

УДК 621.793.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ,
РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

д-р техн. наук, проф. Н.В. СПИРИДОНОВ, Н.В. ШКИНЬ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается усталостная износостойкость покрытий из различных материалов на основе никеля и железа при трении качения и трении скольжения. Исследования моделируют реальные условия эксплуатации узлов трения подвижного железнодорожного состава. Показана основная причина разрушения деталей подвижного железнодорожного транспорта (поверхность катания бандажей колес, валов, роликов и подобных им деталей), работающих в условиях циклического нагружения. Исследование контактной усталостной прочности при трении скольжения проводилось на образцах из материалов на основе железа и никеля. Полученные результаты свидетельствуют о том, что материалы на основе железа обладают большей контактной усталостной прочностью, чем материалы на основе никеля. На основании этого в качестве износостойких покрытий рекомендован материал ПР-РОМ6Ф3.

Усталостное разрушение деталей подвижного железнодорожного транспорта (поверхность катания бандажей колес, валов, роликов и подобных им деталей), работающих в условиях циклического нагружения, начинается с поверхностного слоя, от физико-механических свойств которого зависит в значительной степени предел выносливости. Образовавшиеся при механической обработке дефекты, остаточные напряжения растяжения резко снижают усталостную прочность. Эти дефекты, являясь в процессе работы детали концентраторами напряжений, образуют очаги зарождения усталостной трещины, которая, разрастаясь, приводит к излому детали. Основная причина разрушения – усталость металла.

Усталостное изнашивание материалов возникает при длительном нагружении переменными по направлению и величине усилиями. Для возникновения усталостного изнашивания достаточно переменности из двух указанных факторов.

Для различных по назначению компактных антифрикционных материалов проведено достаточно много исследований, посвященных влиянию различных факторов на их контактную усталостную прочность при трении качения и трении скольжения [1].

Значительно менее исследована проблема поведения аналогичных материалов, используемых в качестве газотермических покрытий в указанных условиях. Все возрастающее широкое применение деталей с покрытиями из порошковых материалов обуславливает необходимость изучения поведения этих материалов при контактном нагружении в условиях трения скольжения и трения качения.

Особенность процесса контактной усталости для деталей с покрытиями из порошковых материалов заключается в наличии у этих материалов значительной пористости, играющей роль концентратора напряжений и первоисточника образования трещин усталости.

В соответствии с теорией И.В. Крагельского при движении микронеровности перед ней возникает волна из деформированного материала поверхностного слоя, отдельные участки которого подвергаются сложным напряжениям растяжения и сжатия. Но поверхностные слои материала характеризуются наличием разного рода включений и повышенным содержанием в единице объема дефектов строения. Интенсивное деформирование приводит к миграции легирующих элементов в отдельные области, которые могут служить очагами полос течения, увеличению количества дислокаций и их скоплений. Взаимодействие дислокаций в очагах скопления приводит к разрыхлению поверхностных слоев и появлению микропор [1].

В этой связи особенно важным являются характеристики структуры истираемого материала, т.е. процесс усталостного изнашивания для компактных и порошковых материалов при одних и тех же условиях изнашивания будет проходить различно.

Основная часть. Для порошковых материалов наличие пор является фактором, с одной стороны, ослабляющим поверхностный слой, а с другой – поры являются аккумулятором смазочных материалов, источником возникновения пленок, облегчающих процесс трения. Если в материале образца из порошка добавляются твердые или жидкие смазки, то их присутствие может оказать существенное влияние на процесс усталостного разрушения при износе. Изменение линейных размеров деталей при их работе в условиях трения не является следствием только истирания поверхности детали индентором. Под действием нормальных нагрузок происходит деформация поверхностного слоя и внедрение в деталь индентора. Величина этой деформации оказывается в случае изнашивания пластичных материалов значительно большей, чем величина действительного износа, определяемая разрушением поверхностного слоя и уда-

лением продуктов износа. Результатом пластического деформирования поверхностного слоя является изменение параметров пятна контакта индентора с изнашиваемой поверхностью [2].

Исследования контактной усталостной прочности при трении качения проводились для материалов, химический состав которых представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав материалов, исследованных при трении скольжения и качения

Марка	Содержание элементов, %							
	Ni	Cr	C	Fe	B	Si	Mo	V
ПГ-СР4	73	16,5	0,8		3,3	3,7	–	–
ПР-РОМ6Ф3	0,4 ≤	4,2	1,1	80	–	0,3...0,4	6,2	2,6

Величина износа при трении качения и скольжения определялась по результатам измерений параметров лунки, образующейся на поверхности контакта образцов с контртелом, в частности глубины (h) и ширины (b) лунки износа.

Определение указанных параметров лунки проводилось с помощью профилографа-профилометра мод. ПП-201 до значений глубины лунки износа $h = 0,1$ мм.

