

УДК 620.164.1

DOI: 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-3-7

М.П. Топорков, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
241035, РФ, г. Брянск, бульвар 50-лет Октября, 7)

E-mail: tm-bgtu@yandex.ru

Технологическое обеспечение фреттингостойкости плоских затянутых соединений

Рассмотрена проблема износа контактирующих плоских поверхностей при периодическом микроперемещении в стыке – так называемый фреттинг-процесс. Установлены особенности формирования эксплуатационной шероховатости в стыке в зависимости от нагрузки и возможность получения равновесной шероховатости методом алмазно-абразивной обработки – планетарным хонингованием.

Ключевые слова: износ поверхностей; фреттинг-процесс; эксплуатационная и равновесная шероховатость.

М.Р. Toporkov, Can. Sc. Tech.

(FSBEI HV “Bryansk State Technical University”,
7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, RF, 241035)

Technological support of fretting resistance in flat tightened joints

The problem of wear in contacting flat surfaces with the periodic micro-movement in the joint – the so-called fretting process is considered. There are defined peculiarities in the formation of operation roughness in the joint depending on loading and a possibility for obtaining equilibrium roughness through the method of diamond abrasion-planetary honing.

Keywords: surface wear; fretting process; operation and equilibrium roughness.

Долговечность работы ответственных узлов зачастую ограничивается преждевременным износом или разрушением контактирующих деталей в результате развития особого вида повреждения поверхности, возникающего на стыке при относительном колебательном движении. Такое движение может вызываться вибрациями, возвратно-поступательным перемещением, периодическим изгибом или скручиванием сопряженных деталей. Относительное перемещение поверхностей может быть очень малым доли микрометра, тем не менее оно является достаточным для возникновения повреждения.

Интенсивность разрушения контактирующих поверхностей при малых перемещениях зависит от целого ряда факторов: внешних механических воздействий, химической ак-

тивности газовой среды, природы контактирующих материалов, свойств продуктов износа и т.д.

При тангенциальных колебаниях стык может работать в двух режимах. При первом режиме амплитуда тангенциальных колебаний не превышает величины предварительного смещения (предварительное смещение – наибольшая величина тангенциального смещения в стыке, после превышения которого начинаются необратимые деформации, т.е. обычное скольжение одного тела по другому). В этом случае трение будет вязким [1].

Значительное распространение получила переналаживаемая оснастка многократного применения, которая имеет широкую универсальность, обеспечивает требуемую точность обработки, обладает рядом других преимуществ.

ществ, по сравнению со специальной оснасткой даже в условиях серийного и крупносерийного производства.

Основные детали переналаживаемой оснастки изготавливаются из конструкционной стали 12ХНЗА, подвергнутой цементацией и закалке до твердости 58...62 HRC.

Была поставлена серия опытов для экспериментального определения аналитической зависимости между основными факторами, влияющими на фреттинг-износ и величиной объема изношенного материала. В качестве независимых факторов были выбраны: A – амплитуда взаимного перемещения контактирующих поверхностей, мкм; q – номинальное давление (сила затяжки) в стыке, МПа; ω – частота вынужденных колебаний поверхностей сопряжения, Гц; N – число циклов испытания. Выходным параметром был принят объем изношенного материала V , мм³.

Применение аппарата множественного корреляционно-регрессионного анализа к результатам экспериментов позволило получить статистическую модель для количественного описания величины изношенного материала (сталь 12ХНЗА, цементированная, HRC 58...62) от величины рассматриваемых факторов в виде:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4,$$

где b_0 – свободный член; b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии.

Полученная зависимость

$$V = 10^{-3}(-12,93 + 0,49 A + 0,1q + 0,7 \cdot 10^{-4} \cdot N - 0,07 \omega)$$

является адекватной. При этом амплитуда перемещений A изменялась в диапазоне от 12,5 до 100 мкм; номинальное давление q – от 9 до 130 МПа; частота колебаний ω от 49 до 106 Гц; число циклов испытаний N от 10^5 до $6 \cdot 10^5$.

