов, вызванное их тепловыми колебаниями, нм ²	$\langle u^2 \rangle$

Окончание табл. 1.4

Характеристика поверхностного слоя	Наименование параметра	Обозначение
Фазовый состав	Число, концентрация и распределение фаз	-
	Тип кристаллической структуры фаз	MS
	Параметры решетки фаз, нм	a, b, c
	То же, градус	α, β, γ
Химический состав	Профиль концентрации элементов в поверхностном слое, %	C_x
	Концентрация элементов в фазах, %	c_Φ
Деформация (наклеп)	Степень деформации, %	ε
	Глубина наклепа, мкм	h_n
	Степень наклепа, %	U_n
	Градиент наклепа, HV/мм	$u_{гр}$
	Микродеформация решетки, %	$\langle \varepsilon \rangle$
Остаточные напряжения	Макронапряжения (напряжения первого рода), МПа	$\sigma'_{ост}$
	Микронапряжения (напряжения второго рода), МПа	$\sigma''_{ост}$
	Статические искажения решетки (напряжения третьего рода), МПа	$\sigma'''_{ост}$
Экзоэлектронная эмиссия	Интенсивность эмиссии, импульс/с	I
	Работа выхода электронов, эВ	φ
	Глубина выхода электронов, нм	Λ

Все большее распространение получают комплексные параметры для оценки качества поверхностей деталей машин Π , C , C_x и др., включающие в себя параметры как шероховатости, волнистости, макроотклонения, так и физико-механических свойств [19]:

$$C_x = \frac{(RaWzH_{max})^{1/6}}{tm^{3/2}Sm^{1/2}U_n^{2/3}\lambda}, \quad (1.9)$$

где λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений второго рода $\sigma''_{ост}$ на износ;

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_b - \sigma''_{ост}}{\sigma_a} \right)^{t_y},$$

где σ_b – временное сопротивление разрушению; σ_a – действующие значения амплитудного напряжения по поверхности трения; t_y – параметр фрикционной усталости при упругом контакте [4].

Показано, что значение формируемой шероховатости в процессе приработки (равновесной шероховатости) зависит от других параметров качества поверхностного слоя: волнистости, макроотклонения, микротвердости, а следовательно, речь необходимо вести о равновесном качестве поверхностного слоя деталей. Для определения его равновесного значения предложена зависимость [19]

Глава 2

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Важнейшим этапом жизненного цикла рабочих поверхностей деталей является проектирование, когда закладываются требования к их качеству или непосредственно к эксплуатационным свойствам (износостойкости, контактной жесткости, коррозионной стойкости, контактной прочности и др.). Эти требования должны формироваться исходя из физической картины контактного взаимодействия деталей и обеспечения оптимальной надежности изделий машиностроения.

2.1. ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ С ПОЗИЦИЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Учитывая, что все реальные контактирующие поверхности деталей имеют макроотклонения, волнистость, шероховатость и субшероховатость, первоначальный их контакт должен произойти только в трех точках. Напряжения в этих точках из-за малости фактической площади контакта значительно превышают напряжения сдвига, возникающие на критической глубине под поверхностью контакта. Даже при очень малых нагрузках эти напряжения значительно превышают предел текучести материала и вызывают начало пластических деформаций на вершинах выступов шероховатости, вступивших в контакт [1].

Расчеты, проведенные по формулам работы [8], показывают, что вершины выступов, вступивших в контакт, имеют переходный характер деформаций от упругих к пластическим (табл. 2.1). Этот переход обусловлен величиной критического сближения, которая определяется через геометрические и физико-механические параметры контактирующих выступов шероховатости поверхностей деталей машин. Если контактное перемещение вершин выступов реальных поверхностей $y < y_{кр}$, то они будут иметь упругий характер деформаций, а при $y \geq y_{кр}$ вершины будут находиться в режиме пластических деформаций.

Для поверхностей с $Ra \geq 0,1$ мкм можно принять с небольшим допущением (0,01 мкм), что вершины контактирующих выступов сразу же начнут пластически деформироваться. Очевидно, величина этих деформаций будет зависеть от образования площадки контакта выступа, способной воспринимать приходящуюся на него нагрузку, а именно: $Ar_i = P_i / (C' \sigma_{\tau})$, где $C' = 2,87$ – коэффициент стеснения [19].

