

УДК 621.891

DOI: 10.30987/article_5c0f808a60fdc8.36126307

В.М. Хохлов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Проведен теоретический анализ и синтез ранее выполненных исследований, разработана теория и получены формулы для расчёта параметров шероховатости контактирующих поверхностей, которые обеспечиваются технологически.

Ключевые слова: расчёт, параметры шероховатости, поверхность, контакт, деформация, технологическое обеспечение.

V.M. Khokhlov

COMPUTATION OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS FOR TECHNOLOGICAL SUPPORT

The aim of this work consists in the development of a theory and obtaining formulae for roughness parameter computation of contact surfaces.

As investigation methods there was used a theoretical analysis and synthesis.

As a result of the investigations carried out the theoretical computations coincide satisfactorily with

experimental data. On the basis of the theory developed there are obtained formulae for the computation of roughness parameters for contact surfaces the numerical values of which may be supported technologically.

Key words: computation, roughness parameters, surface, contact, deformation, technological support.

Введение

Параметры шероховатости поверхностей являются важными характеристиками любых деталей машин и определяются в основном экспериментально. Однако в последние годы появляются работы, в которых предпринимаются попытки теорети-

ческого определения параметров шероховатости. Причём эти теоретические расчёты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Одной из таких работ является настоящая статья.

Расчёт шероховатости поверхности, обеспечивающей упругий контакт

Шероховатость поверхностей различных соединений определяется, как правило, опытным путем. Рекомендуемые ее значения приводятся в соответствующих справочниках. При этом обращает на себя внимание тот факт, что при увеличении размеров контактирующих тел шероховатость их поверхностей также увеличивается (табл. 1, квалитеты 6-8, 12) [1].

Теоретический расчет параметров шероховатости поверхности при граничной смазке и в условиях избирательного переноса представлен в работах [2; 3]. Предложенная в них методика позволяет осуществить расчет параметров шероховатости соединений, если их эксплуатационными характеристиками (например, толщина смазочного слоя), взаимосвязанными

с параметрами шероховатости, можно задаваться. Но она не является универсальной.

Экспериментальными исследованиями [4] было установлено, что на уровне средней линии, соответствующем высоте сглаживания профиля шероховатости R_p , для методов обработки с удалением слоя металла относительная опорная длина профиля $t_{Rp} = 0,5$. Это значение использовалось затем в теоретических расчетах.

Теоретическое решение также дает $t_{Rp} = 0,5$ [5; 6]. Исходя из определения с помощью прибора среднего арифметического отклонения профиля R_a (рис. 1), можно записать следующие уравнения:

$$R_{a1}l_1 = R_{a2}l_2, \quad (1)$$

$$R_a = (R_{a1}l_1 + R_{a2}l_2)/l, \quad (2)$$

где l - базовая длина; l_1 - опорная длина выступов профиля на уровне средней линии; l_2 - опорная длина впадин профиля на

уровне средней линии; R_{a1} - среднее арифметическое отклонение выступов профиля, расположенных выше средней линии; R_{a2} - среднее арифметическое отклонение впадин профиля, расположенных ниже средней линии.

Таблица 1

Рекомендуемые [1] и расчетные значения параметров шероховатости для сталей ($E = 210$ ГПа)

Квалитет			6 – 8	12	-														
Интервалы размеров, мм	Свыше	До	$\sigma_T, \text{ МПа}$				200	300	500										
	размеров, мм	1	3	Средний Размер интервала, мм	2	$R_a, \text{ мкм}$	0,63	40	$R_a, \text{ мкм}$	0,18	0,27	0,46							
3		6	4,5		2,5		80			0,41	0,62	1							
6		10	8							$R_z, \text{ мкм}$	0,73	1,1	1,8						
10		18	14								1,3	1,9	3,2						
18		30	24								2,2	3,3	27						
30		50	40								3,7	27	46						
50		80	65								20	160	$R_z, \text{ мкм}$	30	45	74			
80		120	100											46	70	117			
120		180	150											20	160	$R_z, \text{ мкм}$	68	105	171
180		250	215														98	147	246
250		315	282														129	193	320
315		400	357														163	246	309
400		500	450														206	309	515

Примечание. Расчет для среднего размера интервала.

