

УДК 621.81.004.1
DOI:10.30987/2223-4608-2021-5-35-39

В.М. Хохлов, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, ул. 50-лет Октября, 7)
E-mail: khokh999@rambler.ru

Технологическое обеспечение процесса избирательного переноса на поверхностях трения

Предложены зависимости для расчёта параметров шероховатости и их технологического обеспечения, необходимых для протекания избирательного переноса на поверхностях трения. Приведены методы обработки, которые следует использовать для его осуществления.

Ключевые слова: технологическое обеспечение; избирательный перенос; параметры; шероховатость поверхности; методы обработки.

V.M. Khokhlov, Can. Sc. Tech.
(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Str., Bryansk, 241035)

Technological support of selective transfer on friction surface

Dependences for the computation of roughness parameters and their technological support essential for selective transfer on friction surfaces are offered. Processing methods which should be used for their fulfillment are shown.

Keywords: technological support; selective transfer; parameters; surface roughness; processing methods.

Повышение долговечности поверхностей трения в значительной мере может быть обеспечено за счет использования явления избирательного переноса (ИП) [1]. Явление избирательного переноса было обнаружено в парах трения сталь-бронза. Плёнка меди в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь. При этом смазочными материалами были спиртоглицериновая смесь и ЦИАТИМ-201. Медная плёнка образовывалась в результате анодного растворения бронзы (цинк, олово и другие легирующие элементы уходят в смазочный материал и поверхность обогащается медью). Она снижала износ и силу трения примерно в 10 раз [1]. Однако избирательный перенос не нашёл широкого применения в промышленности. Причин этому было несколько. В том числе на поверхностях трения должна быть определённая шероховатость поверхности, которую нужно не только назначить, но и технологически обеспечить.

Для определения шероховатости поверхности было принято следующее допущение. Благоприятные условия работы трущихся поверхностей наступают тогда, когда объём смазочного слоя, образующегося на поверхностях

трения, больше или равен объёму зазора, имеющемуся между неровностями [2]. От него можно перейти к толщине зазора в стыке двух поверхностей.

При решении задачи нужно учесть тот факт, что в начальный период работы узла трения происходит жидкостное трение. Только через некоторое время начинается режим избирательного переноса. Поэтому нужно учитывать толщину смазочной плёнки при неподвижном контакте и атмосферном давлении [3] – 0,13...0,24 мкм, при жидкостном трении [4] – 0,2...2,24 мкм и в условиях ИП [1] – 0,5...1,5 мкм.

Для контакта шероховатой поверхности с гладкой с учётом принятого допущения можно получить неравенство для толщины зазора в стыке:

$$h \geq m_1 Ra + m_2 (Ra)^x - m_3 (Ra)^y, \quad (1)$$

где $m_1 = 2,6$; $m_2 = 0,65(c_1 q_c)^{1,24}$; $m_3 = 3,9(c_1 q_c)^{0,48}$; $x = 0,38$; $y = 0,76$; q_c – контурное давление; $c_1 = (1,5\pi \cdot I \cdot J^{0,5})/Kq$; $I = (1-\mu_1^2)/E_1 + (1-\mu_2^2)/E_2$; μ_1 , μ_2 и E_1 , E_2 – коэффициенты Пуассона и модули Юнга материала-

лов; $J = (r_1 \cdot r_2) / (r_1 + r_2)$; r_1 и r_2 – радиусы кривизны вершин неровностей контактирующих поверхностей; Kq – коэффициент, зависящий от ν , γ , ω ; ν – параметр опорной кривой; γ – коэффициент, характеризующий форму выступа; ω – коэффициент, зависящий от формы выступов и свойств материалов.

Для контакта одинаковых шероховатых поверхностей неравенство принимает иной вид:

$$h \geq n_1 Ra - n_2 (Ra)^x, \quad (2)$$

где $n_1 = 5,2$; $n_2 = 5,2(c_1 q_c)^{1,24}$; $x = 0,38$.

При получении неравенств (1) и (2) использовали известные зависимости проф. Дёмкина Н.Б. и некоторые выражения проф. Рыжова Э.В. и проф. Сулова А.Г.

Неравенства (1) и (2) можно решить с помощью ЭВМ и для известной толщины смазочной плёнки определить значение $Ra_{расч}$.

Тогда неравенствам будут удовлетворять все значения $Ra \leq Ra_{расч}$.

Теоретический расчёт показал, что второе слагаемое в неравенстве (1) не превышает 5 % при контурном давлении до 100 МПа. А второе слагаемое в неравенстве (2) не превышает 10 % при контурном давлении до 30 МПа. Это дает возможность несколько упростить неравенства (1) и (2):

$$h \geq 2,6 Ra - 3,9 Ra^{0,76} (c_1 q_c)^{0,48}, \quad (3)$$

$$h \geq 5,2 Ra. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) в расчётах можно использовать в указанных пределах. Результаты выполненных экспериментов, приведенных в табл. 1, удовлетворительно совпадают с расчётом.