Если этот процесс пластических деформаций рассматривать применительно к реальной поверхности детали, находящейся в контакте под действием нормальной нагрузки, то вероятно, что величина ее пластических деформаций будет определяться формированием фактической площади контакта с учетом шероховатости, волнистости и макроотклонения (рис. 2.1):

$$Ar = P / (C' \sigma_{\tau}). \quad (2.1)$$

2.1. Расчетные значения критических сближений

Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм	Поперечный радиус выступов микронеровностей $R_{\text{поп}}$, мкм	Профильный радиус выступов микронеровностей $R_{\text{пр}}$, мкм	Степень наклепа $U_n = \frac{H_{\mu_0}}{H_{\mu_{\text{исх}}}}$	Взаимно-параллельное расположение следов обработки $U_{\text{кр}}$, мкм	Взаимно-перпендикулярное расположение следов обработки $U_{\text{кр}}$, мкм
Торцовое фрезерование					
4,0	45	200	1,10	0,0067	0,0063
2,0	50	260	1,05	0,005	0,0074
0,8	55	550	1,05	0,01	0,0091
Плоское шлифование					
1,8	15	250	1,15	0,0039	0,0027
0,9	20	550	1,10	0,0052	0,0035
0,45	35	1200	1,10	0,0097	0,0062
0,25	40	1700	1,05	0,011	0,0071
Полирование					
0,24	700	300	1,0	0,039	0,038
0,14	1000	450	1,0	0,052	0,05
Вибронакатывание					
2,0	300	410	1,8	0,085	0,085
0,9	500	560	1,3	0,067	0,067
0,50	630	860	2,0	0,22	0,215
0,25	750	1950	1,5	0,19	0,18
0,12	900	3520	1,5	0,25	0,24

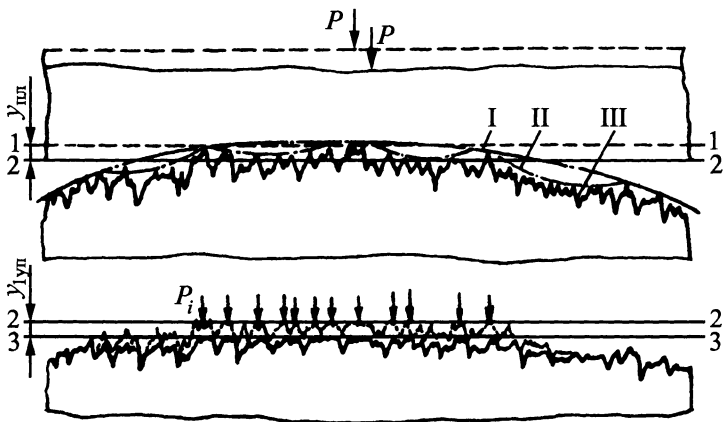


Рис. 2.1. Исходная схема для расчета нормальных контактных перемещений:

1 – 1 – исходное положение контактирующей поверхности; 2 – 2 – положение контактирующей поверхности с учетом пластических деформаций выступов; 3 – 3 – конечное положение контактирующей поверхности (I – макроотклонение; II – волнистость; III – шероховатость)

2.3. Параметры, определяющие эксплуатационные

Эксплуатационные свойства	Свойства материалов				Размер и его точность		Параметры			
	σ_b	σ_T	E	HB	d, l, B	T	H_{max}	H_p	W_z	W_p
Контактная жесткость:										
первое нагружение	0	+	+	+	+	—	—	—	—	*—
повторное нагружение	0	+	—	—	+	—	—	—	—	—
Коэффициент трения	+	+	+	+	0	0	+	+	+	+
Износостойкость	+	+	+	+	+	—	—	—	—	—
Герметичность соединений	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Прочность посадок	0	—	+	—	+	—	—	—	—	—
Прочность деталей	+	+	+	—	+	0	0	0	0	0
Усталостная прочность	+	+	+	—	+	0	0	0	0	0
Коррозионная стойкость	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—
Поверхностная теплопроводность	—	—	0	0	+	—	—	—	—	—
Термостойкость	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0

Примечание. Обозначения «+» и «—» показывают, что увеличение и уменьшение эксплуатационного свойства: «*» — параметр оказывает основное влияние на данное свойство.