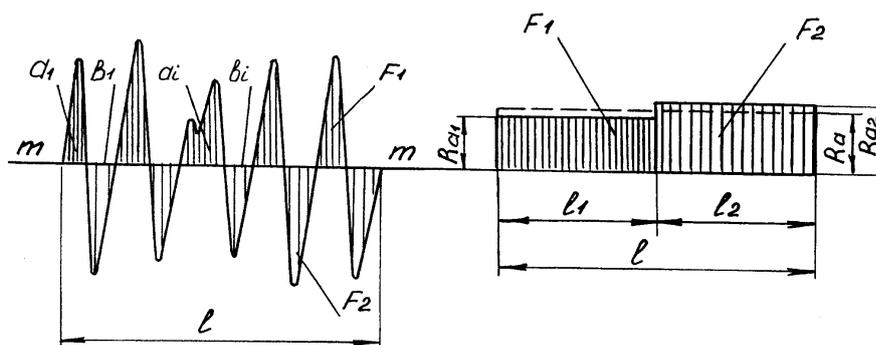


Рис. 1. Схема определения параметра R_a

$$l = l_1 + l_2 . \quad (3)$$

При этом параметр R_a определится по формуле

$$R_a = (R_{a1} + R_{a2})/2 . \quad (4)$$

Подставляя (3) в (2) и приравнявая (2) и (4), получим: $R_{a1} = R_{a2} = R_a$. С учетом уравнений (1) и (3) имеем: $l_1 = l_2 = l/2$. Тогда относительная опорная длина профиля на уровне средней линии $t_{Rp} = l_1/l = l/2l = 0,5$.

В работах [6-8] (в их основу были положены предпосылки о том, что для осуществления упругой деформации основного материала необходимо иметь номинальное давление q_a , не превышающее предел текучести материала σ_T , а для выполнения условия упругого контакта сферических неровностей нужно, чтобы среднее давление на контакте не превышало $3\sigma_T$) было доказано, что фактическая площадь контакта A_r при предельной нагрузке, соответствующей номинальному давлению $q_a = \sigma_T$, составляет 0,48 от номинальной, то есть примерно равна $0,5A_a$.

Равенство площадей контакта на уровне средней линии (на уровне R_p) и при предельной нагрузке позволяет сделать вывод о том, что эти площади находятся на одном уровне R_p . Следовательно, величина предельной упругой деформации неровностей, соответствующая площади фактического контакта при предельном нагружении ($q_a = \sigma_T$), численно равна R_p . Отсюда следует также, что величина наибольшего сближения непосредственно в стыке шероховатых поверхностей при упругом контакте не может превышать $2R_p$.

В то же время из решения задачи Г. Герца для сферы известно [9], что величина полной упругой деформации сферы и плоскости определяется по формуле

$$y = (k_1 + k_2)q_0\pi^2r/2 , \quad (5)$$

где $k_1 = k_2 = (1 - \mu)/(\pi E)$; q_0 - соответствующее максимальное давление; r - радиус поверхности контакта.

В случае контакта сферы и жесткой плоскости

$$y = k_1q_0\pi^2r/2 . \quad (6)$$

Значение же местной деформации сферы и плоскости, соответствующей площадке фактического контакта, равно [9]

$$W = (k_1 + k_2)q_0\pi^2r/4 \quad (7)$$

или, при жесткой плоскости,

$$W = k_1q_0\pi^2r/4 . \quad (8)$$

Сравнивая (5) и (7) или (6) и (8), получим:

$$W = y/2 . \quad (9)$$

На основании (9) величина местной деформации сферы в 2 раза меньше ее полной упругой деформации.

