

## О причине образования питтинга

к.ф.-м.н. Корнейчук Л.Г., К.т.н. Выскребцов В.Г.  
МГТУ «МАМИ»

Питтинг (от английского pit – ямка, рябина) – это выкрашивание рабочих поверхностей подшипников качения, зубчатых колёс и других деталей механизмов, у которых трение скольжения отсутствует. Прогрессивное выкрашивание поверхностей зубьев зубчатых колёс с эвольвентным зацеплением являлся до последнего времени наиболее частой причиной выхода этих колёс из строя.

Процесс выкрашивания твёрдых вязких материалов протекает следующим образом. Сначала на одном из зубчатых колёс появляются мелкие оспинки величиной с булавочную головку. Число этих оспинок продолжает расти при одновременном увеличении некоторых из них до тех пор, пока контактные напряжения на рабочих поверхностях не возрастут до значений пластической деформации, т.е. к обминанию поверхностей, либо к задиру, либо к интенсивному истиранию. Усиленный износ при прогрессивном выкрашивании происходит в связи с тем, что поверхности становятся неровными и смазка легко выдавливается в язвинки от выкрашивания. Вращение зубчатых колёс становится неравномерным, возникает шум и тем больше, чем выше скорость вращения. Однако обычно зубчатые колёса в состоянии работать ещё длительное время (сотни часов) после начавшегося питтинга прежде чем наступит окончательное их разрушение [1].

Причиной питтинга давно считается усталость металла рабочих поверхностей (тончайших поверхностных слоёв, 15 – 25 микрон толщиной). При отсутствии смазки выкрашивания не возникает, как считается, потому, что истирание поверхностного слоя происходит раньше, чем в нём успеют достигнуть конечной стадии процессы усталости. Усталостное выкрашивание определяет не только срок службы зубчатых колёс, но и шарикоподшипников. Так, под сроком службы подшипника понимают время (в часах) в течение которого не менее 10% испытуемых подшипников работают при заданных условиях нагружения без появления признаков усталости в виде следов выкрашивания металла на рабочих поверхностях в виде мелких точек [1].

Несмотря на практическую важность указанного развития выкрашивания поверхностей обкатываемых тел о причинах этого явления практически нет никаких данных, хотя бы в виде предположений. Далее излагается теория развития поверхностной усталости, причём в основу математической модели кладётся так называемое упругое основание Винклера, а в основу экспериментального подтверждения – некоторые результаты серии опытов 70х годов прошлого века, относящиеся к исследованиям разрушения горных пород [2].

Теоретическое решение о точечной силе  $F$ , приложенной к упругой полуплоскости приводит к выводу о монотонном увеличении прогибов  $W$  вокруг точки приложения силы:

$$W = P/(4 \pi r (\mu + \lambda)).$$

Т.е. прогиб меняется обратно пропорционально расстоянию от точки приложения – на удалении прогиб стремится к нулю, а вблизи точки приложения силы он стремится к бесконечности. Такой вывод получен в предположении однородного, изотропного тела.

Между тем опытные данные показывают, что поверхностный слой практически у всех материалов (как у металлов, так и горных пород) несколько отличается по сравнению с массивом. Толщина этого поверхностного слоя с изменёнными свойствами различна у различных материалов и меняется от 5 – 15 миллиметров у горных пород (гранит, мрамор и т.п.) до, как отмечалось, 15 – 25 микрон для подшипниковых сталей.

Если решение задачи о распределении напряжений и деформаций в пятне контакта двух упругих тел в общем случае для изотропных материалов дано Г.Герцем, то

распределение деформаций на значительном (на порядки большем диаметра пятна контакта) удалении для таких материалов до сих пор неизвестно. Для приближённого решения такой задачи рассмотрим модель упругого полупространства в виде упругого листа (или мембраны) толщиной  $h$ , лежащего на упругом основании. Пусть сила  $F$  действует перпендикулярно этому листу или пластине, а тогда упругое основание или массив материала оказывает сопротивлению  $p$  прогибу  $W$ , равное:  $p = -k W$ . Материал с такими свойствами и представляет собой так называемое винклеровское основание. Здесь коэффициент  $k$  представляет собой коэффициент упругости основания.

Для упругой пластины (или мембраны) постоянной толщины  $h$ , нагруженной переменным по площади давлением, справедливо следующее уравнение:

$$[(\Theta r) r / r] r = - Q/D.$$

Здесь:  $Q$  – перерезывающая сила в слое толщиной  $h$ , приходящаяся на единицу дуги радиуса  $r$ ,  $\Theta$  – угол поворота поверхности мембраны в точке, удалённой от места приложения силы  $F$  на расстоянии  $r$ .  $D$  – так называемая цилиндрическая жёсткость мембраны, определяющая её упругие свойства, причём эта жёсткость выражается через модуль упругости Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$  следующим образом:

$$D = (E / 12) / (1 - \mu^2).$$

При малых прогибах угол поворота поверхности мембраны практически равен тангенсу этого угла, в свою очередь равному производной:  $\Theta = dW/dr$ .