Значение коэффициента множественной детерминации показывает, что факторы, введенные в исследование, на 99,96 % объясняют изменение объема V изношенного материала. Это подтверждает высокую значимость рассматриваемых факторов на фреттинг-износ.

Ранжирование факторов по степени их влияния на величину объема изношенного материала показывает, что доминирующее влияние оказывает амплитуда взаимного перемещения контактирующих поверхностей. Отсюда следует, что величина амплитуды взаимного перемещения контактирующих поверхностей

при фреттинге определяет характер ведущего процесса разрушения поверхности.

При проведении экспериментов по изучению фреттинг-процесса регистрировалась сила трения между контактирующими поверхностями.

По величине силы трения и нормальной нагрузки стыка определялись значения коэффициента трения в зависимости от длины пути скольжения. Результаты опытов показывают, что в исследованном диапазоне длин пути скольжения коэффициент трения закаленной стали быстро возрастает в 1,3 – 2 раза и приближается к постоянной величине $f = 0,8 \dots 0,9$.

Необходимая для достижения постоянной величины коэффициента трения длина пути приработки составляет примерно 20 метров, что согласуется с имеющимися литературными данными [2].

Анализ диаграммы корреляционных связей показывает, что между высотными параметрами шероховатости, как после окончательной обработки, так и после приработки имеют место тесные положительные корреляционные связи, близкие к функциональным. Диаграмма корреляционных связей между параметрами шероховатости свидетельствует о некотором уменьшении связей между rm' и профиля Sm' . Причем на формирование равновесного микропрофиля оказывают значительное влияние такие параметры исходной шероховатости, как $Ra, Rp, Rmax$ (на все параметры, кроме rm') и Sm, v, b (на $Ra', Rp', Rmax', v', Sm'$). Другими словами, при фреттинг-процессе имеет место статистически значимое наследование корреляционных связей другими характеристиками микропрофиля после приработки и увеличение ее относительно шага между параметрами микропрофиля.

Анализируя корреляционные связи между параметрами эксплуатационного и исходного микропрофиля, можно сделать вывод о том, что, осуществляя технологическое обеспечение определенных параметров $Ra, Rp, Rmax$ исходного микропрофиля, можно в определенной степени управлять формированием параметров эксплуатационной микрогеометрии.

Для получения количественных соотношений между параметрами эксплуатационного микропрофиля и параметрами качества исходной поверхности применялся множественный регрессионный анализ.

После расчета на ЭВМ были получены уравнения регрессии в виде:

$$\Pi_i = b_0 \cdot Ra^{b_1} \cdot S_m^{b_2} \cdot \rho_m^{b_3} \cdot \Delta^{b_4} \cdot q^{b_5} \cdot A^{b_6} \cdot (N \cdot 10^{-3})^{b_7},$$

где Π_i – параметры эксплуатационного профиля.

В табл. 1 приведены соответствующие коэффициенты регрессии только для значимых факторов.

1. Расчет коэффициентов регрессии параметров эксплуатационного микропрофиля и параметров качества исходной поверхности и режимов изнашивания

| Параметры исходного профиля, режимы изнашивания | Коэффициент | Параметры эксплуатационного профиля | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------------------------------|--------|---------|--------|-------|-----------|-------|--------|-----------|
| | | Ra' | Rp' | $Rmax'$ | tm' | Sm' | ρ_m' | v' | b' | Δ' |
| | b_0 | 0,21 | 0,26 | 0,72 | 0,475 | 1,77 | 56,11 | 2,203 | 0,248 | 0,01 |
| Ra , мкм | b_1 | 0,48 | 2,11 | 2,58 | -0,06 | - | -50,4 | 1,00 | -1,16 | 0,005 |
| Sm , мкм | b_2 | - | - | - | -0,01 | 1,14 | 2,61 | -0,02 | 0,016 | - |
| ρ_m , мкм | b_3 | - | - | - | -0,001 | -0,19 | -0,37 | 0,01 | -0,004 | - |
| Δ | b_4 | - | -11,98 | - | - | - | - | - | - | 0,22 |
| q , МПа | b_5 | -0,002 | -0,003 | -0,005 | - | - | 0,50 | - | - | 0,0001 |
| A , мкм | b_6 | - | -0,002 | - | - | 0,06 | 2,93 | - | - | -0,0001 |
| $N \cdot 10^3$, циклов | b_7 | 0,0002 | - | 0,001 | - | 0,014 | 0,07 | - | - | 0,0001 |

Алмазно-абразивная обработка плоских поверхностей деталей машин – самый распространенный и эффективный метод отделочной обработки, способствующий получению качественного поверхностного слоя с малой высотой шероховатости при минимальных затратах.

