

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №12 (162). С.39-45.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №12 (162). P.39-45.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2024-39-45

Влияние финишной обработки на интенсивность изнашивания в начальный период эксплуатации цилиндрических трибоповерхностей

Анатолий Васильевич Тотай¹, д.т.н.

Максим Николаевич Нагоркин², д.т.н.

^{1, 2} *Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия*

¹ totai_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

² nagorkin_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

Аннотация. Повышение долговечности деталей пар трения скольжения не может постоянно осуществляться за счет применения более дорогостоящих конструкционных материалов или, тем более, за счет использования специальных покрытий, получаемых с применением энергии плазмы или вакуумных технологий. Известно, что сокращение периода приработки способно значительно увеличить ресурс поверхности и, кроме того, обеспечить более стабильный режим эксплуатации на этапе основного периода службы изделия, обусловленного конкретными условиями и режимами эксплуатации. Многочисленные попытки технологически обеспечить параметры шероховатости поверхности, соответствующие параметрам шероховатости, сформированной в период нормального износа, часто не приводили к желаемым результатам. Как показали дальнейшие исследования в этом направлении, время периода приработки затрачивается на формирование структуры поверхностного слоя под воздействием заданных нагрузок, скоростей относительного скольжения, исходных зазоров, марок смазок и т. д. А установившиеся параметры шероховатости стабилизируются только на характерной для данной пары субструктуры. В представленной статье сделана попытка из имеющегося разнообразия описания структурных параметров поверхностного слоя деталей использовать только размер зерна стальных поверхностей. В пользу этого решения говорит и тот факт, что параметр регламентирован ГОСТ 5639-82, и имеется апробированная методика его определения соответствующими аппаратными средствами. Теоретически и экспериментально удалось, ориентируясь на размер зерна трибоповерхности, показать возможность сокращения периода приработки условиями технологического воздействия на трибоповерхность.

Ключевые слова: скорость деформации, контактная температура, размер зерна, период приработки, равновесная структура

Для цитирования: Тотай А.В., Нагоркин М.Н. Влияние финишной обработки на интенсивность изнашивания в начальный период эксплуатации цилиндрических трибоповерхностей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 12 (162). С. 39–45. doi: 10.30987/2223-4608-2024-39-45

The effect of finishing on the wear rate in the initial period of operation of cylindrical tribosurfaces

Anatoly V. Totay¹, D. Eng.
Maxim N. Nagorkin², D. Eng.

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ totai_av@mail.ru

² nagorkin_mn@mail.ru

Abstract. Increasing the durability of sliding friction pairs parts cannot be possible on a regular basis using more expensive structural materials or, moreover, applying special coatings which are obtained due to using plasma energy or vacuum technologies. It is known that shortening running-in period can significantly increase the surface area and, in addition, provide a more stable operation mode at the stage of the main service life of the product, due to specific conditions and operating modes. Numerous attempts to access surface roughness parameters corresponding to the roughness parameters formed during normal wear-out period often did not lead to the desired results. As further research in this direction has shown, the time of the run-in period is spent on the formation of the surface layer structure under the influence of specified loads, slippage speeds, initial loads, grades of lubricants, etc. And the steady-state roughness parameters are stabilized only on the substructure characteristic of this pair. In the presented article, an attempt is made to use only the grain size of steel surfaces from the available variety of descriptions of the structural parameters of the parts surface layer. This decision is supported by the fact that the parameter is regulated by GOST 5639-82 (State Standard), and there is a proven method for determining it by using the appropriate hardware. Focusing on the grain size of the tribosurface, it became possible to show the potential of reducing the period of running-in through the conditions of technological influencing factors on the tribosurface.

Keywords: deformation rate, contact temperature, grain size, running-in period, equilibrium structure

For citation: Totay A.V., Nagorkin M.N. The effect of finishing on the wear rate in the initial period of operation of cylindrical tribosurfaces / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 12 (162). P. 39–45. doi: 10.30987/2223-4608-2024-39-45

Введение

Повышению износостойкости ответственных триботехнических систем технологическими методами посвятили свои исследования многие специалисты в данной области техники. В большинстве случаев результатом таких разработок являлись рекомендации по обеспечению так называемой «равновесной» шероховатости, сформированной в паре трения в процессе эксплуатации [1 – 3]. Причем, фиксировались не только рекомендуемые гостовские параметры, но и дополнительные, наиболее полно характеризующие микрорельеф поверхностей.

