

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИТТИНГА  
НА ПОВЕРХНОСТЯХ ЗУБЬЕВ ФРЕЗЕРОВАННЫХ  
НОРМАЛИЗОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

С.М.Башеев, Л.В.Первицкий

Одним из наиболее распространенных видов разрушения зубьев закрытых передач является выкрашивание частиц металла рабочих поверхностей. Для объяснения этого явления были предложены различные теории. В настоящее время выкрашивание рассматривается как результат усталости металла под действием знакопеременных нагрузок. Теоретические и экспериментальные исследования указывают на то, что разрушение в металле должно наступать в первую очередь либо на контактирующих поверхностях зубьев, либо в зоне действия максимальных касательных напряжений, находящейся на некоторой глубине под поверхностным слоем. Поэтому механизм процесса выкрашивания описывается как процесс усталостного разрушения, начинающийся на рабочих поверхностях зубьев зубчатых колес, например, в работах Б.Д.Грозина /1/, А.В.Осипяна /2/, Г.К.Трубина /3/ и др. или как глубинное разрушение, например, в работе Р.Р.Гальпера /4/ и др.

В работах А.И.Петрусевича /5/, Д.Н.Решетова /6/ и др. процесс питтингообразования рассматривается с момента образования макроямок выкрашивания. Кинетика развития микротрещин и их виды не рассматриваются. Нами была поставлена задача исследовать возникновение и развитие микротрещин и процессы микровыкрашивания.

В качестве объектов исследования были использованы косозубые зубчатые колеса, изготовленные из стали 45 с твердостью  $H_B = 200-220$ . Механические свойства нормализованных заготовок по результатам испытаний на растяжение образцов диаметром 6 мм следующие:  $\sigma_b = 71,6 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_r = 44,7 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\delta = 18,1\%$ ,  $H_B = 200-220 \text{ кг/мм}^2$ . Испытания зубчатых колес проводились на стенде с замкнутым силовым контуром при нагрузке  $M_{кр} = 26 \text{ кгм}$  и окружной скорости  $V = 7,5 \text{ м/сек}$ . Выбранная нагрузка соответствует зоне прогрессирующего выкрашивания на кривой усталости, полученной в работе Л.М.Симоняна /7/. Смазка и охлаждение зубчатых колес производились маслом МС-20 с кинематической вязкостью при  $t = 100^\circ\text{C}$   $\nu = 20 \text{ сст}$ . Во

время стендовых испытаний температура масла не превышала  $60^{\circ}\text{C}$ . Образцы зубьев для металлографических исследований вырезались через каждые  $10^6$  циклов нагружений. В целях изучения кинетики питтингообразования вырезалась половина зуба, что позволяло вновь устанавливать исследуемое колесо на стенде и продолжать испытания. Вырезанные образцы зубьев шлифовались и полировались алмазной пастой АП-I. Окончательной операцией по доводке шлифов было электролитическое полирование на установке *Metalopol* (Венгрия). Используемый электролит имел следующий состав:

- этиловый спирт - 550 г;
- соляная кислота 35% концентрации -  $140\text{ см}^3$ ;
- глицерин -  $70\text{ см}^3$ .

Время полировки - 5 секунд, сила тока - 0,7а, напряжение - 7в. Достоинством указанного электролита является то, что он не вытравливает деформированные зерна, но вместе с тем протравливает структуру



Рис. I.  
Микротрещина.

шлифа.

На рис. I (увеличение в  $450^{\times}$ ) показана магистральная микротрещина. Острие микротрещины направлено в сторону головки зуба, форма трещины - клиновидная. С правой стороны устья трещины произошло микровыкрашивание, с левой стороны на рабочей поверхности зародились две микротрещины, сливающиеся с магистральной. Ширина магистральной трещины колеблется от 0,005 до 0,0025 мм, длина - 0,325 мм, максимальная глубина залегания под поверхность - 0,1 мм. При увеличении  $1350^{\times}$  (рис. 2) видно строение микротрещины, показанной на рис. I. Основная или магистральная микротрещина образована двумя контурными микротрещинами, между которыми замкнуты зерна феррита и перлита. Контурные микротрещины также состоят из мельчайших слоёв и, по-видимому, могут быть отнесены к категории "грубых" полос скольжения, развивающихся при пластическом дефор-



Рис. 2.

