

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-1-22-28

УДК 658.512.22

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ИСХОДЯ ИЗ СЛУЖЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ****METHOD FOR DEFINITION OF THE PARAMETERS OF SURFACE LAYER
BASED ON FUNCTIONALITY OF PARTS**

Клепцов Александр Алексеевич,
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: kaa@kuzstu.ru
Alexander A. Kleptsov, C.Sc. in Engineering, Associate Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian
Federation

Аннотация: Задача повышения надежности деталей решается в направлении получения характеристик их поверхностного слоя, обеспечивающих наивысшую возможную износостойкость. При этом не учитываются вопросы обеспечения заданной точности изделий. Допуски на показатели точности машины, установленные исходя из ее служебного назначения, делятся на допуски на изготовление машины и допуски на износ. При этом с целью повышения надежности изделий стремятся к возможно большей величине допуска на износ, увеличивая точность изготовления деталей. В результате затраты на изготовление и ремонт машины неоправданно возрастают. Зависимость скорости износа деталей от шероховатости и твердости их поверхностей носит экстремальный характер, следовательно, задача по определению параметров поверхностного слоя деталей является оптимизационной.

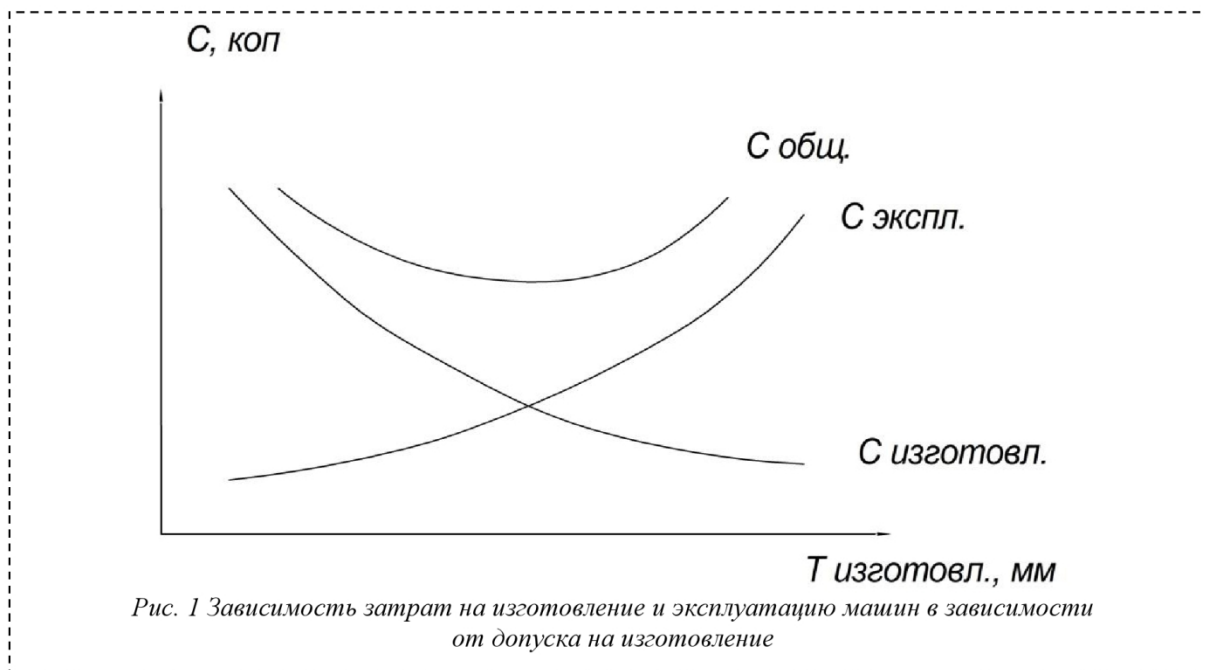
Обосновано использование скорости износа трущихся поверхностей сопряжений деталей в качестве критерия оптимизации, произведен выбор управляющих переменных. Приведена методика и алгоритм назначения параметров поверхностного слоя, обеспечивающих минимальную скорость износа сопряженных поверхностей деталей для различных условий трения. Для решения этой задачи использован метод случайного поиска. Предложен способ расчета допусков на изготовление и износ сопряженных деталей, работающих в условиях трения. Рассмотрен пример использования предложенной методики для решения реальной проектной задачи.

Ключевые слова: поверхностный слой, износостойкость, допуск, скорость износа, твердость, шероховатость, трение.