свойства деталей машин и их соединений

качества поверхностного слоя															
Sm_n	Ra, Rz	$Rmax$	Rp	tp	Sm	S	$Rmax'$	Sm'	$\sigma_{ост}$	$h_{с0}$	$H_{\mu 0}$	h_{μ}	ε	l_3	ρ_D
–	–	–	–*	+	+	0	0	0	+	0	+	0	–*	–*	–*
–	–	–	–*	+	+	0	0	0	–	0	–	0	–*	–*	–*
–	+	+	+	–*	–	–	+	–	–	0	+	0	+	–	–
+	–	–	–*	+	+	+	–	+	+	0	+	0	+	–*	–*
–	–	–	–*	+	–*	–	–	–	–	0	–	0	0	0	0
–	–	–	–*	+	–	0	–	0	–	0	–	0	0	0	0
0	–	–	+	–	+	0	0	0	+	+	+	+	+	–*	–*
0	–	–*	+	–	+	0	0	+	+	+	+	+	+	–*	–*
+	–*	–	–	+	+	+	–*	+	+	+	+	+	–*	+	–*
–	–*	–	–*	+	–	–	–*	–	–	–	–	–	–	+	–
0	–	–	–	+	+	0	0	0	–	0	–	0	–	–*	–*

этих параметров вызывает соответственно улучшение или ухудшение данного эксплуатационно свойство; «0» – параметр не влияет на данное эксплуатационное

В данном алгоритме осуществляют с учетом ограничений генерацию случайных независимых переменных. Далее выполняют расчет характеристики эксплуатационного свойства, а результат расчета сравнивают с предыдущим значением; запоминают значение характеристики эксплуатационного свойства, наиболее близкое к требуемому, а также значения параметров качества поверхностного слоя деталей, при которых они получены. При этом одно и то же значение характеристики эксплуатационного свойства может быть получено при различных многовариантных сочетаниях параметров качества поверхностного слоя деталей. Поэтому появляется необходимость ввести оптимизационный алгоритм.

Следует отметить, что задача конструктора значительно облегчается при использовании комплексных параметров для оценки качества поверхностного слоя деталей машин, в частности Π и C_x . После выбора метода вычислений составляют программу расчета по структурной схеме на одном из алгоритмических языков.

При экспериментальном методе исследуют то или иное эксплуатационное свойство при различных параметрах качества поверхностного слоя образцов. Параметры, обеспечивающие требуемое значение эксплуатационного свойства, являются оптимальными.

При табличном методе численные значения параметров качества поверхностного слоя деталей машин (как правило, определенные статистическим методом) берутся из таблиц. Так, в табл. 2.4 приведены оптимальные значения стандартизованных параметров шероховатости поверхностей различных деталей машин, рекомендуемые для постановки на рабочих чертежах.

2.4. Оптимальные значения параметров шероховатости поверхностей деталей машин

Поверхности деталей	Ra	Rz	$Rmax$	$Sm, \text{ мм}$	$t_{50}, \%$
Опорные шейки валов:					
под подшипники скольжения	0,2...0,5	—	—	0,032...0,05	45...70
под вкладыши из бронзы	0,32...0,63			0,032...0,06	
под баббитовые вкладыши	0,20...0,32			0,020...0,032	
под вкладыши из чугуна	0,32...0,5			0,032...0,05	65...70
под вкладыши из графитопласта	0,32...0,4			0,025...0,04	50...70
под подшипники качения	0,63...2,0			0,040...0,06	45...70
Рабочие поверхности шариковых и роликовых подшипников	0,08...0,32	—	—	0,020...0,032	
Поверхности, обеспечивающие избирательный перенос	0,25...0,50			0,025...0,04	45...50