Считая, что тело состоит из числа сфер, равного числу неровностей (рис. 2а), и используя принцип независимости действия сил [10], 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. 2б), то есть [5-8]

$$R_{p1} + R_{p2} = 0,5y . \quad (10)$$

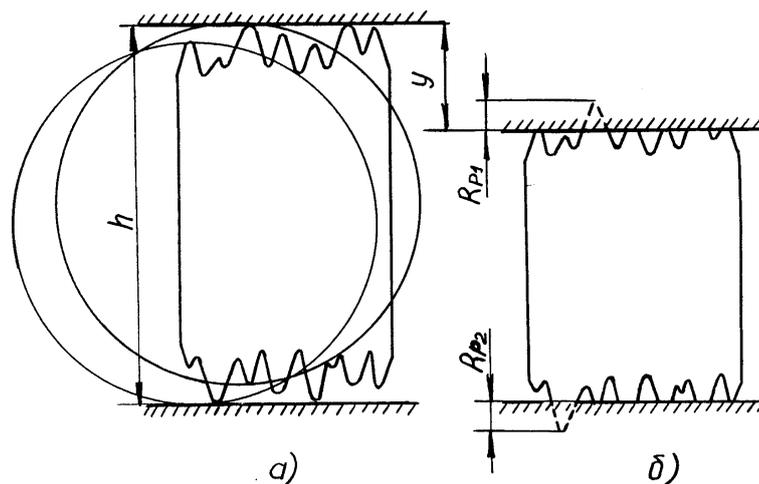


Рис. 2. Упрощенная схема деформации тела до (а) и после (б) приложения нагрузки

Величину упругой деформации тела можно рассчитать по формуле

$$y = Ph/(EA_a) = q_a h/E, \quad (11)$$

где P - нагрузка; h - высота тела; E - модуль нормальной упругости.

Подставляя (11) в (10) и учитывая, что при предельном нагружении ($q_a = \sigma_T$) определяется наибольшее предельное значение шероховатости поверхности, окончательно получим [6]:

$$R_{p1} + R_{p2} \leq \sigma_T h/(2E). \quad (12)$$

После вычисления правой части неравенства (12) необходимо задаться значением одного из параметров R_p . При этом его величина не должна превышать вычисленного значения правой части. Другой параметр R_p рассчитывается.

Когда одна из поверхностей тела является гладкой, неравенство (12) принимает вид

$$R_p \leq \sigma_T h/(2E). \quad (13)$$

Если шероховатость поверхностей одинакова, то

$$R_p \leq \sigma_T h/(4E). \quad (14)$$

Анализ неравенств (12-14) показывает, что отношение R_p/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.

Учитывая, что для методов обработки со снятием стружки [2]

$$R_p = 2,6R_a, \quad R_z = 5,2R_a, \quad (15)$$

можно рассчитать параметры шероховатости R_a и R_z .

В табл. 1 приведены результаты расчета по формулам (14) и (15), которые удовлетворительно совпадают с данными [1]. Дальнейшее возрастание σ_T , по всей видимости, не имеет большого значения, поскольку шероховатость поверхности назначается по меньшему из двух расчетных значений. Например, при одинаковых размерах деталей, имеющих $\sigma_T = 200$ МПа и $\sigma_T = 1000$ МПа, расчет должен выполняться по меньшему значению $\sigma_T = 200$ МПа.

Предлагаемая методика расчета шероховатости поверхностей имеет существенное значение для практики. Приведенные формулы позволяют рассчитать шероховатость поверхностей упруго контактирующих деталей любых соединений.

Шероховатость поверхности чугуновых антифрикционных втулок можно рассчитать по формуле (14). При этом даже для высокопрочного чугуна с $\sigma_T = 400$ МПа при толщине стенок 3 и 7,5 мм шероховатость поверхностей (наружной и внутренней) должна быть соответственно не более $R_a = 0,56$ мкм и $R_a = 1,4$ мкм. Между

тем в справочнике указывается большее по сравнению с расчетным значение шероховатости поверхности $R_a = 2,5$ мкм [1].

В заключение нужно отметить ряд важных обстоятельств. При расчете шероховатости поверхности хрупких материалов, не имеющих площадки текучести, в расчетные формулы вместо предела текучести σ_T подставляют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ или, при его отсутствии, предел прочности σ_b .

Для обеспечения упругого контакта на чертежах деталей необходимо проставлять шероховатость поверхности не более расчетной.