Данные лабораторных и натурных испытаний чаще всего не достигали желаемых результатов, что приводило к однозначным выводам о невозможности сформировать трибоповерхность на стадии изготовления с минимальным периодом приработки, ориентируясь только на микрогеометрию поверхности.

В различных алгоритмах расчета износостойкости, например, в молекулярно-механической теории трения, неизбежно присутствуют различные физические параметры

конструкционных материалов. Прежде всего, это твёрдость, модуль упругости, предел текучести и т. п. Очевидно, что в тонких субструктурах, которые сформировались в процессе технологического воздействия, перечисленные параметры будут отличаться от их табличных значений, иногда очень существенно. Следовательно, для объективной оценки ресурса трибоповерхности необходимо иметь уточненные значения физических параметров, сложившихся в результате комплексного воздействия различных технологических факторов.

Теоретический анализ формирования структурных характеристик поверхностного слоя

Согласно молекулярно-механической теории трения наиболее информативным физическим параметром, характеризующим состояние металла поверхностного слоя и в значительной степени определяющим интенсивность изнашивания твёрдых тел, является предел текучести материала [4]. Одним из основных постулатов теории пластической деформации материалов является зависимость

фактического значения предела текучести от действующей температуры и скорости деформации в процессе механической обработки [5]. Реальное значение предела текучести можно определить с помощью коэффициента ψ , учитывающего скорость деформации в процессе реализации того или иного метода обработки:

$$\sigma'_T = \psi \sigma_T, \quad (1)$$

где σ'_T – фактическое значение предела текучести; σ_T – табличное значение.

Значение коэффициента ψ определяется по следующей зависимости:

$$\psi = k_\psi + m_\psi \frac{\theta}{\theta_{пл}}, \quad (2)$$

где θ – действующая температура; $\theta_{пл}$ – температура плавления материала.

Значения коэффициентов k_ψ и m_ψ выбирают по следующему принципу:

- при $\theta / \theta_{пл} \leq 0,3$ $k_\psi = 1$; $m_\psi = 1,5$;
- при $\theta / \theta_{пл} \geq 0,3$ $k_\psi = 0,35$; $m_\psi = 2,8$.

Более точное значение коэффициента ψ можно установить по графикам на рис. 1.

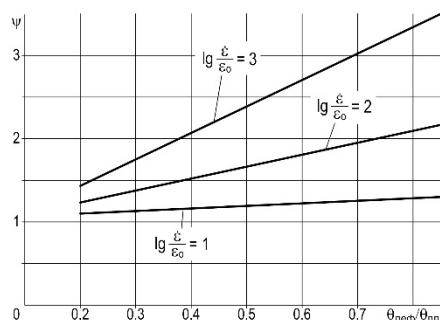


Рис. 1. Зависимость коэффициента ψ от температуры в зоне деформации материала

Fig. 1. Dependence of the coefficient ψ from the temperature in the deformation zone of the material

Как показал ряд исследований практически все механические методы обработки можно отнести к высокоскоростным процессам деформирования и считать соотношение $\dot{\epsilon}/\epsilon$ равным порядку 10^3 .

Для объективной оценки состояния трибоповерхности в период стабильного износа желательно иметь параметр, достаточно

несложно определяемый экспериментальным путём, и способный служить целевой функцией для его обеспечения в процессе изготовления. Для этой цели можно воспользоваться зависимостью Холла-Петча [6], которая имеет вид:

$$\sigma'_T = \sigma_T + \frac{c}{\sqrt{d}}, \quad (3)$$

где c – константа, d – средний размер зерна.

В ряде случаев по примеру металлургов и материаловедов пользуются не размерами зерен, а их номером по ГОСТ 5639-82, в котором весь возможный диапазон структур разбит на 18 номеров G от 3 до 14.

Для аналитического определения размера зерна требуется знать закон изменения предела текучести в зависимости от действующей температуры в процессе обработки. Подобная информация содержится в зависимости, полученной Н.С. Курнаковым:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_T \left[1 - e^{\beta(\theta_i - \theta_{пл})} \right], \quad (4)$$

где σ_{Ti} – значение предела текучести при температуре θ_i ; β – константа.