Продолжение табл. 2.4

Поверхности деталей	Ra	Rz	Rmax	Sm, мм	t50, %	
Поверхности валов, работающих под нагрузкой	—	—	0,63...1,25	0,060...0,10	—	
Напыленные поверхности трения скольжения	0,08...0,10			0,020...0,04	45...50	
Поверхности: под напыление	—	50...125	—	0,200...0,50		
под электрохимические покрытия		1,0...4,0		0,025...0,080		
Свободные несопрягаемые торцы валов, фланцев, крышек	—	15...100		—	—	
Опорные поверхности корпусов, кронштейнов, шкивов и других деталей, не являющихся посадочными		12...30				
Поверхности посадочных отверстий зубчатых колес	0,50...0,2	—	—	0,05...0,08	50...60	
Шейки и кулачки распределительных валов	0,25...0,40					0,04...0,06
Рабочие шейки коленчатого вала	0,2...0,3					
Поверхности отверстий рычагов, вилок, сопрягаемых с валами или осями	0,63...1,25				—	
Корродирующие поверхности	0,063...0,1	15...20	—	0,032...0,05	—	
Поверхности под склеивание	—				—	
Поверхности, соединяемые с натягом	0,5...2,5	—		0,032...0,15	45...50	
Посадочные конические поверхности гидропередат	0,8...1,2			0,04...0,10		
Боковые поверхности: зубьев колес	0,4...1,25			—	—	
ниток червяков	0,25...0,4			0,032...0,06	45...60	
Поверхности основных отверстий корпусов:				—		—
стальных	0,63...1,6					
чугунных	1,0...2,0					
из алюминиевого сплавов	0,5...1,2					

Продолжение табл. 2.4

Поверхности деталей	Ra	Rz	Rmax	Sm, мм	t ₅₀ , %	
Сопрягаемые поверхности корпусов и крышек	—	10...60	—	—	—	
Поверхности зеркала цилиндра	0,2...0,63	—		0,04...0,08	45...50	
Рабочая поверхность поршневого кольца	0,63...1,25			0,03...0,06		
Торцовая поверхность кольца	0,25...0,63					
Юбка поршня	0,63...1,25			—	—	
Канавка в поршне	0,2...0,63			0,03...0,08	45...50	
Поверхность отверстия в поршне под палец	0,3...0,5			0,03...0,05		
Поршневой палец	0,1...0,2			0,01...0,06	50...60	
Толкатель	0,16...0,32			0,02...0,05		
Отверстия в головках шатуна:					—	45...50
малое	0,5...1,25					
большое	0,6...1,0					
Втулка шатуна	0,25...0,6				0,03...0,06	50...60
Рабочая поверхность шарового пальца	0,2...0,3				0,04...0,06	
Клапан	0,16...0,25				0,02...0,04	
Рабочая поверхность проушины колодки переднего тормоза автомобиля	1,2...1,6			—	—	—
Рабочая поверхность фланцев под уплотнения	0,4...0,8				0,08...0,15	70...80
Поверхность канавки каретки включения передач	1,25...2,5				—	—
Рабочая поверхность пальцев крестовины дифференциала заднего моста автомобиля	0,5...0,8				0,03...0,06	45...50
Поверхности под уплотнение полуоси заднего моста автомобиля					0,08...0,15	70...80
Рабочая поверхность гнезда турбины под лопатку	0,5±20 %				0,02...0,05	—
Поверхности лопаток турбины и компрессора:						45...50
замка	0,63...1,25				0,08...0,10	
пера лопатки	0,32...1,25				0,04...0,10	

Окончание табл. 2.4

Поверхности деталей	Ra	Rz	Rmax	Sm, мм	t ₅₀ , %
Рабочие поверхности деталей тележки рефрижераторной секции:					
оси	0,63...1,25	—	—	—	65...70
подпятника	1,25...2,5				—
втулки	1,8...2,0				
валика	—	15±10 %			
Поверхность трения:					
подвески вагона	—	15±70 %		—	—
балки вагона	1,0...2,5			0,03...0,08	60 ± 5 %
рамы вагона	0,32...0,63			—	—
оси колесной пары	0,63...1,25			—	45...50
Посадочная поверхность отверстия колеса					
Поверхности направляющих трения скольжения станков:		—			
универсальных	0,5...0,8			0,04...0,06	45...50
прецизионных	0,1...0,15			0,02...0,03	
тяжелых	1,25...2,0			—	—
Поверхности направляющих качения	0,12...0,16			0,02...0,03	45...50
Рабочие поверхности матриц и пуансонов вырубных штампов	0,32...2,0			0,12...0,32	
Поверхности заготовительных ручьев ковочных штампов	—	50...200	—	—	
Поверхности окончательных ручьев ковочных штампов		20...100			

Рассмотрим несколько примеров по назначению параметров качества рабочих поверхностей деталей машин.