Анализируя данные, полученные с профилограмм, можно констатировать следующее:

- для образцов из компактных материалов рост ширины лунки износа происходит менее интенсивно, чем для образцов из порошковых материалов;

- в обоих случаях сбоку от лунки возникают валики пластической деформации, при этом эти валики у образцов из компактного материала более покаты по сравнению с порошковыми. Это, вероятно, можно объяснить большими возможностями уплотнения за счет пористости порошковых материалов;

- в повторяющихся нагрузках пластически деформируемый материал заполняет имеющиеся поры в поверхностном слое, в то время как у компактного материала это не происходит, металл выдавливается из рабочей зоны в стороны свободных поверхностей;

- с увеличением количества циклов усталостное выкрашивание частиц материала с поверхности образцов из порошковых материалов происходит более интенсивно, чем у образцов из компактного материала;

- на поверхности лунки износа порошковых образцов фактически при числе циклов нагружения $2 \cdot 10^5$ произошло образование новой поверхности контакта и ее приспособление к условиям трения;

- на поверхности образцов из компактного материала еще остались «островки» перенаклепанного металла, т.е. образование новой поверхности контакта еще не завершилось.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что покрытие на основе никеля уступает по контактной усталостной прочности при трении качения компактному материалу. Необходимо отметить, что для покрытия на основе никеля отсутствует период нормального износа – период приработки переходит в период катастрофического износа, независимо от величины напряжения на пятне контакта. Это свидетельствует о том, что при трении качения для этого материала (независимо от технологии его получения) накопление отрицательных факторов, влияющих на процесс, продолжается непрерывно. Учитывая высокие пластические свойства никеля, а также пористость покрытий на основе никеля, можно сделать вывод о том, что при трении качения возникают значительные по величине пластические деформации на пятне контакта. Эти деформации на первом этапе взаимодействия способствуют упрочнению (наклепу) поверхностного слоя. В дальнейшем возникает явление переупрочнения, способствующее интенсификации отделения части износа и обнажению нижележащих слоев материала. Затем этот процесс повторяется.

Таким образом, для исследованных материалов на основе никеля может быть сделан вывод о том, что в результате пластического деформирования при трении качения в поверхностном слое быстро возникает наклеп, резко переходящий к мягкому основанию. Напряжение и ослабление структуры порошковых материалов под действием периодически повторяющейся силы способствуют усталостному разрушению на некоторой глубине, которое может появиться раньше, чем на поверхности.

Исследование контактной усталостной прочности при трении скольжения проводилось на образцах из материалов на основе железа и никеля.

Изучение поверхности лунок износа образцов из материала на железной основе ПР-РОМ6Ф3 под микроскопом с увеличением в 25 раз свидетельствует об отсутствии отслаивающихся частиц значительной величины. На поверхности лунок износа у образцов на основе никеля такие частицы имели место. При этом наличие этих частиц отмечалось независимо от максимального напряжения на пятне контакта. Образование указанных отслаивающихся частиц обуславливается значительными пластическими деформациями.

циями материалов на никелевой основе и, как следствие, перенаклепом рабочей поверхности, а он в свою очередь ведет к различию структуры поверхностного слоя, возникновению напряжений на их границе, развитию трещин и отслаиванию материала, т.е. к интенсификации процесса контактного усталостного изнашивания.

Из анализа профиллограмм следует, что участок сцепления поверхностей образца и контртела с максимальными удельными нагрузками пластически наиболее вдавленный. Увеличение напряжения на контакте способствует распространению деформации вглубь, захватывая вначале микровыступы, затем крайний поверхностный слой и нижележащие слои материала.

Для процесса трения скольжения характерно иное распределение нагрузки на поверхностный слой образца, чем при трении качения. При трении скольжения на частицу материала действуют не только нормальные пульсирующие нагрузки, но также и тангенциальные. В этом случае наряду с развитием усталостных трещин вглубь материала имеет место также и процесс отслаивания. В качестве причины отслаивания можно назвать значительное пластическое деформирование частиц материала в направлении действия тангенциальной нагрузки. Отдельные частицы материала, подвергаясь локальному пластическому деформированию, как бы размазываются по поверхности. Поэтому вид дна лунки образцов при трении скольжения существенно отличается от дна лунки при трении качения. Если во втором случае основным является процесс выкрашивания частиц и вскрытие пор, то в первом происходит как бы замазывание этих дефектов, а образовавшиеся лунки заполняются деформируемым металлом.

Пределы изменения интенсивности изнашивания исследованных материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Интенсивность изнашивания исследованных материалов при трении скольжения в зависимости от контактной нагрузки

Материал	Р, Н	Интенсивность изнашивания $\cdot 10^{-8}$, мкм/м	
		мин	макс
ПР-РОМ6Ф3	1000	0,9	3,1
	1300	0,95	8,5
ПГ-СР4	880	1,4	11
	1100	1,2	21

Результаты расчетов значений допустимых напряжений для различного числа циклов нагружений по обоим материалам иллюстрирует таблица 3.

Таблица 3

Допустимые напряжения для различного числа циклов нагружений

Материал	Число циклов нагружений $\cdot 10^4$									
	1	3	9	11	15	17	30	40	50	100
	Величина напряжения, МПа									
ПР-РОМ6Ф3	216	180	151	146	136	133	123	118	110	101
ПГ-СР4	149	125	108	102	95	94	87	83	80	72

Заключение. Данные, полученные в результате проведенных исследований, свидетельствуют о том, что материалы на основе железа обладают большей контактной усталостной прочностью, чем материалы на основе никеля. На основании этого в качестве износостойких покрытий можно рекомендовать материал ПР-РОМ6Ф3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский, И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Спиридонов, Н.В. Технологические основы формирования поверхностных слоев с повышенными эксплуатационными свойствами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н.В. Спиридонов. – Минск, 1989. – 48 с.

Поступила 12.01.2008