После преобразования уравнений (1) – (4) относительно d , получим зависимость

$$d = \left\{ G / \sigma_T \left[\left(K_\psi + m_\psi \frac{\theta_i}{\theta_{пл}} \right) \left(1 - e^{n_T(\theta_i - \theta_{пл})} \right) - 1 \right] \right\}^2 \quad (5)$$

Для установления характера распространения тепла в объёме твёрдого тела предлагается воспользоваться интегралом вероятности Гаусса [7]:

$$v_T = \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{F_0 h}} \right), \quad (6)$$

где v_T – относительная избыточная температура, определяемая по зависимости:

$$v_T = \frac{\theta_{\dot{\epsilon}} - \theta_h}{\theta_{\dot{\epsilon}} - \theta_i}, \quad (7)$$

где θ_k – температура в контакте «инструмент–заготовка»; θ_h – температура на глубине

h, θ_0 – температура окружающей среды.

Выражение под корнем в зависимости (6) определяется критерием Фурье F_0 :

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{h^2}, \quad (8)$$

α – коэффициент температуропроводности материала заготовки; τ – время действия теплового источника; h – расстояние от поверхности.

Решая совместно выражения (6) и (7) относительно θ_h и пренебрегая θ_0 , получим:

$$\theta_h = \theta_{\varepsilon} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h}{2\sqrt{\alpha \tau}} \right) \right]. \quad (9)$$

Средняя температура поверхностного слоя может быть определена по зависимости:

$$\theta = 0,5\theta_{\varepsilon} \left\{ 1 - \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln q_0 - \ln \sigma'_T}{2m\sqrt{\alpha \tau}} \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

Здесь q_0 – давление в контакте «инструмент-заготовка». Для практических расчётов можно принимать приближённое значение θ :

- для точения и выглаживания: $\theta = 0,9\theta_k$;
- для шлифования: $\theta = 0,7\theta_k$.

Что касается контактной температуры, то современные аппаратные средства дают возможность оперативно экспериментальным путём определить её значение. В частности, можно воспользоваться тепловизионным методом.

Далее на основе приведенного аналитического подхода получена теоретическая связь между глубиной h залегания слоя материала с размером зерна d :

$$h = \frac{1}{p} \ln \left\{ \theta_k - \ln \left[\frac{1 + \psi - \frac{c}{\sigma_T \sqrt{d}}}{h_T \psi} \right] + \theta_{пл} \right\}, \quad (11)$$

где p – коэффициент, зависящий от теплофизических свойств обрабатываемого материала.

В последнее время исследование триботехнических закономерностей периода

приработки деталей пар трения скольжения выделилось в самостоятельный раздел проблемы повышения износостойкости деталей машин и надёжности сопряжений. Важнейшей особенностью начального периода работы поверхности является постоянно изменяющаяся скорость износа, уменьшение температуры и давления в зоне контакта поверхностей. Неизбежно также и изменение структуры поверхности. От того, насколько быстро в паре трения сформируется состояние поверхностей, близкое к эксплуатационному, будет зависеть с какой величины износа начнется нормальный период эксплуатации соединения и, в итоге, общий срок его службы. Основную роль в управлении исходным состоянием поверхности может сыграть технология их изготовления.

Результаты экспериментов

С погрешностью, приемлемой для практических расчётов, размер зерна d поверхностного слоя, соответствующий режиму нормального (установившегося) износа, можно получить по зависимости (5). В этом случае задачей технологической подготовки трибоповерхностей является обеспечение в поверхностном слое зерна, близкого по своим размерам к рассчитанному для конкретных условий эксплуатации.

Анализ зависимости (5) показывает, что возможность управления величиной d за счёт вариации коэффициента ψ незначительна (см. рис. 1) как при изготовлении, так и при эксплуатации поверхности. Изменение коэффициента ψ от 1,15 до 2 происходит при возрастании отношения скорости деформации в процессе обработки или эксплуатации к скорости деформации при испытаниях материала от 10 до 10^4 . Таким образом, только температура пластической деформации позволяет реально влиять на размер зерна поверхностного слоя.

Для уменьшения периода приработки трибоповерхностей предлагается следующий алгоритм действий:

1) экспериментально определяется размер зерна d у границы поверхности после пути трения, равному периоду приработки;

2) по зависимости (11) рассчитывается глубина слоя h , имеющая средний размер зерна, близкий к эксплуатационному;

3) по априорным сведениям, теоретическим или эмпирическим зависимостям рассчитывается значение температур, выбирается метод обработки и устанавливаются режимы обработки. В случае необходимости в качестве лимитирующего значения может быть выбрана температура фазовых превращений, характерная для данного материала.

Для проверки предложенного подхода были проведены эксперименты по исследованию периода приработки закалённых образцов из стали 45 и стали 65Г и установления связи этого процесса с кристаллической структурой материала поверхностного слоя.