Пример 1. Спроектировать соединение вала с втулкой, передающее крутящий момент $M = 0,013$ Н·м. Заданы номинальные размеры: $d = 20$ мм, $l = 15$ мм, $D = 26$ мм и характеристики механических свойств материалов: $E_1 = E_2 = 21 \cdot 10^4$ МПа и $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$. Уравнение для инженерных расчетов натяга Δ и параметров состояния сопрягаемых поверхностей посадок с натягом, позволяющих передавать заданный крутящий момент, имеет следующий вид:

$$\Delta - [(Hp_1 + Hp_2) + (Wp_1 + Wp_2) + (Rp_1 + Rp_2)] = \frac{2 \cdot 10^3 M}{\pi d l f} \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \frac{\mu_1}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right). \quad (2.27)$$

2.5. Возможности методов обработки в обеспечении точности размеров и параметров качества наружных поверхностей вращения деталей машин

Метод обработки	Квалитет	Параметры качества поверхностного слоя детали										
		H _{max} , мкм, 1000 мм	W _Z , мкм	S _m _{xy} , мм	R _a , мкм	R _p , мкм	S _m , мм	S _y , мм	± σ _{ср} , МПа	h ₀ , мм	u _{нр} , %	h _{нр} , мм
Обтачивание: черновое получистовое чистовое	12...14	160...500	6,25...13,0	2,5...10,0	12...40	32...120	0,32...1,25	0,32...1,25	200...300	0,10...0,20	10...50	0,2...0,5
	10...12	80...200	3,2...10,0	0,12...8,0	2,0...16	5,0...50	0,16...0,40	0,12...0,40	150...250	0,08...0,15	10...40	0,15...0,30
	8...9	40...100	1,6...4,0	0,8...8,0	0,8...2,5	2,0...8,0	0,08...0,16	0,05...0,16	150...200	0,6...0,12	20...40	0,05...0,20
Шлифование: черновое чистовое тонкое плоскостер-шинное	8...9	25...100	3,2...10,0	0,8...4,0	1,0...2,5	2,5...10,0	0,63...0,2	0,032...0,16	200...400	0,15...0,25	10...40	0,05...0,08
	6...7	10...40	0,5...4,0	0,4...1,5	0,2...1,25	0,5...4,0	0,025...0,1	0,01...0,08	300...400	0,10...0,20	10...30	0,02...0,05
	5...6	6...20	0,16...0,8	0,25...0,6	0,05...0,25	0,125...0,8	0,008...0,025	0,003...0,016	200...500	0,08...0,15	0...20	0,01...0,02
	6...8	10...100	0,5...10,0	0,8...8,0	0,32...2,5	0,5...3,2	0,063...1,25	0,008...0,16	100...200	0,006...0,12	0...10	0,01...0,015
Суперфини- ширование: обычное плоскостер- шинное	4...6	5...20	0,08...0,5	0,25...1,5	0,032...0,25	0,08...0,8	0,006...0,02	0,003...0,016	150...200	0,06...0,12	0...20	0,02...0,06
	6...8	20...80	0,75...2,5	0,8...8,0	0,25...2,0	0,32...2,5	0,05...1,25	0,006...0,16	100...150	0,05...0,10	0...10	0,01...0,02
Полирование: обычное плоскостер- шинное	5...6	6...40	0,16...0,75	0,4...1,5	0,008...0,08	0,016...0,16	0,008...0,025	0,002...0,008	100...400	0,03...0,10	0...20	0,01...0,02
	6...8	30...100	0,4...0,9	0,8...8,0	0,10...0,80	0,125...1,0	0,032...0,20	0,016...0,20	100...200	0,02...0,05	0...10	0,005...0,01
Притирка: обычная плоскостер- шинная	4...6	4...15	0,08...0,1	0,25...1,5	0,01...0,10	0,02...0,25	0,006...0,04	0,002...0,032	150...250	0,05...0,10	0...20	0,005...0,01
	5...7	15...60	0,4...0,8	0,25...2,5	0,10...0,80	0,10...1,25	0,032...0,2	0,032...0,2	100...200	0,02...0,05	0...10	0,005...0,008
Обкатывание: черновое чистовое Выглаживание	8...10	24...100	2,5...12,5	0,8...8,0	0,8...2,5	1,5...6,3	0,2...1,25	0,2...1,25	200...500	0,5...2,0	30...80	0,8...5,0
	5...7	6...40	0,4...2,5	0,3...6,0	0,05...1,00	0,063...2,0	0,025...0,2	0,025...0,2	100...400	0,2...0,8	20...70	0,3...2,0
	5...9	6...80	0,4...10,0	0,3...8,0	0,05...2,0	0,063...6,0	0,025...1,25	0,025...1,25	100...400	0,2...1,5	20...70	0,3...3,0
Вибронакаты- вание	5...9	6...100	0,5...13,2	0,25...15,0	0,063...1,6	0,08...5,0	0,01...10,5	0,008...0,8	100...450	0,15...1,5	10...70	0,1...3,0