1. Расчетные значения параметра шероховатости Ra

№ серии опытов	Скорость скольжения v , м/с	Поверхность трения	Шероховатость поверхностей		
			Ra , мкм	Ra после 21 ч, мкм	$Ra_{расч}$, мкм
1	0,18	образец	0,580	0,610	0,43...0,58
		контртело	0,920	0,126	
2		образец	0,112	0,106	0,20...0,26
		контртело	0,122	0,165	
3	0,50	образец	0,790	0,620	0,43...0,58
		контртело	1,090	0,139	
4		образец	0,133	0,114	0,20...0,26
		контртело	0,143	0,218	

Следует отметить, что это решение было осуществлено с некоторой погрешностью, которая объяснялась использованием зависимостей, полученных экспериментально. Однако

дальнейшие исследования показали, что данную задачу можно решить точнее.

При контакте шероховатой поверхности с гладкой, средняя толщина зазора в стыке выражается формулой [3]:

$$h_3 = Rp \{1 - [q_a / \sigma_T]^{1 - q / \sigma_T} - 0,18 [q_a / \sigma_T]^{2[1 - q / \sigma_T]}\}. \quad (5)$$

С учетом принятого допущения из зависимости (5) имеем толщину смазочного слоя:

$$h_c \geq Rp \{1 - [q_a / \sigma_T]^{1 - q / \sigma_T} - 0,18 [q_a / \sigma_T]^{2[1 - q / \sigma_T]}\}. \quad (6)$$

Тогда значение Rp из (6) можно определить как:

$$Rp \leq h_c / \{1 - [q_a / \sigma_T]^{1 - q / \sigma_T} - 0,18 [q_a / \sigma_T]^{2[1 - q / \sigma_T]}\}. \quad (7)$$

Теоретический анализ показал, что при $q_a / \sigma_T \leq 0,05$ формула (7) принимает вид:

$$Rp \leq h_c. \quad (8)$$

При этом погрешность расчета не превышает 6 %.

Без каких-либо трудностей и при всех известных параметрах точный расчет можно

выполнить и по формуле (13). Однако если учесть, что при $q_a/\sigma_T \leq 0,05$ работает более 90 % всех узлов трения, то применение формулы (14) является очевидным преимуществом при существенном упрощении расчетов.

При вычислениях подставляется меньшее значение σ_T .

При контакте двух одинаковых шероховатых поверхностей средняя толщина зазора в стыке определяется выражением [3]:

$$h_3 = 2Rp \{1 - ([q_a/\sigma_T]^{1-q_a/\sigma_T})/2 - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1-q_a/\sigma_T]}\}. \quad (9)$$

С учетом принятого допущения из (9) получим:

$$h_c \geq 2Rp \{1 - ([q_a/\sigma_T]^{1-q_a/\sigma_T})/2 - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1-q_a/\sigma_T]}\}. \quad (10)$$

Тогда из выражения (10) имеем:

$$Rp \leq h_c/[2\{1 - ([q_a/\sigma_T]^{1-q_a/\sigma_T})/2 - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1-q_a/\sigma_T]}\}]. \quad (11)$$

Теоретический анализ показал, что при $q_a/\sigma_T \leq 0,1$ формула (11) принимает вид:

$$Rp \leq h_c/2. \quad (12)$$

При этом погрешность расчета не превышает 6,5 %.

Если учесть, что почти 100 % узлов трения работает при $q_a/\sigma_T \leq 0,1$, то применение формулы (12) является явным преимуществом при существенном упрощении расчетов. В форму-

лы следует подставлять меньшее значение предела текучести σ_T . Принимая во внимание, что $Rp = 2,6 Ra$, будем иметь:

$$Ra = Rp/2,6. \quad (13)$$

Шероховатость поверхности, рассчитанная по формулам (7), (8), (11) и (12) для пары трения сталь 45 – БрО5Ц5С5 и номинального давления $q_a = 2$ МПа в сравнении с данными работы [2], приведена в табл. 2.