Методом тонкого точения резцами из сверхтвёрдых синтетических материалов было изготовлено по 50 образцов из каждого материала ($\varnothing 40_{-0,02}$ мм; $Ra = 0,20 \dots 0,24$ мкм).

Трение проводилось с линейной скоростью 0,5 м/с, $P = 1800$ Н, смазка – масло «Индустриальное-20» в режиме одна капля в минуту, материал контртела – чугун СЧ-24.

Первая партия образцов из 5 штук каждого из двух материалов проходила испытания 1 ч, вторая – 2 ч и т. д.

На всех образцах изготавливались шлифы и на металлографическом микроскопе определялся средний размер зерна. Параллельно на профилографе-профилометре от естественных баз измерялся линейный износ трибоповерхности.

Результаты проведенных исследований представлены в виде графических зависимостей на рис. 2.

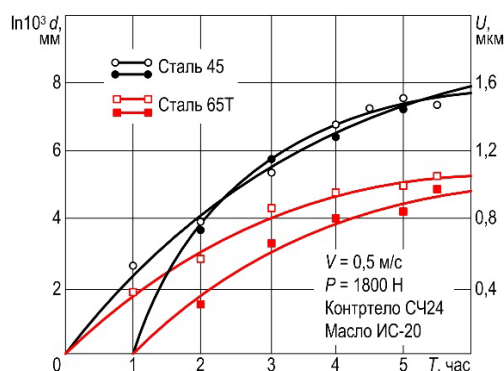


Рис. 2. Влияние времени T приработки соединения на износ U и величину зерна d

Fig. 2. The effect of the running-in time T of the joint on the wear U and the grain size d

Анализируя полученные зависимости, можно сказать, что размер зерна за период приработки увеличился от 20 до 30 раз. Это положение в определённой мере опровергает гипотезу о возможности исключения или максимального снижения периода приработки за счёт обеспечения на финишной операции обработки поверхности параметров шероховатости, близкой к «равновесной», т. е. имеющей параметры шероховатости поверхности в период нормального износа.

На основании проведенных исследований можно сделать следующее предположение: «равновесная» шероховатость трибоповерхностей формируется на «равновесной» структуре поверхностного слоя, т. е. микрорельеф стабилизируется только после стабилизации размера зерна. Действующие же температуры и давления в процессе выполнения большинства технологических операций, как правило, значительно отличаются в ту или иную сторону от эксплуатационных, что исключает возможность управления периодом приработки только за счёт обеспечения определённых параметров шероховатости.

Физический смысл формирования структурного «портрета» поверхностного слоя можно представить следующим образом: если при окончательном методе обработки силовые и температурные факторы «жестче», чем при эксплуатации, то зерно в процессе трения «растёт», если «мягче», то уменьшается.

Таким образом, можно говорить об обеспечении на технологической стадии «равновесной» структуры поверхностного слоя. На современном этапе развития технологии данное решение возможно лишь с привлечением широкой гаммы прогрессивных методов обработки, включая электро-физико-химические, ультразвуковые способы, а также обработку эластичным инструментом (ленточное и лепестковое полирование, магнитно-абразивная обработка), которые позволяют в широком диапазоне варьировать силовые и температурные параметры технологического воздействия на поверхность.

В значительной степени подтверждают предложенную теорию коэффициенты парной корреляции $K_{d,\Delta}$ между размером зерна трибоповерхности и комплексной характеристикой Крагельского-Комбалова Δ , которая

определяется по зависимости [2, 8]:

$$\Delta = R_{\max} / r b^{1/\nu}, \quad (12)$$

где $R_{\max}$ – максимальная высота профиля шероховатости; r – средний радиус вершин

профиля шероховатости; b и ν – параметры начального участка кривой опорной поверхности.

Рассчитанные коэффициенты корреляции на основе вышеописанного эксперимента приведены в табл. 1.

1. Динамика изменения параметров состояния поверхностного слоя в период приработки поверхностей трения