Abstract: The task of improving the reliability of parts is solved in the direction of obtaining the characteristics of their surface layer which ensure the highest possible wear resistance. It does not take into account issues of ensuring the specified accuracy of parts. Tolerances on the accuracy of the machine, set on the basis of its functionality, are divided into tolerances for the manufacture of the machine and wear tolerances. At the same time, in order to increase the reliability of products, they strive for the greatest possible tolerance for wear, increasing the accuracy of parts manufacturing. As a result, the cost of manufacturing and repairing the machine unnecessarily increases. The dependence of the rate of wear of parts on the roughness and hardness of their surfaces is extreme; therefore, the determining the parameters of the surface layer of the parts is an optimization task.

The use of the wear rate of rubbing surfaces of the interfaces of parts is justified as an optimization criterion; the selection of control variables is made. The technique and algorithm for assigning the parameters of the surface layer, providing a minimum rate of wear of the mating surfaces of parts for different friction conditions, are presented. To solve this problem, a random search method was used. The method for calculating the tolerances for the manufacture and wear of mated parts operating under friction conditions is proposed. An example of using the proposed methodology to solve a real project problem is reviewed.

Key words: w surface layer, wear resistance, tolerance, wear rate, hardness, roughness, friction.



Повышение эксплуатационной надежности машин является одной из главных проблем современного машиностроения. Как показал статистический анализ отказов машин [1, 2, 3, 4], одной из главных причин выхода из строя машин является не их поломка, а износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием сил трения. В этой связи актуальной задачей технологии машиностроения является повышение износостойкости деталей.

Установлено, что износостойкость деталей определяется физико-механическими характеристиками поверхностных слоев и их шероховатостью, поэтому задача повышения надежности деталей в большинстве случаев решается в направлении получения характеристик качества поверхностного слоя, обеспечивающих наивысшую возможную в данных условиях износостойкость.

Вместе с тем задачи повышения надежности изделий, как правило, решаются вне зависимости от задач по обеспечению заданной точности. Как известно, допуски на все показатели точности машины, установленные исходя из ее служебного назначения, делятся на допуски на изготовление машины и допуски на износ. В большинстве случаев это деление производится произвольно, на основе опытных данных, причем с целью повышения надежности изделий стремятся к возможно большей величине допуска на износ, т.е. увеличивают точность изготовления деталей. В сочетании с наибольшей возможной износостойкостью деталей это приводит к тому, что срок службы изделия может значительно превышать значение, задаваемое служебным назначением машины. В результате затраты на изготовление и эксплуатацию машины неоправданно возрастают.

Необходимо отметить, что допуски на изготовление и износ деталей должны назначаться исходя из условия равной прочности деталей, т.е. их

величины должны быть такими, чтобы сроки службы деталей были одинаковыми или кратными значению минимального срока службы (T_{min}) машины, определенному ее служебным назначением. В этом случае затраты на эксплуатацию машины могут быть значительно снижены за счет сокращения затрат на ремонты.

Таким образом, дальнейшее повышение эффективности производства требует создания методики, позволяющей назначать параметры качества поверхностного слоя и делить общие допуски на показатели качества машины, исходя из ее служебного назначения.

Известно, что с увеличением допуска на изготовление деталей затраты, связанные с изготовлением машины, снижаются (рис. 1), следовательно, часть допуска, выделяемая на износ деталей, должна иметь минимальную величину, обеспечивающую заданный срок службы детали. При этом допуск на изготовление детали будет иметь наибольшую допустимую величину. В этом случае машина будет работать в течение заданного промежутка времени без ремонта (или с заданным количеством ремонтов), следовательно, затраты при ее эксплуатации будут близки к минимальным, т.к. в большинстве случаев основную долю этих затрат составляют затраты на ремонт [1, 5].

Для обеспечения такой величины допуска на износ необходимо при изготовлении деталей получить шероховатость и физико-механические свойства их поверхностей, обеспечивающие наименьшую возможную в данных условиях скорость износа сопряжения деталей $V_{ис}$, т.е. минимальную толщину слоя материала, снимаемого с поверхностей деталей в единицу времени при трении.

Исследованиями установлено, что зависимость износа деталей от шероховатости и твердости их поверхностей носит экстремальный характер [6, 7,

8]: минимальная скорость износа деталей достигается не при крайних значениях параметров поверхностного слоя (наибольшей твердости и наименьшей шероховатости), а при некоторых их значениях, определяемых условиями трения, которые и являются оптимальными. Следовательно, задача по определению параметров шероховатости и качества поверхностного слоя деталей носит оптимизационный характер.