Широкое внедрение в производство инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, имеющих большую стоимость, выдвигает в число важных проблему повышения стойкости (уменьшение расходов) алмазно-абразивных инструментов. Эта проблема успешно решается, в первую очередь, обоснованным выбором марки, связки и прочих характеристик инструментов из синтетических сверхтвердых материалов в зависимости от обрабатываемого материала.

Одним из недостатков шлифования плоских поверхностей является сама кинематика процесса, при которой единичное зерно врезается в обрабатываемый материал постоянно одной и той же режущей гранью, что приводит к его интенсивному износу. Предпринята попытка изменить кинематику процесса так, чтобы единичное зерно резало металл всей боковой поверхностью, оборачиваясь в процессе резания вокруг своей оси.

Для обеспечения требуемой кинематики движения разработана конструкция головки к вертикально-фрезерному станку для планетарного хонингования плоскостей, представляющая собой планетарный механизм с встроенным лобовым вариатором [3] (рис. 1).

Зерна алмазно-абразивных брусков совершают сложное движение по поверхности обрабатываемой детали: со скоростью $v_{окр}$ – вокруг оси инструментального шпинделя; $v_{пл}$ – вокруг оси головки; со скоростью $v_{пр}$ –

продольная подача стола станка.



Рис. 1. Кинематическая схема и общий вид хонинговальной головки

В качестве предварительной обработки было выбрано плоское шлифование. Это обусловлено тем, что при отделочной обработке инструментом упругого действия копируются погрешности обрабатываемой поверхности, образующиеся на предыдущих операциях технологического процесса и высокой (58...62 HRC) твердостью поверхности.

В качестве инструмента при алмазном хонинговании (по рекомендации Института сверхтвердых материалов АН УССР) приняты бруски из синтетических алмазов АСВ 100/80 и АСВ 80/63 концентрации 100 % на металло-керамической связке МСЗ [3].

В результате исследований было установлено, что на качество получаемой поверхности и производительность процесса планетарной обработки влияют такие факторы, как зернистость брусков Z , мкм; продольная подача стола S , мм/мин; число оборотов водила n_v , об/мин; давление брусков q ; передаточное отношение вариатора i , показывающее увеличение скорости инструментального шпинделя; исходный параметр шероховатости поверхности Ra , мкм.

В качестве выходных параметров были

приняты: линейный съем металла y_1 , мм; линейный износ брусков y_2 , мм; шаг неровностей на уровне средней линии Sm' , мм; высота сглаживания Rp' , мкм; наибольшая высота профиля $Rmax'$ (мкм); относительная опорная длина профиля на уровне средней линии tm' ; комплекс Крагельского Δ' ; среднеарифметическое отклонение профиля Ra' , мкм; параметры начального участка опорной линии профиля шероховатости v' и b' ; радиус округления вершин микронеровностей ρ_m' , мкм.

После расчета на ЭВМ были определены

уравнения регрессии в виде:

$$\Pi_i = b_0 \cdot Z^{b_1} \cdot S^{b_2} \cdot n^{b_3} \cdot q^{b_4} (1 + i)^{b_5} \cdot Ra^{b_6},$$

где Π_i – выходной параметр; b_j – коэффициенты чистой регрессии. Полученные значения коэффициентов чистой регрессии оценивались с помощью критерия Стьюдента, адекватность уравнений регрессии проверялась по критерию Фишера, т.е. полученные зависимости являются адекватными и достаточно точно определяют математические модели процесса (табл. 2).

