

РАЦИОНАЛЬНАЯ ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ

Войнов Кирилл Николаевич

д.т.н., профессор
ИТМО Университет

Аннотация: в статье изложен новый подход к анализу поля шероховатостей у поверхностей трения, учитывающий в совокупности сразу несколько важных факторов, которые в основном связаны с износостойкостью пар трения. Реализация разработанных рекомендаций на практике позволяет повысить надёжность работы подвижных сопряжений, уменьшить износ, температуру в зоне контакта и обеспечивает более плавное перемещение одной детали по поверхности другой. В работе использован многофакторный подход и анализ для пар трения. По мнению автора, впервые предложен научный подход к анализу формы поверхности трения с учётом поля шероховатостей для получения его рационального изготовления.

Ключевые слова: шероховатости, анализ, рациональное изготовление, примеры, расчёты, программирование, графики.

EFFICIENT ROUGHNESS FOR THE SURFACE OF FRICTION

Voinov Kirill Nikolaevich

Abstract: a new method is expounded in this article to make the analysis for the field of roughness for the surfaces of friction taking into account simultaneously several important factors which are jointed with the firmness against the wear and tear for pairs of friction. If the recommendations in this article will be applied in practice, it increases the reliability of operation for the mobile junctions, diminishes deterioration, temperature in a zone of friction and so on. Many factors analysis are applied in here for the surface of friction. By opinion of author, it is the first time that author has just suggested the unique procedure to determine the rational form of the surface with the field of the roughness.

Key words: roughness, analyses, rational manufacture, examples, calculations, programming, diagrams.

Текст 1. Преамбула.

Общеизвестно, что существует очень большое число научных работ и исследований, связанных с анализом пятен контакта тела и контртела в виде точек, линий, локальных областей и др. В основном с позиций трения-изнашивания специалисты рассматривают изолированную неровность/выпуклость на шероховатости, но, к сожалению, не рассматривают всё поле шероховатости в совокупности. Вместе с тем именно общее поле шероховатостей будет в контакте в подвижной паре трения. И многие группы шероховатостей имеют существенные различия по геометрической форме, по размерам, внутренней структуре материала, по расположению их центров тяжести по отношению к нейтральной горизонтальной линии и т.д. Поэтому автор поставил задачу в основном учесть эти особенности в расчётах и в анализе, чтобы определить рациональные факторы, которые при изготовлении максимально увеличат износостойкость подвижных пар трения в период эксплуатации.

Текст 2. Математические перестановки и размещения.

В частности, в нашем случае, скажем имеем пять главных факторов: геометрическая форма 1) шероховатостей (скруглённые); 2) высота центра тяжести каждой изолированной шероховатости на общем поле шероховатостей; с более прочной структурой отдельных шероховатостей /например, сорбитная или лучше мартенситная; 3) острые как конус или пирамида, усечённые (со срезанной вершиной); 4) плотность структуры материала в объёме со средним уровнем химических характеристик (например, по стойкости к коррозии); 5) по лучшей физической характеристике /например, по твёрдости, пластичности, упругости и т.п.

Теперь отметим, что сочетаниями из n элементов по m есть соединения, отличающихся друг от друга лишь составляющими. Например, сочетания из трёх элементов/факторов a, b, c по два: ab, bc, ca . Чтобы вычислить число всех сочетаний из n различных элементов/факторов по m , следует использовать известную формулу:

$$C_n^m = n! / (m!(n - m)!). \quad (1)$$

Для нашего варианта положим, что $n = 20$, а $m = 5$. Знак (!) есть факториал. Тогда

$$C_{20}^5 = 20! / (5!(20 - 5)!) = 20! / (5!15!) = 2,433 \cdot 10^{18} / (120 \cdot 1,308 \cdot 10^{12}) = 1,55 \cdot 10^4.$$

Таким образом, итоговое число 15500 – очень большое для всего поля шероховатости. Однако, учитывая пять возможных групп разновидностей, определим приближённо их среднее количество в процентах, скажем, для

1) = 20 %, для 2) = 40 %; для 3) = 5 %; для 4) = 10 % и для 5) = 25 %.

Для этого результата значимыми доминантами с позиций изнашивания являются три фактора: первый, второй и пятый. Используя формулу (1), получаем, что

$$C_5^3 = 120 / (6 \cdot 2) = 10.$$

При *размещениях* элементов/факторов из n по m имеем такие соединения, которые отличаются друг от друга самими элементами/факторами или их порядком. Например, размещения из трёх элементов/факторов a, b, c по два: ab, ac, bc, ba, ca, cb . Общее число размещений из n по m находим из формулы:

$$A_5^3 = n! / (n - m)!, \quad (2)$$

что в этом случае даёт следующий результат: $A_5^3 = 120 / 2 = 60$.