Как указывалось ранее, для уменьшения затрат на изготовление деталей необходимо стремиться к расширению допусков на изготовление деталей $TA_{\text{Дизн}}$, следовательно, к уменьшению допусков на их износ $TA_{\text{Дизн}}$. В этой связи в качестве критерия при нахождении оптимальных параметров качества поверхностного слоя использована средняя скорость износа сопряжения

$$V_{\text{ис}} \rightarrow \min,$$

$$\text{так как } TA_{\text{Дизн}} = V_{\text{ис}} \cdot T_{\text{мин}}.$$

Как правило, материал деталей, работающих на трение в паре, выбирается таким образом, чтобы изнашивалась одна из деталей, та, которую проще изготовить или заменить при ремонте. Поэтому с достаточной степенью приближения можно считать скорость износа сопряжения равной скорости износа детали, имеющей меньшую твердость или меньшую величину модуля упругости.

В настоящее время получено большое количество эмпирических и аналитических зависимостей, описывающих связь износостойкости деталей с параметрами их поверхностного слоя и условиями эксплуатации, обеспечивающих достаточно высокую точность результатов [6-14], но эти зависимости в большинстве носят частный характер и пригодны для отдельных видов сопряжений.

Наиболее универсальными являются зависимости скорости износа сопряжения от управляющих параметров, определяемые условиями контактирования трущихся поверхностей деталей.

Так, согласно [6], скорость износа при упругом контактировании

$$V_{\text{упр}} = V \frac{C_1 \cdot P_a^{1+\beta t_y}}{\chi} \left(\frac{E}{C_2 \cdot \sigma_o} \right)^{t_y - \beta t_y - 1} \left(\frac{k \cdot f}{C_2 \cdot \sigma_o} \right)^{t_y}, \quad (1)$$

где V – скорость относительного движения поверхностей;

$$k = 1,5 \sqrt{4(1 - \mu - \mu^2) + (1 - 2\mu)^2 / f^2};$$

E , μ , σ_o – модуль упругости, коэффициент Пуассона, величина предела текучести материала, кг/см²; P_a – номинальное давление, кг/см²; t_y – показатель кривой фрикционной усталости при упругом контактировании; f – коэффициент трения; C_1 , C_2 , χ , β – коэффициенты, зависящие от характеристик шероховатости поверхностей трущихся деталей.

При пластическом контактировании

$$V_{\text{пл}} = V \frac{1}{2(v+1)} \cdot \left[\frac{v}{2} \cdot \frac{R}{rb^{1/v}} \cdot \left(\frac{P_a}{HV_{\text{мин}}} \right)^y \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_o} \sqrt{\frac{2R}{rb^{1/v}}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_o + 2f \cdot HV_{\text{мин}}}{\sigma_o - 2f \cdot HV_{\text{мин}}}} \right]^{t_n} \right], \quad (2)$$

$$\text{где } v = v_1 + v_2; R = R_1 + R_2;$$

t_n – показатель кривой фрикционной усталости при пластическом контактировании;

$HV_{\text{мин}}$ и ε_o – твердость материала, и его относительное удлинение.

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

$$b = k_v b_1 b_2 (R_1 + R_2)^{v_1 + v_2}$$

$$\gamma = 1 + \frac{t_n + 1}{2v}.$$

При микрорезании

$$V_{\text{мкр}} = V \sqrt{v \cdot \frac{R}{rb^{1/v}}} \cdot \left(\frac{P_a}{HV_{\text{мин}}} \right)^{\frac{1}{2v} + 1} \cdot \frac{1}{2v + 1}. \quad (3)$$

Для того, чтобы определить вид контактирования, используется критерий контактных напряжений [2]

$$C_N = \frac{k f P_a^\beta E^{1-\beta}}{C_2 (1 - \mu^2)^{1-\beta} \cdot \sigma_o \chi^{1/t_y}}. \quad (4)$$

В случае, если $C_N < 1$, контактные напряжения меньше предела текучести, а расчет $V_{\text{ис}}$ ведется по формуле (2) для упругого контактирования. Если контактные напряжения превышают предел текучести ($C_N \geq 1$), необходима проверка на отсутствие микрорезания [2]

$$\sqrt{2 \frac{R}{rb^{1/v}} \left(\frac{P_a}{HV_{\text{мин}}} \right)^{1/v} \cdot \frac{1 + k f}{1 - k f}} \leq 1 - e^{-\varepsilon_o} \quad (5)$$

Если это соотношение выполняется, $V_{\text{ис}}$ рассчитывается по формуле (3) для условий пластического контактирования. В противном случае имеет место микрорезание и скорость износа определяется по формуле (4).