В зависимости от эксплуатационного свойства шероховатость поверхности может определяться также с помощью других критериев и формул [2; 11]. В этом случае шероховатость поверхности на чертеже не должна превышать наименьшее из расчетных значений.

Методика определения шероховатости поверхности при наличии масла

Теоретические и экспериментальные предпосылки, имеющиеся в литературе, позволяют перейти к теоретическому определению параметров шероховатости поверхностей пар трения. При этом предлагается общее решение по определению характеристик шероховатости поверхностей трущихся соединений при наличии смазочного материала, включая и механизм избирательного переноса (ИП) [2; 3; 6; 11].

Решение обратной задачи (нахождение параметров шероховатости по требуемым эксплуатационным свойствам) для избирательного переноса определялось как важностью вопроса по созданию безыз-

носных пар трения, так и наличием именно в этой области некоторых экспериментальных сведений, позволяющих осуществить такое решение. Следует отметить, что ранее данное решение было осуществлено с некоторой погрешностью, которая объяснялась использованием зависимостей, полученных экспериментально [2]. Однако дальнейшие исследования показали, что данную задачу можно решить точнее.

В качестве основного допущения принимается [12], что благоприятные условия работы трущихся поверхностей наступают тогда, когда объем смазочного слоя (или сервоитной пленки), образующегося на поверхности трения, больше или равен объему зазора между неровностями. Следовательно, имеющийся на поверхностях трения смазочный слой (или тонкий слой сервоитной пленки, находящейся в квазижидком состоянии) при приложении нагрузки каким-то образом должен размещаться между неровностями трущихся поверхностей и способствовать уменьшению взаимодействия между ними, если толщина смазочного слоя больше или равна средней толщине зазора между шероховатыми поверхностями. Задаваясь толщиной смазочного слоя (при наличии смазки [13] - 0,2...2,24 мкм, в условиях ИП [14] - 0,5...1,5 мкм, при неподвижном контакте и атмосферном давлении - 0,13...0,24 мкм [6]), можно рассчитать шероховатость контактирующих поверхностей.

Контакт шероховатой поверхности с гладкой. При контактировании шероховатой поверхности с гладкой средняя толщина зазора в стыке выражается формулой [6; 11]

$$h_3 = R_p \{ 1 - [q_a/\sigma_T]^{1 - q_a/\sigma_T} - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1 - q_a/\sigma_T]} \}. \quad (16)$$

С учетом принятого допущения из зависимости (16) имеем:

$$h_c \geq R_p \{ 1 - [q_a/\sigma_T]^{1 - q_a/\sigma_T} - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1 - q_a/\sigma_T]} \}, \quad (17)$$

где h_c - толщина смазочного слоя.

Тогда значение R_p из (17) можно определить как

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

Теоретический анализ показал, что при $q_a/\sigma_T \leq 0,05$ формула (18) принимает вид

$$R_p \leq h_c. \tag{19}$$

При этом погрешность расчета не превышает 6 %.

Без каких-либо трудностей и при всех известных параметрах точный расчет можно выполнить и по формуле (18). Однако если учесть, что при $q_a/\sigma_T \leq 0,05$ работает более 90 % всех узлов трения, то применение формулы (19) является очевидным преимуществом при существен-

ном упрощении расчетов. При вычислениях подставляется меньшее значение σ_T .

Контакт поверхностей с одинаковыми физико-механическими свойствами и шероховатостью. Будем считать поверхностями с одинаковыми шероховатостью и физико-механическими свойствами такие, которые имеют одинаковые высотные (R_a, R_p, R_z, R_{max}) и физико-механические параметры (σ_T, σ_b и др.).