1. Dynamics of changes in the parameters of the surface layer condition during the running-in of the friction surfaces

Параметры состояния	Время приработки T , ч					
$R_{\max}$, мкм	<u>1,44</u>	<u>1,52</u>	<u>1,38</u>	<u>1,32</u>	<u>1,27</u>	<u>1,29</u>
	1,29	1,28	1,26	1,17	1,08	1,06
R , мкм	<u>177</u>	<u>156</u>	<u>161</u>	<u>164</u>	<u>162</u>	<u>163</u>
	98	126	132	138	132	137
b	<u>2,14</u>	<u>2,32</u>	<u>2,40</u>	<u>2,39</u>	<u>2,37</u>	<u>2,41</u>
	2,22	2,42	2,47	2,48	2,47	2,46
ν	<u>1,36</u>	<u>1,30</u>	<u>1,29</u>	<u>1,30</u>	<u>1,28</u>	<u>1,29</u>
	1,29	1,31	1,19	1,22	1,18	1,19
Δ	<u>0,0072</u>	<u>0,0023</u>	<u>0,0006</u>	<u>0,00014</u>	<u>0,00015</u>	<u>0,00019</u>
	0,0064	0,0017	0,0005	0,00012	0,00012	0,00011
d , мм	<u>0,0033</u>	<u>0,0284</u>	<u>0,092</u>	<u>0,093</u>	<u>0,092</u>	<u>0,096</u>
	0,0016	0,0196	0,029	0,028	0,030	0,031
$K_{d,\Delta}$	<u>– 0,08</u>	<u>– 0,11</u>	<u>– 0,23</u>	<u>– 0,46</u>	<u>– 0,64</u>	<u>– 0,64</u>
	– 0,12	– 0,17	– 0,21	– 0,34	– 0,42	– 0,52
<i>Примечание.</i> В числителе данные по паре трения сталь 45 закалённая – чугун СЧ24; в знаменателе – сталь 65Г закалённая – чугун СЧ24.						

Данные таблицы иллюстрируют тенденцию к резкому увеличению тесноты корреляционной связи между размером зерна поверхностного слоя и безразмерным комплексом.

Заключение

Проведенный теоретический анализ процесса формирования структурных характеристик поверхностного слоя деталей из

конструкционных материалов подтвердил необходимость учёта комплекса физических факторов, сопровождающих процессы механической обработки.

Прежде всего, требуется учитывать такие параметры, как температуру и скорость деформации материала, сопровождающие большинство методов механической обработки. Подобный подход позволяет прогнозировать такую важную характеристику субструктуры

поверхностного слоя, как размер зерна. Достаточно убедительно доказано, что уменьшение начального износа трибоповерхности в период приработки, основанное на технологическом обеспечении так называемой «равновесной» шероховатости, как правило, не приводит к положительному результату. Значительно эффективнее с практической точки зрения ориентироваться на размер зерна поверхностного слоя и пытаться обеспечить его размеры в процессе механической обработки, а «равновесная» шероховатость сформируется на структуре, работающей в стадии стабильного износа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Инженерия** поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов [и др.]; под редакцией А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. **Технологическое обеспечение** и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 447 с.
3. **Нагоркин М.Н., Федоров В.П., Суслов А.Г., Тотай А.В.** Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 37–45. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-37-45.
4. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчёта на трение и износ: монография. М.: Машиностроение, 1977. 540 с.
5. **Теория** пластических деформаций металлов: монография / Е.П. Унксов, У. Джонон, В.Л. Колмогоров [и др.]; под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
6. **Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей

машин: монография. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

7. **Бокучава, Г.В.** Температура резания при шлифовании // Вестник машиностроения. 1963. № 11. С. 62–66.

8. **Комбалов В.С.** Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей: монография. М.: Наука, 1983. 136 с.

REFERENCES

1. Engineering of parts surface / A.G. Suslov, V.F. Bezylagny, Yu.V. Panfilov [et al.]; edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 320 p.

2. Technological support and operation properties increase in parts and their units / A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 447 p.

3. Nagorkin M.N., Fedorov V.P., Suslov A.G., Totai A.V. Technological control of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through combined antifriction surfacing // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023, Nno. 12 (150). pp. 37–45. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-37-45.

4. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Fundamentals of calculations for friction and wear: monograph. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 540 p.

5. The theory of plastic deformation of metals: monograph / E.P. Unkssov, U. Jonon, V.L. Kolmogorov et al.; under the editorship of E.P. Unkssov, A.G. Ovchinnikova. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 598 p.

6. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. The surface layer and operational properties of machine parts: monograph. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 240 p.

7. Bokuchava, G.V. Cutting temperature in grinding / / Vestnik mashinostroyeniya. 1963, no. 11, pp. 62–66.

8. Kombalov V.S. Assessment of tribotechnical properties of mating surfaces: monograph. Moscow: Nauka, 1983, 136 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.08.2024; одобрена после рецензирования 06.09.2024; принята к публикации 16.09.2024.

The article was submitted 14.08.2024; approved after reviewing 06.09.2024; assepted for publication 16.09.2024.