2. Расчет значений коэффициентов чистой регрессии параметров эксплуатационного микропрофиля и режимов планетарной обработки

| Режимы обработки | Коэффициенты | Параметры эксплуатационного профиля | | | | | | | | | |
|------------------|--------------|-------------------------------------|-------|---------|-----------|-------|-------|------|-----------|-------|---------------------|
| | | Ra' | Rp' | $Rmax'$ | ρ_m' | Sm' | v' | b' | Δ' | y_1 | y_2 |
| | b_0 | 386 | 176,4 | 1042 | 310,8 | 2456 | 2,23 | 2,68 | 6,03 | 0,006 | $1,6 \cdot 10^{-5}$ |
| Z , мкм | b_1 | -1,5 | -1,09 | -1,33 | 0,19 | -0,7 | - | -0,1 | -0,73 | 1,14 | 3,58 |
| S , мм/мин | b_2 | -0,06 | - | - | - | - | -0,1 | 0,06 | -0,07 | 0,34 | 0,15 |
| N , об/мин | b_3 | -0,05 | - | -0,11 | -0,09 | - | - | - | - | - | -0,51 |
| q , МПа | b_4 | 0,04 | -0,04 | - | -0,08 | - | 0,03 | 0,03 | 0,11 | 0,05 | -0,20 |
| i | b_5 | -0,23 | -0,17 | -0,35 | - | -0,13 | -0,02 | 0,07 | -0,24 | - | -0,46 |
| Ra , мкм | b_6 | 0,51 | 0,2 | 0,37 | -0,26 | 0,15 | -0,07 | - | 0,76 | 1,57 | -0,74 |

Анализируя однофакторные зависимости и результаты планируемого эксперимента с учетом максимальной производительности, можно рекомендовать следующие режимы обработки для получения 8 – 9 классов шероховатости по ГОСТ 2789-73. При алмазных брусках АСВ 80/63 100 % концентрации на металлокерамической связке МСЗ: число оборотов шпинделя станка (водило) 125...200 об/мин; давление брусков на обрабатываемую поверхность $q = 0,03...0,08$ МПа; передаточное отношение вариатора $i = 0,2...0,3$; продольная подача стола станка $S = 50...100$ мм/мин.

Сложная взаимосвязь процессов, протекающих при фреттинг-износе, влияние большого числа факторов, определяющих их развитие, затрудняют разработку и выбор методов защиты контактирующих поверхностей. Дифференцирование процессов, протекающих в поверхностных слоях металлов при фреттинг-износе (схватывание, окислительные и коррозионно-усталостные процессы, абразивное разрушение [4, 5]), дает возможность наиболее рационально использовать существующие технологические мероприятия с целью предотвращения этого вида повреждения.

С целью определения эффективности различных технологических методов обработки

поверхностей как средств защиты от наиболее типичного для фреттинг-износа (коррозионно-усталостного разрушения) были проведены лабораторные испытания образцов из цементированной и закаленной стали 12ХН3А, рабочие поверхности которых подвергались различной обработке. Испытания проводились по методике, описанной выше.

В качестве предварительного метода обработки применялось шлифование электрокорундом белым (24А 25-40 СМ2К). На всех образцах создавалась шероховатость в пределах $Ra = 0,25...0,5$ мкм, близкая к равновесной. Испытания проводились в диапазоне нагрузок 1,0...7,0 МПа; амплитуда скольжения – 15...50 мкм; частота колебаний – 50 Гц. Сравнение фреттигостойкости проводилось для поверхностей, обработанных плоским шлифованием, планетарным хонингованием и прошедших химико-термическую обработку (карбонитрацию, оксидирование и фрикционное латунирование).

Таким образом, кроме шлифования и хонингования образцов проводились такие виды химико-термической обработки, в результате применения которых были исследованы различные типы поверхностных пленок: мягкая (латунирование), средней твердости (оксидирование) и твердая (карбонитрация).