Анализ этих зависимостей показывает, что основными параметрами поверхностного слоя, определяющими скорость износа сопряжения, являются:

– v_1, v_2, b_1, b_2 – параметры кривых опорных поверхностей сопряженных деталей, первой и второй соответственно;

– R_{max1} и R_{max2} – максимальная высота неровностей профиля поверхностей деталей;

– r_1 и r_2 – средние радиусы скругления вершин микронеровностей;

– HV_1 и HV_2 – средние твердости поверхностей деталей.

Эти величины приняты в качестве независимых управляющих параметров при решении этой задачи.

Исходя из служебного назначения машин, служебным назначением деталей задается их форма, размеры, материалы, минимальный срок службы $T_{\text{мин}}$, средние скорости движения их поверхностей V , нагрузки, условия смазки, температурный режим работы. Зная материал детали и ее форму, можно определить спектр методов обработки этой детали и, следовательно, верхние и нижние границы варьирования управляющих переменных:

$$b_{\text{imin}} \leq b_i \leq b_{\text{imax}}; v_{\text{imin}} \leq v_i \leq v_{\text{imax}}; R_{\text{imin}} \leq R_i \leq R_{\text{imax}}; r_{\text{imin}} \leq r_i \leq r_{\text{imax}};$$

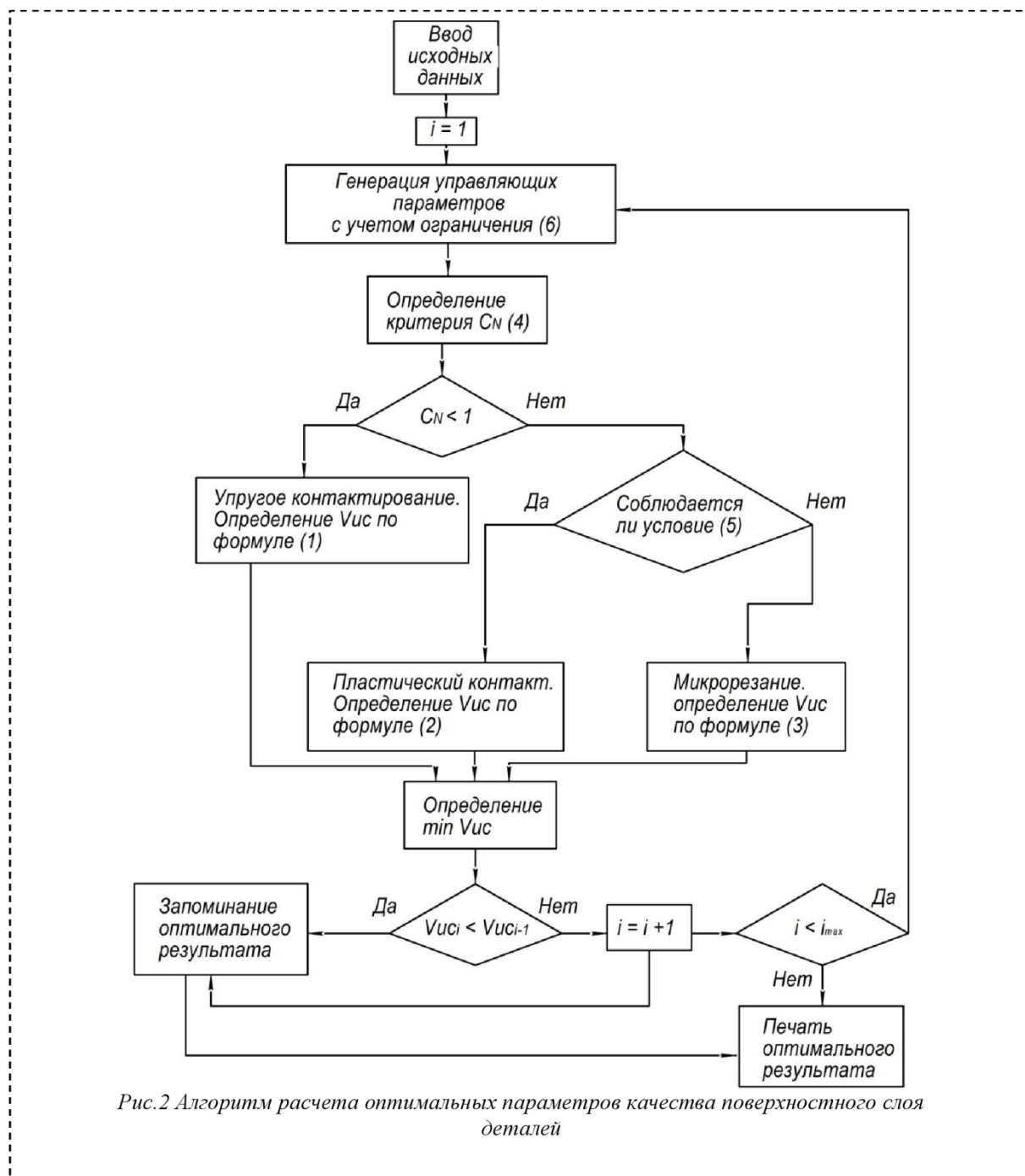


Рис.2 Алгоритм расчета оптимальных параметров качества поверхностного слоя деталей

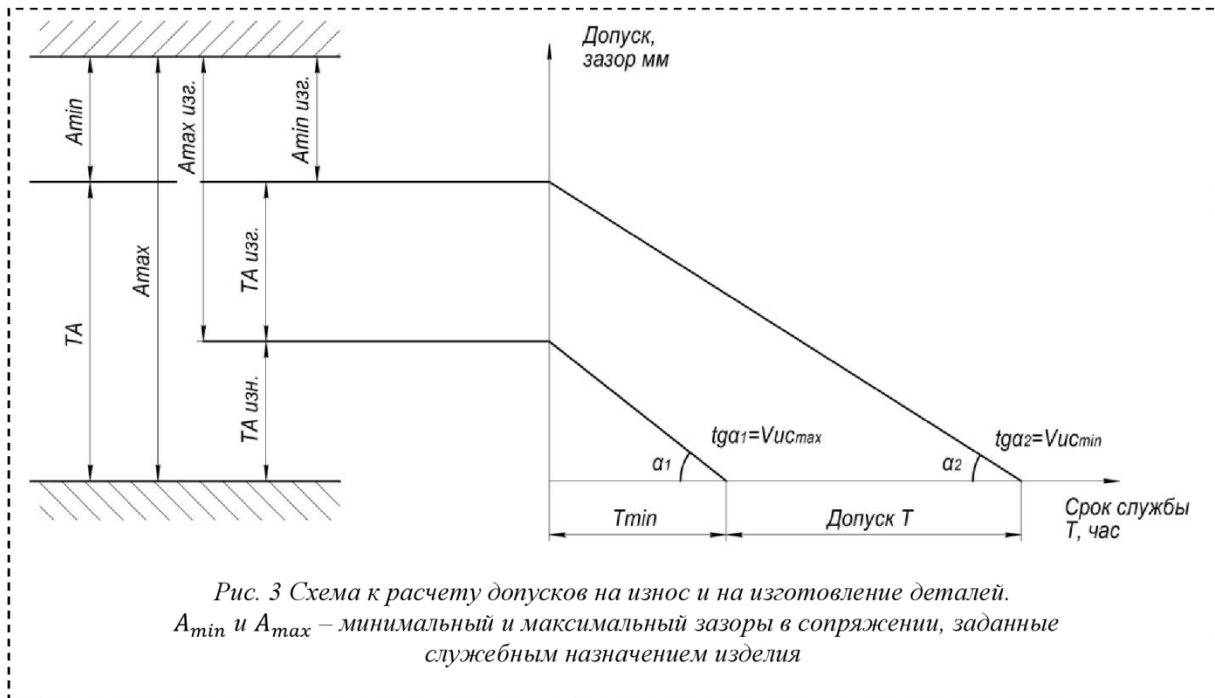
$$HV_{imin} \leq HV_i \leq HV_{imax}. \quad (6)$$

Алгоритм расчета оптимальных параметров качества поверхностного слоя деталей показан на рис. 2.

Для решения этой задачи использован метод случайного поиска. Случайные значения управляющих параметров генерируются с учетом ограничений (6). Далее рассчитывается критерий (4) и в случае $C_N < 1$ производится расчет $V_{ис}$ по формуле (1). В случае $C_N \geq 1$ проверяется условие (5). При выполнении этого условия расчет $V_{ис}$ ведется по формуле (2), при невыполнении – по формуле (3). Далее результат расчета сравнивается с предыдущим значением $V_{ис}$, и запоминается меньшее значение $V_{ис}$. В результате перебора большого

количества сочетаний управляющих параметров выбираются значения характеристик качества поверхностного слоя, обеспечивающие минимальную скорость износа сопряжения.