2. Расчетные значения шероховатости поверхности для стали 45 и БрО5Ц5С5

Толщина слоя смазки h_c , мкм	<i>Ra</i> , мкм, по формулам						
	[2]		(7)	(8)	(11)	(12)	
	Шероховатая с гладкой	Шероховатые	Сталь (шероховатая с гладкой)	Бронза (шероховатая с гладкой)	Сталь, бронза (шероховатые с гладкой)	Сталь, бронза (шероховатые)	Сталь, бронза (шероховатые)
0,13			0,050	0,051	0,05	0,025	0,025
0,3			0,116	0,118	0,11	0,058	0,058
0,5			0,193	0,198	0,19	0,096	0,096
0,8	0,35	0,16	0,309	0,316	0,31	0,154	0,155
1,0	0,44	0,20	0,386	0,395	0,38	0,190	0,190
1,2	0,52	0,24	0,463	0,474	0,46	0,230	0,230
1,35	0,58	0,26	0,521	0,534	0,52	0,260	0,260
1,5	0,64	0,29	0,579	0,593	0,58	0,290	0,290

Из табл. 2 следует, что рассчитанные по полученным формулам значения параметров шероховатости совпадают с экспериментальными данными работ [2, 3].

Данный диапазон параметров шероховатости *Ra*, обеспечивающий появление избирательного переноса на поверхностях трения, может быть получен следующими технологическими методами обработки [5]:

– плоские поверхности: торцовое фрезеро-

вание тонкое; цилиндрическое фрезерование тонкое; строгание тонкое; торцовое точение тонкое; шлифование чистовое, тонкое, плосковершинное; протягивание чистовое; шабрение чистовое, тонкое; чистовое накатывание роликами и шариковыми головками; вибронкатывание; суперфиниширование и полирование обычное и плосковершинное; притирка обычная и плосковершинная.

– наружные цилиндрические поверхности:

шлифование чистовое, плоское, чистовершинное; суперфиниширование обычное, плосковершинное; полирование обычное, плосковершинное; притирка обычная, плосковершинная; обкатывание чистовое; выглаживание; вибронакатывание; электромеханическая обработка; магнитно-абразивная обработка;

– внутренние цилиндрические поверхности: развертывание; протягивание; растачивание тонкое; шлифование чистовое, тонкое, плосковершинное; хонингование чистовое, тонкое, плосковершинное; притирка обычная, плосковершинная; раскатывание чистовое; выглаживание; вибораскатывание; дорнование.

Режимы для указанных методов обработки, обеспечивающие оптимальные значения параметра шероховатости Ra (см. табл. 2) рассчитываются по формулам, приведенным в работе [5].

Это позволило произвести технологическое обеспечение шероховатости поверхности для сферической подвески тепловоза ТЭМ 7 Людиновского тепловозостроительного завода. В качестве технологического способа обработки был принят метод обработки на фрезерных станках [6], имеющий некоторые преимущества перед другими методами (не требуется специальных приспособлений для движения резца по дуге круга, скорость резания постоянна и т.п.). Анализ выполненных ранее работ показал, что формулы настройки станка на обработку сфер носят частный характер. В работе были получены обобщенные формулы как при расположении центра сферы внутри шарового слоя, так и при его расположении вне шарового слоя. Для установления математической модели связи параметров шероховатости поверхности с условиями обработки был реализован факторный эксперимент типа 2^{5-1} .

В качестве переменных факторов, характеризующих условия обработки, были приняты: S – подача (интервал варьирования 16...40 мм/мин); v – скорость резания (620...160 м/мин); r_B – радиус при вершине резца (2,5...0,5 мм); γ – передний угол (0...-30°); $Rz_{пр}$ – предварительная шероховатость поверхности (160...80 мкм).

В результате получены эмпирические зависимости

для БрО5Ц5С5:

$$Ra = 0,11 S^{0,63} (90 + \gamma)^{0,48} / (v^{0,5} r_B^{0,21});$$

$$Rp = 0,48 S^{0,68} (90 + \gamma)^{0,59} / (v^{0,54} r_B^{0,14});$$

$$Rz = 0,83 S^{0,64} (90 + \gamma)^{0,36} / (v^{0,48} r_B^{0,19});$$

$$R_{max} = 1,14 S^{0,63} (90 + \gamma)^{0,31} / (v^{0,47} r_B^{0,16});$$

$$\rho_m = 439 v^{0,5} r_B^{0,4} / [S^{0,52} (90 + \gamma)^{0,47}].$$

для БрО3,5Ц7С5:

$$Ra = 0,14 S^{0,67} (90 + \gamma)^{0,34} / (v^{0,52} r_B^{0,21});$$

$$Rp = 0,35 S^{0,66} (90 + \gamma)^{0,45} / (v^{0,52} r_B^{0,18});$$

$$Rz = 1,36 S^{0,6} (90 + \gamma)^{0,3} / (v^{0,48} r_B^{0,17});$$

$$R_{max} = 1,15 S^{0,64} (90 + \gamma)^{0,28} / (v^{0,46} r_B^{0,19});$$

$$\rho_m = 517 v^{0,53} r_B^{0,43} / [S^{0,53} (90 + \gamma)^{0,48}],$$

где ρ_m – средний радиус выступов профиля шероховатости.