Текст 3. Экспериментальные результаты и их графическая компьютерная обработка.

Чтобы определить степень влияния на износостойкость возможных изменений пяти (или большего числа) основных составляющих, необходимо проводить стендовые испытания в условиях, максимально приближенных к реальным, которые встречаются в эксплуатации.

Кроме того, более детальные проверки могут быть сделаны внутри общего названия, например, в позиции 1) для шероховатости *скруглённая*: уточнения могут быть по высоте, а именно, только вершины изолированной шероховатости, либо примерно по середине её высоты, либо максимально близко к горизонтальной линии, то есть к основанию.

В работах автора [1, с. 208; 2, с.58; 3, с. 59] весьма подробно рассмотрены математически и с помощью компьютера обработаны с получением уравнений развития износа варианты графического представления процесса изнашивания.

В данном случае новое рассмотрение сделано для различных вариантов обработки статистики по перечисленным выше пяти позициям.

Число данных было ограниченным, так как трудно искусственным образом получить требуемые образцы для испытаний (как правило, из-за экономических и технологических ограничений/возможностей).

Несмотря на это, общая предложенная процедура выбора рациональной формы, характеристик и состава материала для поля шероховатостей, имеющих минимальный темп развития износа, является правильной.

Вся математическая и графическая обработка данных была выполнена с использованием компьютерной оболочки MathCAD-15 [4, с. 544]. Итоговые программы и графики развития износа показаны на рис. 1, рис. 2 и рис. 3.

$$i := 1..6$$

$x_i :=$	$y1_i :=$	$y2_i :=$	$y3_i :=$	$y4_i :=$	$y5_i :=$	$y6_i :=$
0	0.02	0.06	0.09	0.10	0.00	0.0
20	0.05	0.10	0.14	0.20	0.02	0.31
40	0.08	0.13	0.19	0.26	0.05	0.46
60	0.09	0.15	0.24	0.34	0.07	0.81
80	0.10	0.18	0.35	0.40	0.08	1.45
100	0.12	0.19	0.44	0.49	0.09	1.79

$$\sum_i y1_i = 0.46$$

$$\sum_i y2_i = 0.81$$

$$\sum_i y3_i = 1.45$$

$$\sum_i y4_i = 1.79$$

$$\sum_i y5_i = 0.31$$

Где i – индексная переменная.

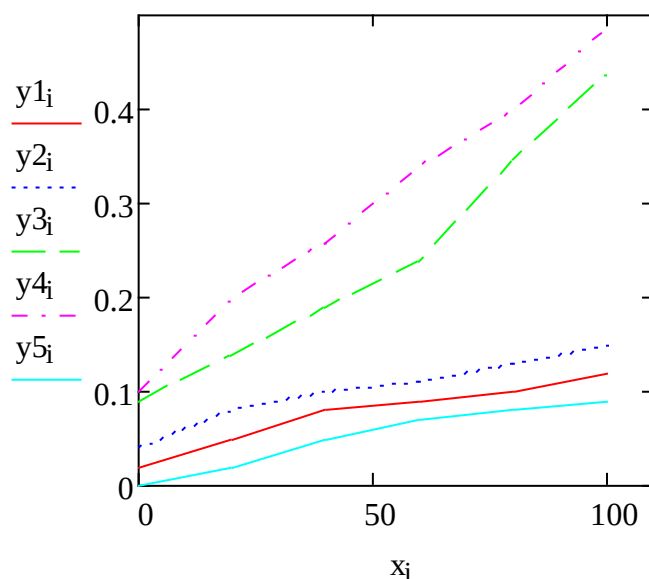


Рис. 1. Графики развития износа для пяти категорий свойств материала шероховатости

Наблюдения показывают, что только три фактора отлично подходят по уменьшению интенсивности изнашивания: $y1_i$ – скруглённые вершины шероховатостей, $y2_i$ – высоты изолированных шероховатостей с низким расположением их центров тяжести и $y5_i$ – более твёрдая/прочная структура материала. Здесь x_i – наработка по времени при испытаниях на трение (ч).

Два свойства $y3_i$ – острый конус или пирамида, включая срезанные вершины, и $y4_i$ – плотность структуры материала в объёме со средним уровнем химических характеристик совершенно не соответствуют требуемому показателю по высокой износостойкости при первоначально назначенной технологии изготовления материала, что требует существенного исходного улучшения технологии изготовления деталей/продукции.