В процессе обработки деталей в большинстве случаев невозможно получить точно расчетные значения параметров качества поверхностного слоя. Из-за колебаний качества материала, припуска и других факторов значения твердости поверхности и средней высоты микронеровностей профиля будут колебаться в пределах некоторых полей рассеивания ω_{HV} и ω_{R_z} . Вследствие этого



величина средней скорости износа деталей в партии деталей будет также изменяться от $V_{ис\ min}$ до $V_{ис\ max}$.

Ограничивая колебания твердости и высоты микронеровностей профиля допусками T_{HV} и T_{Rz} , можно рассчитать верхний предел колебания скорости износа $V_{ис\ max}$ по одной из следующих формул:

для упругого контактирования

$$V_{упр\ max} = V \frac{(C_1 + \Delta C_1) \cdot P_a^{1+\beta_{ty}}}{\chi + \Delta \chi} \left(\frac{E}{1-\mu^2} \right)^{ty-\beta_{ty}-1} \left(\frac{k \cdot f}{(C_2 + \Delta C_2) \cdot \sigma_0} \right)^{ty}, \quad (7)$$

где ΔC_1 , $\Delta \chi$, ΔC_2 – изменение коэффициентов, зависящих от параметров кривой опорной поверхности в b и v , и от максимальной высоты микронеровностей R . При этом $R = 1,15R_z$ и $R_z = R_{z\ опт} \pm T_{Rz}/2$;

для пластического контактирования

$$V_{пл\ max} = V \frac{1}{2(v+1)} \cdot \sqrt{\frac{v}{2}} \cdot \frac{R_{опт} \pm T_{Rz}/2}{rb^{1/v}} \cdot \left(\frac{P_a}{HV - T_{HV}} \right)^y \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{2(R_{опт} \pm T_{Rz}/2)}{rb^{1/v}}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0 + 2f \cdot (HV - T_{HV})}{\sigma_0 - 2f \cdot (HV - T_{HV})}} \right]^{t_n}; \quad (8)$$

при микрорезании

$$V_{мкр\ max} = V \sqrt{v \cdot \frac{R_{опт} \pm T_{Rz}/2}{rb^{1/v}}} \cdot \left(\frac{P_a}{HV - T_{HV}} \right)^{\frac{1}{2v}+1} \cdot \frac{1}{2v+1}. \quad (9)$$

При расчете $V_{ис\ max}$ учтено колебание двух управляющих параметров из пяти – твердости T_{HV} и средней высоты микронеровностей T_{Rz} . Это объясняется тем, что при проектировании и изготовлении деталей задаются и контролируются в основном эти параметры качества поверхностного слоя. Кроме того, оставшиеся три параметра – параметры кривой опорной поверхности v и b и радиус при вершинах микронеровностей r , обеспечиваются в основном методом обработки поверхности

детали, и в настоящее время еще не найдено сколь-нибудь надежного метода управления ими. При известных $V_{ис\ min}$ и $V_{ис\ max}$ можно рассчитать значения допусков на изготовление $TA_{изг}$ и износ $TA_{изн}$.

Так, согласно рис. 3

$$TA_{изн} = V_{ис\ max} \cdot T_{min} \quad \text{и} \quad TA_{изг} = TA_{\Delta} - TA_{изн} \quad (10)$$

или

$$TA_{изг} = TA_{\Delta} - V_{ис\ max} \cdot T_{min} \quad (11)$$

При этом величина фактического срока службы сопряжения будет колебаться в пределах поля рассеивания

$$\omega_T = \frac{TA_{\Delta}}{V_{ис\ min}} - T_{min}. \quad (12)$$

Расчеты по предложенной методике требуют большого количества исходных данных, что значительно увеличивает сроки решения задачи. Для сокращения времени подготовки к расчетам был разработан так называемый входной алгоритм, позволяющий по небольшому количеству исходных данных сформировать полноценный массив исходной информации.

Ниже приведен пример нахождения оптимальных параметров качества поверхностного слоя и определения допусков на изготовление и на износ для сопряжения «гильза–поршень» гидравлического насоса. Материал поршня – сталь ХВГ закаленная, материал гильзы – бронза АЖ9-4.