Метод обработки	Квалитет	Параметры качества поверхностного слоя детали										
		H_{\max} , мкм, 1000 мм	Wz , мкм	Sm_w , мм	Ra , мкм	Rp , мкм	Sm , мм	S , мм	$\pm \sigma_{\text{ост}}$, МПа	h_0 , мм	u_H , %	h_H , мм
Электроме- ханическая	5...7	6...40	0,4...0,8	0,3...0,8	0,02...1,6	0,2...3,2	0,025...1,25	0,025...1,25	200...400	0,1...1,5	40...80	0,05...1,5
Магнитно- абразивная	5...9	6...70	0,5...12,5	0,4...8,0	0,02...1,6	0,04...5,0	0,008...1,25	0,003...1,0	200...600	0,005...0,010	0...10	0,01...0,03

Примечания: 1. Данные относятся к деталям из конструкционных сталей.

2. Для деталей из чугуна параметры шероховатости Ra , Rz можно принимать в 1,5 раза больше табличных.

3. Характеристики физико-механических свойств для деталей из чугуна следует принимать в 1,5 раза меньше табличных.

2.6. Возможности методов обработки в обеспечении точности размеров и параметров качества внутренних поверхностей вращения деталей машин

Метод обработки	Квалитет	Параметры качества поверхностного слоя детали										
		H_{\max} , мкм, 1000 мм	Wz , мкм	Sm_w , мм	Ra , мкм	Rp , мкм	Sm , мм	S , мм	$\pm \sigma_{\text{ост}}$, МПа	h_0 , мм	u_H , %	h_H , мм
Сверление и рассверливание	10...13	40...160	5,0...32	1,2...8,0	3,2...12	8,0...40	0,16...0,8	0,08...0,63	200...300	0,2...0,3	10...30	0,2...0,5
Зенкерование: черновое чистовое	10...12	10...120	5,0...16	2,0...6,0	2,5...8,0	6,3...25	0,16...0,8	0,063...0,4	100...200	0,2...0,25	20...40	0,15...0,4
	8...9	10...50	3,6...8,0	0,8...3,2	1,25...3,2	3,2...10	0,8...0,25	0,05...0,16	100...200	0,08...0,15	10...40	0,1...0,2
Развертывание: черновое чистовое тонкое	10...11	25...100	2,5...6,25	0,8...4,0	1,25...2,5	3,2...8,0	0,08...0,2	0,04...0,16	100...300	0,08...0,15	10...40	0,2...0,4
	7...9	6...40	1,25...4,0	0,5...2,0	0,63...1,25	1,6...4,0	0,032...0,1	0,0125...0,063	100...400	0,06...0,12	20...40	0,15...0,3
	5...6	2...10	0,5...1,6	0,3...1,0	0,32...0,63	0,8...2,0	0,0125...0,04	0,008...0,02	100...450	0,03...0,1	10...30	0,05...0,2
Протягивание: черновое чистовое	9...11	10...80	1,25...5,0	1,0...4,0	1,25...3,2	0,2...1,0	0,08...0,25	0,04...0,2	200...300	0,10...0,40	20...40	0,2...0,8
	6...8	3...30	0,4...1,6	0,5...2,0	0,32...1,25	0,8...4,0	0,02...0,10	0,008...0,08	200...300	0,05...0,15	10...50	0,1...0,5