Строение микротрещины.



Рис. 3.

Контурные микротрещины.



Рис. 4.

Контурные микротрещины.

мировании в результате концентрации линий скольжения и состоящих из металла, покрытого субмикроскопическими трещинами.

На рис. 3 и 4 при увеличении  $120\times$  и  $1350\times$  показана микротрещина с размерами: ширина - 0,06 мм, длина - 0,275 мм, максимальная глубина залегания - 0,15 мм. Как и в ранее рассмотренном случае, магистральная микротрещина образована двумя сливающимися контурными микротрещинами. Металл между контурными микротрещинами в устье выкрошился. Микротрещины проходят как по границам зерен, так и через зерна. В зерне феррита сетка дислокаций образует контурную микротрещину, имеются точечные дефекты.

На рис. 5 при увеличении  $450\times$  показана характерная развитая предпиттинговая трещина с размерами: ширина устья - 0,2 мм, длина трещины - 0,3 мм, максимальная глубина залегания - 0,07 мм.

Металл между контурными трещинами выкрошился. Из острия трещины начала развиваться микротрещина, по которой произойдет скол кусочка металла. Зерна у рабочей поверхности вытянуты и наклонены под углом примерно  $30^\circ$  к поверхности, около трещины они изменяют направление ориентации и расположены почти параллельно контуру макротрещины. Форма макротрещины и ее строение позг-

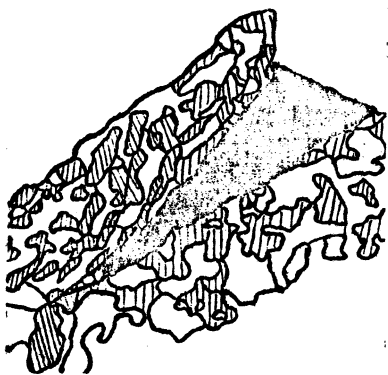


Рис. 5.

Развитая предпиттинговая трещина.

Предпиттинговых трещин, по-видимому, имеет следующую последовательность.

В результате пластической деформации, возникающей под действием касательных напряжений от сил трения и нормальных напряжений, в поверхностном слое происходит изменение формы и ориентации кристаллитов, сопровождающееся одновыми процессами, в результате которых происходит образование и концентрация линий скольжения и возникновение "грубых" полос скольжения. Вблизи полюса зацепления в зоне действия растягивающих для шестерни и сжимающих для колеса сил "грубые" полосы скольжения раскрываются и начинают разрастаться в контурные микротрещины. Под действием касательных напряжений, имеющих место под поверхностным слоем, контурные микротрещины сдвигаются, образуя магистральную макро- или микротрещину.

#### Предварительные выводы

На исследованных зубчатых колесах усталостные предпиттинговые трещины зарождались с поверхности. Установлены три стадии развития предпиттинговых трещин:

- на первой стадии две сливающиеся контурные микротрещины образуют магистральную предпиттинговую трещину; промежуток между контурными микротрещинами заполнен зернами металла;
- на второй стадии начинается постепенное разрушение зерен

- между контурными микротрещинами и образование устья;
- на третьей стадии оканчивается процесс разрушения зерен между контурными микротрещинами и начинает развиваться микротрещина, по которой произойдет скол и образование ямки выкрашивания.

### Л и т е р а т у р а

1. Г р о з и н Б.Д. Образование питтинга и пластические деформации метастабильных структур стали. Трение и износ в машинах. Труды второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, т.1, изд. АН СССР, 1947.

2. О с и п я н А.В. Исследование явления *pitting* в зубчатых колесах. "Вестник металлопромышленности", № 1, 1938.

3. Т р у б и н Г.К. Питтинги зубчатых колес, их причины и предупреждения. "Вестник металлопромышленности", № 2, 1940.

4. Г а л ь п е р Р.Р. Контактная прочность зубчатых передач с поверхностным упрочнением. Д., 1964.

5. П е т р у с е в и ч А.И. Качество поверхности и прочность материалов при контактных напряжениях. АН СССР, М., 1946.

6. Р е ш е т о в Д.Н. Детали машин. М., 1965.

7. С и м о н я н Я.М. "Вестник машиностроения", № 9, 1968.