При существующей технологии изготовления этих деталей фактическая шероховатость их поверхностей составляет $Rz\ 1,6-0,8$ мкм. Наибольшая величина зазора в сопряжении, допускаемая служебным назначением насоса TA , не более 0,025 мм, при этом допуск на изготовление $TA_{изг}$ составляет 0,015 мм, допуск на износ сопряжения $TA_{изн}$ равен 0,010 мм. При таких параметрах срок службы

сопряжения составляет 3500–3800 часов [15].

При определении оптимальных параметров качества поверхностного слоя деталей сопряжения по разработанному алгоритму (рис. 2) получены следующие значения:

– для гильзы $b_1 = 2,001$; $v_1 = 1,279$; $Rz_1 = 0,17$ мкм; $r_1 = 0,679$ мм; $HV_1 = 180$ кг/мм² (176,4 МПа).

– для поршня $b_2 = 0,854$; $v_2 = 1,336$; $Rz_2 = 0,94$ мкм; $r_2 = 0,385$ мкм; $HV_2 = 640$ кг/мм² (627,2 МПа).

Эти параметры качества поверхностного слоя деталей обеспечивают минимальную возможную скорость износа сопряжения

$V_{ис min} = 0,1295 \cdot 10^{-5}$ мм/час при упругом контактировании.

Задаваясь допусками на максимальную высоту микронеровностей $T_{R_1} = 0,017$ мкм и $T_{R_2} = 0,094$ мкм, и величину твердости поверхностей $T_{HV_1} = 5$ кг/мм² и $T_{HV_2} = 20$ кг/мм², по формуле (7) определяется верхнее значение скорости износа сопряжения $V_{ис max} = 0,1546 \cdot 10^{-5}$ мм/час.

Задаваясь сроком службы сопряжения $T_{min} = 4000$ час, по формуле (10) определяется допуск на износ деталей

$TA_{изн} = 4000 \times 0,1546 \times 10^{-5} = 0,0062$ мм,
и допуск на изготовление деталей

$TA_{изг} = 0,025 - 0,0062 = 0,0188$ мм.

Таким образом, за счет обеспечения при обработке деталей оптимальных параметров качества поверхностного слоя при прочих равных условиях допуск на износ сопряжения снижается в 1,3–1,4 раза и, соответственно, увеличивается допуск на их изготовление, что позволяет снизить затраты, связанные с изготовлением деталей.

В случае, когда величины допусков на изготовление и износ остаются прежними, т.е. $TA_{изн} = 0,01$ мм, $TA_{изг} = 0,015$ мм, срок службы данного сопряжения при оптимальных параметрах качества поверхностного слоя составит

$T_{min} = 0,01 / (0,1546 \times 10^{-5})$ часов.

Таким образом, при обеспечении оптимальных параметров качества поверхностного слоя и прежнем распределении допусков на показатели качества изделия, срок службы сопряжения увеличивается на 25–30%.

Опыт аналогичных расчетов с помощью разработанной на основе предложенного алгоритма программы для ЭВМ установил, что применение предложенной методики позволяет снизить затраты времени на проектирование технологических процессов обработки деталей, работающих в условиях изнашивания трением скольжения, в 3–5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубарев, Ю.М. Основы надежности машин и сложных систем. – СПб: Изд-во «Лань», 2017. – 180 с.
2. Акопов, Е.Ю. Обоснование и выбор методов повышения ресурса погружных центробежных насосов: автореф. дис. канд. техн. наук. – «Национально-исследовательский технологический университет МИ-СиС», Москва, 2017.
3. Шитов, А.М. Дерево отказов шпиндельного узла станка // Проблемы машиностроения и автоматизации. ИМАШ, 2015. – №2. – С. 71–75.
4. Безязычный, В.Ф. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей высоконагруженных изделий / В.Ф. Безязычный, Т.Д. Кожина // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – №8. С. 7–12.
5. Проников, А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
6. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
7. Friction, lubrication and wear technology // ASM Handbook. ASM International, 1998. – V. 18. 1879 p.
8. Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел / Ф. Боуден, Д. Тэйлор / под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
9. Zulfiqar A. Khan, A review of friction models in interacting joints for durability design / Zulfiqar A. Khan, Vivek Chacko, Hammad Nazir // Friction, 2017. – №5(1). P. 1–22. DOI 10.1007/540544-017-0143-0.
10. Diaconu, N. The influence of the relative sliding on the surface quality / N. Diaconu, L. Deleanu, F. Potecasu, S. Ciortan // Tribology in industry, 2011. – №33(3). – P. 110–115.
11. Польнский, Е.А. Разработка модели трибологической системы контактирования деталей пар трения / Е.А. Польнский, С.В. Сорокин // Вестник Брянского государственного технического университета, 2006. – №2(10). – С. 80–82.
12. Gavrilov, K. A numerical model for estimation of service life of tribological systems of the piston engine / K. Gavrilov, Y. Goritskiy, I. Migal, M. Izzatulloev // Tribology in industry, 2017. – №39(3). – P. 329–333. DOI 10.24874/ti.2017.39.03. 07.
13. Senhadji, S. Experimental investigation of friction coefficient and wear rate of brass and bronze under lubrication conditions / S. Senhadji, F. Belarifi, F. Robbe-Valloire // Tribology in industry, 2016. – №38(1). – P. 102–107.