Фреттингостойкость оценивалась с помощью безразмерного коэффициента износа, предложенного Арчадом:

$$K = \frac{3PV}{QX},$$

где P – инденторная твердость более мягкого материала (HV); V – объем изношенного материала; Q – нормальная нагрузка; X – полная длина пути скольжения, для случая фреттинга $X = 4 A \cdot N$, где A – амплитуда скольжения, N – число циклов (рис. 2).

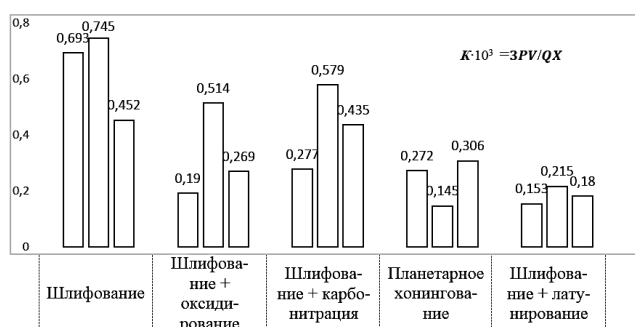


Рис. 2. Сравнение фреттингостойкости поверхностей после различных методов обработки

Сравнительный эксперимент показывает, что наибольшей фреттингостойкостью обладают латунированные поверхности, затем – обработанные только планетарным хонингованием. Наихудшая стойкость у поверхностей, обработанных шлифованием.

Таким образом, самым эффективным технологическим методом обработки поверхностей, повышающим фреттингостойкость, является латунирование плоскостей.

Но, в ряде случаев, например, для станочной оснастки, латунирование невозможно провести (из-за прерывистости поверхности). Поэтому в таких случаях наиболее приемлемо планетарное хонингование плоских поверхностей, которое по эффективности сопоставимо с процессом фрикционного латунирования.

Выводы

1. Установлено, что в процессе фреттинга износа плоских затянутых соединений, как и при других видах износа, образуется равновесная шероховатость поверхности, которая в значительной степени определяет износостойкость поверхностного слоя.

2. Экспериментально доказано, что доминирующими факторами, на 62...95 % определяющими величину объемного износа и формирование равновесной шероховатости, являются условия работы стыка и параметры исходного микропрофиля. Для расчета параметров равновесной шероховатости получены адекватные эмпирические зависимости.

3. Для технологического повышения фреттингостойкости деталей машин в 1,5 – 2 раза перспективным является нанесение пленок из мягких материалов на контактирующие поверхности.

4. Управление параметрами шероховатости поверхности в достаточно широком диапазоне ($Ra = 0,06...0,6$ мкм; $tm = 45...55$ %; $Sm = 30...150$ мкм и т.д.) при высокой производительности процесса и стойкости инструмента обеспечивается разработанным методом финишной обработки плоских поверхностей – планетарным хонингованием алмазными брусками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
2. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках / Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Суслов А.Г. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 172 с.
3. Топорков, М.П. Технологическое обеспечение фреттингостойкости плоских затянутых соединений: дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08. – Брянск, 1980.
4. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
5. Алябьев, А.Я. и др. Влияние некоторых технологических способов обработки поверхностей на их фреттингостойкость // Сборник «Проблемы трения и изнашивания». Вып. 5. Киев: «Техника», – 1974.

REFERENCES

1. Kedrov, S.S. *Oscillation of Machine-Tools*. – M.: Mechanical Engineering, 1978. – pp. 199.
2. *Solid Contact at Static and Dynamic Loadings* / Ryzhov E.V., Kolesnikov Yu.V. Suslov A.G. – Kiev: Scientific Thought, 1982. – pp. 172.
3. Toporkov, M.P. *Technological Support of Fretting Resistance in Flat Tightened Joints*: thesis for Can. Sc. Tech.: 05.02.08. – Bryansk, 1980.
4. Suslov, A.G. *Machinery Surface Layer Quality*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
5. Alyabiev, A.Ya. et al. Impact of some technological methods for processing surfaces for their fretting resistance // “Problems of Friction and Wear” *Proceedings*. Issue 5. Kiev: “Technics”, – 1974.

Рецензент д.т.н.
Александр Николаевич Прокофьев