При контакте двух одинаковых шероховатых поверхностей средняя толщина зазора в стыке определяется выражением [6; 11]

$$h_3 = 2R_p \{ 1 - ([q_a/\sigma_T]^{1 - q_a/\sigma_T})/2 - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1 - q_a/\sigma_T]} \}. \tag{20}$$

С учетом принятого допущения из (20) получим:

$$h_c \geq 2R_p \{ 1 - ([q_a/\sigma_T]^{1 - q_a/\sigma_T})/2 - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1 - q_a/\sigma_T]} \}. \tag{21}$$

Тогда из выражения (21) имеем:

$$R_p \leq h_c / [2 \{ 1 - ([q_a/\sigma_T]^{1 - q_a/\sigma_T})/2 - 0,18[q_a/\sigma_T]^{2[1 - q_a/\sigma_T]} \}]. \tag{22}$$

Теоретический анализ показал, что при $q_a/\sigma_T \leq 0,1$ формула (22) принимает вид

$$R_p \leq h_c/2. \tag{23}$$

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 (23) является явным преимуществом при существенном упрощении расчетов. Принимая во внимание [2; 6], что

$$R_p = 2,6 R_a, \tag{24}$$

из (24) определим

$$R_a = R_p/2,6. \tag{25}$$

Шероховатость поверхности, рассчитанная по формулам (18), (19), (22) и (23) для пары трения сталь 45 - БрО5Ц5С5 и номинального давления $q_a = 2$ Мпа, в сравнении с данными работы [2] приведена в табл. 2. Из таблицы следует, что рассчитанные по полученным формулам значения параметров шероховатости совпадают с расчетными и экспериментальными данными работ [2; 6].

Таблица 2

Расчетные значения шероховатости поверхности для стали 45 и БрО5Ц5С5

Толщина слоя смазки h_c , мкм	R_a , мкм, по формулам						
	[2]		(18)	(19)	(22)	(23)	
	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			0,05	0,051	0,05	0,025	0,025

Толщина слоя смазки h_c , мкм	R_a , мкм, по формулам						
	[2]	(18)	(19)	(22)	(23)		
	Шероховатая с гладкой	Шероховатые	Сталь (шероховатая с гладкой)	Бронза (шероховатая с гладкой)	Сталь, бронза (шероховатые с гладкой)	Сталь, бронза (шероховатые)	Сталь, бронза (шероховатые)
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	0,44	0,20	0,386	0,395	0,38	0,19	0,19
1,2	0,52	0,24	0,463	0,474	0,46	0,23	0,23
1,35	0,58	0,26	0,521	0,534	0,52	0,26	0,26
1,5	0,64	0,29	0,579	0,593	0,58	0,29	0,29

Окончание табл. 2

Заключение

Приведенные в данной статье теория и расчеты позволяют при упругом контакте получить параметры шероховатости контактирующих поверхностей как при отсутствии, так и при наличии масла и за-

тем обеспечить их технологически [15; 16 и др.]. В формулы следует подставлять меньшее значение предела текучести σ_T .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 1980. – Т. 1. – 728 с.
2. Рыжов, Э.В. Расчёт шероховатости поверхности в условиях избирательного переноса / Э.В. Рыжов, В.М. Хохлов // Применение избирательного переноса в узлах трения машин. – М.: Госстандарт СССР; ВИСМ, 1976. – С. 35-40.
3. Chochlow, V.M. Berechnen der Rauheitsparameter von Kontaktflächen geschmirter Reibungsparungen / V.M. Chochlow // Maschinenmarkt. – 1982. – № 94. – P. 2013-2014.
4. Рыжов, Э.В. К вопросу определения опорных площадей / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов // Технология машиностроения. – Брянск, 1973. – С. 67-71.
5. Ryzhov, E.V. Prediction of surface roughness in elastic contact / E.V. Ryzhov, V.M. Khokhlov // Friction and Wear. – 1996. – Vol. 17. – № 3. – P. 326-330.
6. Хохлов, В.М. Расчёт соединений / В.М. Хохлов, С.В. Хохлова, Д.И. Петраков. – Брянск: ВИМАХО, 2007. – 208 с.
7. Хохлов, В.М. Основы расчёта контурных и фактических площадей контакта и давлений / В.М. Хохлов // Вестник машиностроения. – 1990. – № 7. – С. 21-22.
8. Khokhlov, V.M. Foundations underlying the calculation of contour and actual contact areas and pressures / V.M. Khokhlov // Russian Engineering Research. – 1990. – Vol. 10. – № 7. – P. 15-18.
9. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
10. Беляев, Н.М. Соппротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
11. Khokhlov, V.M. The contact of rough lubricated surfaces at friction / V.M. Khokhlov // Friction and Wear. – 1997. – Vol. 18. – № 3. – P. 415-420.
12. Шнейдер, Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением / Ю.Г. Шнейдер. – М.; Л.: Машгиз, 1968. – 268 с.
13. Steinfuhrer, G. Schmierfilmdicke beim Geschwindigkeitswechsel / G. Steinfuhrer. – Hannover, 1978. – 92 p.
14. Гаркунов, Д.Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, А.А. Поляков. – М.: Транспорт, 1969. – 104 с.
15. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – Киев: Наукова думка, 1984. – 272 с.
16. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
1. Anuriev, V.I. Reference Book of Designer-Engineering Worker: in 3 Vol. / V.I. Anuriev. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – Vol.1. – pp. 728.
2. Ryzhov, E.V. Computation of surface roughness under conditions of selective transfer / E.V. Ryzhov, V.M. Khokhlov // Selective Transfer Applica-