Нужно иметь в виду, что следует производить расчёт шероховатости поверхности и с не контактирующих сторон взаимодействующих тел [3]. Считая, что тело состоит из числа сфер, равного числу неровностей (рис. 1, а), и используя принцип независимости действия сил, можно принять, что величина предельной упругой деформации неровностей (при предельном давлении $q_a = \sigma_T$), соответствующая площади фактического контакта, также составляет половину упругой деформации тела (рис. 1, б):

$$Rp_1 + Rp_2 = 0,5y. \tag{14}$$

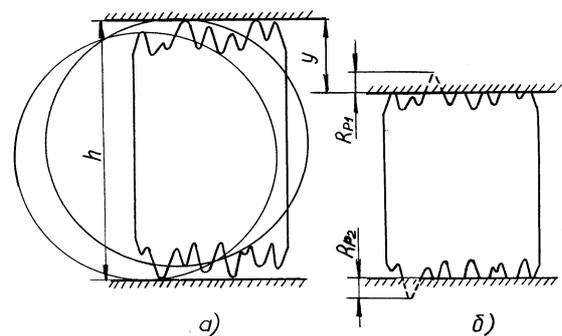


Рис. 1. Упрощенная схема деформации тела до (а) и после (б) приложения нагрузки

Величину упругой деформации тела можно рассчитать по формуле:

$$y = Ph / (EA_a) = q_a h / E, \tag{15}$$

где P – нагрузка; h – высота тела; E – модуль нормальной упругости; A_a – номинальная площадь контакта.

Подставляя (15) в (14) и учитывая, что при предельном нагружении ($q_a = \sigma_T$) определяется наибольшее предельное значение шероховатости поверхности, окончательно получим:

$$Rp_1 + Rp_2 \leq \sigma_T h / (2E). \quad (16)$$

Так как значение одного параметра Rp для контактирующих поверхностей вычисляется, то после расчёта правой части неравенства (16), другой параметр Rp рассчитывается.

Когда одна из поверхностей тела является гладкой, неравенство (16) принимает вид:

$$Rp \leq \sigma_T h / (2E). \quad (17)$$

Если шероховатость поверхностей одинакова, то

$$Rp \leq \sigma_T h. \quad (18)$$

Анализ неравенств (16) – (18) показывает, что отношение Rp/h не должно превышать $\sigma_T / (2E)$ или $\sigma_T / (4E)$. В этом случае упругий контакт наблюдается во всем диапазоне изменения напряжения до $q_a = \sigma_T$. Однако следует иметь в виду, что шероховатость поверхности двух контактирующих тел назначается по меньшему расчетному значению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаркунов, Д.Н., Крагельский, И.В., Поляков, А.А. Избирательный перенос в узлах трения. – М.: Транспорт, 1969. – 104 с.

2. Рыжов, Э.В., Хохлов, В.М. Расчёт шероховатости поверхности в условиях избирательного переноса / Применение избирательного переноса в узлах трения машин. – М.: Госстандарт СССР: ВИСМ, 1976. – С. 35 – 40.

3. Хохлов, В.М., Хохлова, С.В., Петраков, Д.И. Расчёт соединений. – Брянск: ВИМАХО, 2007. – 208 с.

4. Steinfuhrer, G. Schmierfilmdicke beim Geschwindigkeitswechsel. – Hannover: 1978. – 92 p.

5. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

6. Хохлов, В.М. Расширение технологических возможностей фрезерных станков по управлению качеством обработки сферических поверхностей // Технология машиностроения. – Тула: Изд-во Тульского политехнического института, 1977. – С. 66-69.

REFERENCES

1. Garkunov, D.N., Kragelsky, I.V., Polyakov, A.A. *Selective Transfer in Friction Units*. – М.: Transport, 1969. – pp. 104.

2. Ryzhov, E.V., Khokhlov, V.M. Computation of surface roughness under conditions of selective transfer / *Selective Transfer Application in Friction Units of Machines*. – М.: Gosstandard of the USSR: VISM, 1976. – pp. 35-40.

3. Khokhlov, V.M., Khokhlova, S.V., Petrakov, D.I. *Computation of Joints* – Bryansk: VIMACHO, 2007. – pp. 208.

4. Steinfuhrer, G. Schmierfilmdicke beim Geschwindigkeitswechsel. – Hannover: 1978. – 92 p.

5. *Technologist's Reference Book* / under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Innovation Mechanical Engineering, 2019. – pp. 800.

6. Khokhlov, V.M. Technological potentialities enhancement of milling machines on quality control of spherical surface processing // *Engineering Techniques*. – Tula: Tula Polytechnic Institute Publishers, 1977. – pp. 66-69.

Рецензент д.т.н.
Петр Юрьевич Бочкарев