14. Гаврилова, В.С. Анализ факторов, влияющих на выбор поверхностного слоя материала сопряженных деталей пар трения / В.С. Гаврилова, С.А. Воронов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2015. – №11(47). DOI 10.18698/2308-6033-2015-11-1447

15. Кузнецов, В. В. Гидромеханика и основы гидравлики (теоретический курс с примерами практических расчетов): учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки (специальностям) «Горное дело» и «Физические процессы горного или нефтегазового производства» / В. В. Кузнецов, К. А. Ананьев; ФГБОУ ВПО Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово: Издательство КузГТУ, 2013. – 266 с.

REFERENCES

1. Zubarev, Yu.M. Fundamentals of reliability of machines and complex systems. – SPb: «Lan» publishing house, 2017. – 180 p.

2. Akopov, E.Yu. Justification and selection of methods for increasing the service life of submersible centrifugal pumps: author. dis. Cand. tech. sciences. – «National Research Technological University MISiS», Moscow, 2017.

3. Shitov, A.M. Failure tree spindle node machine // Problems of engineering and automation. IMASH, 2015. – №2. – pp. 71–75.

4. Bezyazichny, V.F. Technological support of operational properties of parts of high-loaded products / V.F. Bezyazichny, T.D. Kozhina // Reference. Engineering magazine. – 2012. – №8. Pp. 7–12.

5. Pronikov, A.S. Reliability machines. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 592 p.

6. Kragelsky, I.V. Basics of calculations for friction and wear. / I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Komalov. M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 526 p.

7. Friction, lubrication and wear technology // ASM Handbook. ASM International, 1998. – V. 18. 1879 p.

8. Bowden F. Friction and lubrication of solids / F. Bowden, D. Taylor / ed. I.V. Kragelsky. – M.: Mashinostroyeniye, 1968. – 543 p.

9. Zulfiqar A. Khan, A review of friction models in interacting joints for durability design / Zulfiqar A. Khan, Vivek Chacko, Hammad Nazir // Friction, 2017. – №5(1). pp. 1–22. DOI 10.1007/540544-017-0143-0.

10. Diaconu, N. The influence of the relative sliding on the surface quality / N. Diaconu, L. Deleanu, F. Potecasu, S. Ciortan // Tribology in industry, 2011. – №33(3). – pp. 110–115.

11. Polynsky, E.A. Development of a model of a tribological system for contacting parts of friction pairs / Ye.A. Polynsky, S.V. Sorokin // Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2006. – №2 (10). – pp. 80–82.

12. Gavrilov, K. A numerical model for estimation of service life of tribological systems of the piston engine / K. Gavrilov, Y. Goritskiy, I. Migal, M. Izzatulloev // Tribology in industry, 2017. – №39(3). – pp. 329–333. DOI 10.24874/ti.2017.39.03. 07.

13. Senhadji, S. Experimental investigation of friction coefficient and wear rate of brass and bronze under lubrication conditions / S. Senhadji, F. Belarifi, F. Robbe-Valloire // Tribology in industry, 2016. – №38(1). – pp. 102–107.

14. Gavrilova, V.S. Analysis of factors influencing the choice of the surface layer of the material of conjugate parts of friction pairs / V.S. Gavrilova, S.A. Voronov // Engineering Journal: Science and Innovations, 2015. – №11 (47).

DOI 10.18698 / 2308-6033-2015-11-1447.

15. Kuznetsov, V. V. Hydromechanics and Basic Hydraulics (theoretical course with examples of practical calculations): a training manual for university students studying in the areas of training (specialties) «Mining» and «Physical Processes of Mining or Oil and Gas Production» / V.V. Kuznetsov, K.A. Ananyev; FGBOU VPO Kuzbas. State tech. un-t them. T.F. Gorbachev. – Kemerovo: Publishing house KuzGTU, 2013. – 266 p.

Поступило в редакцию 11.01.2019

Received 11 January 2019