Растачивание: черновое полу- чистовое чистовое тонкое	11...13	100...600	8,0...40	2,5...10	8...16	20...50	0,25...1,0	0,25...1,0	0,25...1,0	200...300	0,1...0,2	10...50	0,2...0,5
	9...10	40...160	4,0...12,5	1,25...5,0	2,5...8	6,3...25	0,125...0,32	0,125...0,32	0,08...0,32	150...250	0,08...0,15	10...40	0,15...0,3
	7...8	20...80	2,5...6,25	0,8...2,5	0,8...2,0	2,0...6,3	0,08...0,16	0,08...0,16	0,032...0,16	150...200	0,06...0,12	20...40	0,05...0,2
	5...6	6...40	0,5...4,0	0,4...1,0	0,2...0,8	0,5...3,2	0,02...0,10	0,02...0,10	0,01...0,08	100...150	0,04...0,1	0...30	0,02...0,08
Шлифование: черновое чистовое тонкое плоско- вершинное	8...9	20...100	4,0...16	0,8...3,2	1,6...3,2	4,0...10,0	0,63...0,2	0,63...0,2	0,032...0,16	200...300	0,1...0,2	10...40	0,04...0,06
	6...7	10...40	1,25...6,25	0,4...1,2	0,32...1,6	0,8...4,0	0,025...0,1	0,025...0,1	0,01...0,08	300...400	0,08...0,15	10...30	0,02...0,05
	5...6	6...20	0,32...1,6	0,25...0,5	0,08...0,32	0,2...1,0	0,008...0,025	0,008...0,025	0,003...0,016	200...300	0,08...0,15	0...20	0,01...0,02
	6...8	15...90	0,5...10,0	0,18...8,0	0,32...2,5	0,32...5,0	0,063...1,0	0,063...1,0	0,006...0,16	100...150	0,06...0,1	0...10	0,01...0,015
Хонинго- вание: черновое чистовое тонкое плоско- вершинное	6...7	15...40	1,25...5,0	0,8...4,0	1,25...3,2	3,2...8,0	0,063...0,35	0,063...0,35	0,025...0,16	300...400	0,05...0,30	10...30	0,05...0,10
	5...6	5...16	0,4...1,6	0,8...2,5	0,25...1,25	0,63...3,2	0,02...0,2	0,02...0,2	0,008...0,08	300...350	0,10...0,20	10...40	0,03...0,06
	4	2...10	0,4...0,9	0,25...1,0	0,04...0,25	0,1...0,8	0,006...0,2	0,006...0,2	0,003...0,16	300...400	0,08...0,15	10...30	0,01...0,03
	5...8	5...80	0,5...10	0,8...8,0	0,25...2,0	0,25...4,0	0,04...1,0	0,04...1,0	0,008...0,20	100...200	0,06...0,12	0...20	0,01...0,015
Притирка: обычная плоско- вершинная	4...5	2...10	0,125...0,63	0,25...1,5	0,02...0,16	0,04...0,40	0,005...0,04	0,005...0,04	0,002...0,02	150...250	0,05...0,1	0...20	0,005...0,01
	5...7	5...50	0,4...1,25	0,25...2,5	0,10...0,80	0,125...1,6	0,032...0,2	0,032...0,2	0,003...0,20	100...200	0,02...0,05	0...10	0,005...0,008
Раскатывание: черновое чистовое	8...9	40...100	3,2...12	0,5...8,0	0,32...2,0	0,63...5,0	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0	200...500	0,3...2,0	30...70	0,5...3,0
	5...7	5...40	1,6...5,0	0,3...6,0	0,05...0,32	0,05...0,8	0,025...0,2	0,025...0,2	0,025...0,2	150...400	0,15...1,0	20...60	0,2...1,0
Выглаживание	5...8	5...60	3,2...10	0,3...8,0	0,05...2,0	0,05...5,0	0,025...1,0	0,025...1,0	0,025...1,0	100...400	0,15...2,0	20...70	0,3...2,0
Вибро- накатывание	5...8	5...60	0,5...32	0,25...15,0	0,062...1,6	0,1...4,0	0,01...12,5	0,01...12,5	0,008...0,5	100...450	0,1...1,5	10...70	0,1...1,5
Дорнование	5...8	4...30	0,25...3,2	0,25...15,0	0,1...1,6	0,1...3,2	0,025...1,0	0,025...1,0	0,016...1,0	100...500	0,15...2,0	50...80	0,2...3,0

Примечания см. в табл. 2.5