Предположим также, что предельный допуск δ на замену изношенных в течение эксплуатации деталей в механической системе установлен равным 0,22 мм. Из графиков на Рис. 1 видно, что по этому показателю подходят только три нижние показателя, а два верхних – не подходят, так как их технический ресурс с позиций изнашивания будет слишком мал. Общий график из всех пяти объединённых случаев показан на рис. 2.

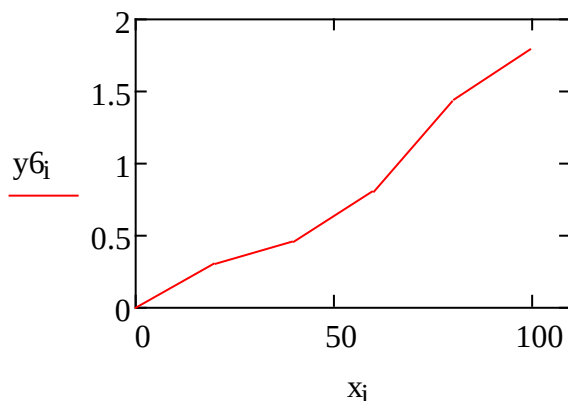


Рис. 2. Обобщённый график возможного развития износа для поля шероховатостей с учётом каждой суммы для $y_{1_i} - y_{5_i}$

Чтобы обеспечить требуемый ресурс в эксплуатации, на предприятии внедрили новые технологии. Проведя научные испытания на специальном стенде, собрав и обработав статистические данные, получили результат, который здесь показан на рис. 3 (кривые y_{3_j} и y_{4_j}). Верхняя пунктирная линия графика в точности соответствует границе предельного допуска δ , который равен 0,22 мм. Теперь данный результат будет приемлемым для предстоящей эксплуатации конкретной детали. Обозначим через $j := 1 \dots 6$ индексную переменную.

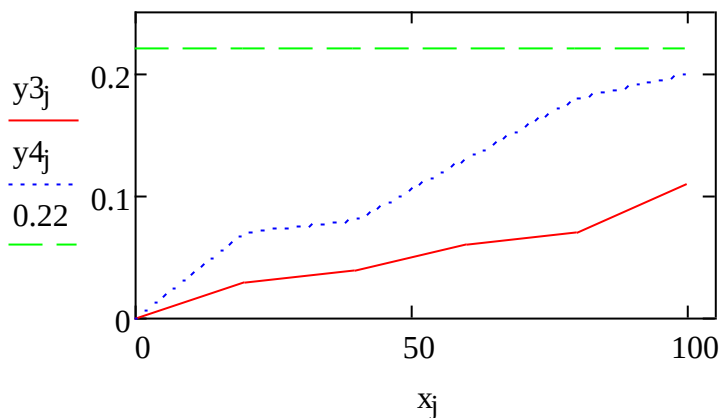


Рис. 3. Развитие износа после сглаживания острых неровностей и пропитки графитом поверхности трения из антикоррозионного смазочного покрытия, что приводит к практически равенству в процентном отношении всех пяти факторов (по 20 % для 1) - 5), то есть на 100 %)

Компьютерная программа для получения графиков на рис. 3 представлена ниже.

$x_j :=$

0
20
40
60
80
100

 $y_{3j} :=$

0
0.03
0.04
0.06
0.07
0.11

 $y_{4j} :=$

0
0.07
0.08
0.13
0.18
0.20

Выводы

Впервые изложен метод анализа поля шероховатостей. В методике прогнозирования износостойкости учтены пять основных факторов, учитывающих форму шероховатостей, расположение центров тяжести шероховатостей, особенности структуры, физические и иные свойства. Представлены алгоритмы расчёта с использованием компьютерной оболочки MathCAD-15, построены графики. Выявлены параметры, снижающие износостойкость деталей и способы увеличения их надёжности работы в пределах поля допуска на изготовление.

Список литературы

1. Войнов К.Н. Прогнозирование надёжности механических систем // ЛО «Машиностроение». – 1978. – 208 с.
2. Voinov K.N., Altyn Esbulatova, Yuehan Sun. Efficient Roughness and Reliability // Санкт-Петербург. Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений – 2022. – 58 с.
3. Voinov Kirill. Promising Estimations in the Statistical Information about the Technical Investigations // B P International. India & UK. – 2021 – 59 p.
4. Кирьянов Д. Самоучитель MathCAD. СПб. – 2001. – 544 с.

© К.Н. Войнов, 2023