- tion in *Friction Units of Machines*. – M.: State Standard of the USSR; VISM, 1976. – pp. 35-40.
3. Chochlow, V.M. Berechnen der Rauheitsparameter von Kontaktflächen geschmirter Reibungsparungen / V.M. Chochlow // *Maschinenmarkt*. – 1982. - № 94. – P. 2013-2014.
 4. Ryzhov, E.V. To problem of support area definition / E.V. Ryzhov, A.G. Suslov // *Engineering Technique*. – Bryansk, 1973. – pp. 67-71.
 5. Ryzhov, E.V. Prediction of surface roughness in elastic contact / E.V. Ryzhov, V.M. Khokhlov // *Friction and Wear*. – 1996. – Vol. 17. - № 3. – P. 326-330.
 6. Khokhlov, V.M. *Computation of Joints* / V.M. Khokhlov, S.V. Khokhlova, D.I. Petrakov. – Bryansk: VIMANO, 2007. – pp. 208.
 7. Khokhlov, V.M. Fundamental for computation of contour and actual areas of contact and pressures / V.V. Khokhlov // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1990. – No.7. – pp. 21-22.
 8. Khokhlov, V.M. Foundations underlying the calculation of contour and actual contact areas and pressures / V.M. Khokhlov // *Russian Engineering Research*. – 1990. – Vol. 10. - № 7. – P. 15-18.
 9. Timoshenko, S.P. *Theory of Elasticity* / S.P. Timoshenko, D. Gudier. – M.: Science, 1975. – pp. 576.
 10. Belyaev, N.M. *Resistance of Materials* / N.M. Belyaev. – M.: Science, 1976. – pp. 608.
 11. Khokhlov, V.M. The contact of rough lubricated surfaces at friction / V.M. Khokhlov // *Friction and Wear*. – 1997. – Vol. 18. - № 3. – P. 415-420.
 12. Schneider, Yu.G. *Metal Pressure Finishing* / Yu.G. Schneider. – M.: Mashgiz, 1968. – pp. 268.
 13. Steinfuhrer, G. Schmierfilmdicke beim Geschwindigkeitswechsel / G. Steinfuhrer. – Hannover, 1978. – 92 p.
 14. Garkunov, D.N. *Selective Transfer in Friction Units* / D.N. Garkunov, I.V. Kragelsky, A.A. Polyakov. – M.: Transport, 1969. – pp. 104.
 15. Ryzhov, E.V. Engineering methods to increase wear-resistance in machinery / E.V. Ryzhov. – Kiev: *Scientific Thought*, 1984. – pp. 272.
 16. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters in Parts Surface Layers* / A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.

Статья поступила в редакцию 027.08.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного
технического университета
Шальгин М.Г.

Статья принята к публикации 12.11.18.

Сведения об авторах:

Хохлов Виктор Матвеевич, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, тел.: 8(952) 962-61-89, e-mail: khokh999@rambler.ru.

Khokhlov Victor Matveevich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Bryansk State Technical University, e-mail: khokh999@rambler.ru.