С учётом этого из предыдущих уравнений получим окончательное соотношение в виде линейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами четвёртого порядка:

$$\{[(Q r) r / r] r r / r\} r = k (Q/D).$$

Одно из решений этого неоднородного дифференциального уравнения можно найти, используя следующее дифференциальное соотношение, верное для функций  $J_0$  Бесселя нулевого порядка:

$$[(J_0(\beta r) r r) r] r = - \beta^2 r J_0(\beta r).$$

Здесь  $\beta$  – произвольная постоянная.

Если перерезывающая сила изменяется как производная от функции Бесселя:

$Q = J_0(\beta r)r$ , то, подставляя это выражение в два последних из вышеприведенных уравнений после элементарных преобразований получим:

$$\beta^4 J_0(\beta r)r = (k D) J_0(\beta r)r$$

Это означает, что функция Бесселя нулевого порядка будет решением, если постоянная  $\beta$  равна:  $\beta^4 = k / D$ .

С учётом того, что:  $p = -k W$  получим, что окончательное искомое выражение для прогибов  $W$  поверхности на удалении  $r$  от пятна контакта имеет вид:

$$W(r) = W_0 J_0(\beta r),$$

где  $W_0$  – прогиб в месте приложения силы при  $r = 0$ .

При больших значениях аргумента функция Бесселя нулевого порядка приближённо описывается косинусоидой с затухающей по закону  $1/\sqrt{r}$  амплитудой, поэтому при  $r \rightarrow \infty$  прогиб  $W \rightarrow 0$ . При малых значениях аргумента функция Бесселя нулевого порядка также приближённо описывается косинусоидой, но с переменным периодом. Относительные значения радиусов первых локальных экстремумов оказываются равны:  $r = 3,9; 10,2; 15,7$ , т.е. относятся между собой как  $10,2/3,9 = 2,61$ ;  $15,7/10,2 = 1,54$ .

Выражение для  $W(r)$  означает, что на поверхности твёрдого тела вокруг пятна контакта с индентором (дословно – с внедрителем) образуется как бы гофрирование, напоминающее собой образование волн на поверхности воды вокруг упавшей капли. Эти гофры, в отличие от волн на воде, неподвижны, если индентор неподвижен. Но если индентор скользит или катится по поверхности твёрдого тела, то и гофры движутся, вызывая знакопеременные нагрузки в поверхностном слое.

Полученный результат с одной стороны позволяет объяснить скачкообразный

характер выколов при вдавливании в поверхность хрупких тел (ровная поверхность мрамора, гранита, стекла, льда и т.д.) инденторов, вокруг которых образуются сколы со значениями радиусов выколов порядка 4 сантиметра и со средним отношением радиусов последовательных выколов около соответственно 2,2 и 2,1, что согласуется с вышеуказанными соотношениями [2].

С другой стороны этот же результат позволяет считать, что перекачивание одной поверхности по другой должно сопровождаться появлением на этих поверхностях своеобразного перемещающегося гофрирования и, соответственно, развитием знакопеременных напряжений в поверхностном слое стали. В случае зубчатого зацепления или шарикоподшипников толщина слоя мала (порядка, как отмечалось, 15 – 25 микрон), что меньше поверхностного слоя для горных пород примерно в 1000 раз. Соответственно и диаметр выколов стали, составляющих в начале развития питтинга доли миллиметра, меньше диаметра выколов в горных породах (или льда) примерно во столько же раз.

Проведённые опыты по измерению с помощью тензометров малой базы (пять миллиметров) напряжений на шлифованной поверхности стального закалённого листа вокруг вдавливаемого индентора также показали наличие немонотонной, квазипериодической затухающей составляющей поверхностных напряжений. Причём отношение между пиками локальных экстремумов напряжений оказались близки к отношениям между пиками для вышеуказанным для горных пород [2].

Таким образом имеющиеся к настоящему времени опытные данные по крайней мере не противоречат вышеизложенной математической модели развития питтинга.

В заключение можно отметить, что несмотря на то, что питтинг и истирание являются основными причинами износа зубчатых передач и подшипников качения, повышение срока службы этих элементов машин и механизмов пошло не по пути исследования особенностей явления поверхностной усталости металла, а по пути влияния на поверхностный слой специальных добавок к смазочным маслам. И несмотря на то, что понимание явления питтинга как явления усталости за последние примерно 100 лет не изменилось, срок службы зубчатых передач и шариковых подшипников многократно возрос за счёт применения синтетических и полусинтетических масел с добавками, в первую очередь микроскопических частиц (размерами около 1 микрона) дисульфида молибдена, которые оседают на поверхностях трения, заполняя микронеровности и которые образуют тонкую (толщиной 1 – 2 микрона) плёнку. Эта плёнка, оказавшись между поверхностями трения, разделяет их благодаря своей кристаллической структуре (этой структурой является слоистая решётка), многократно повышая износостойкость сопряжённых поверхностей [3].

### Литература

1. «Детали машин». Сборник материалов по расчёту и конструированию под редакцией М.А.Саверина. Машгиз, Москва, 1951, стр. 133 и 473.
2. В.В.Симонов и В.Г.Выскребцов. «Работа шарошечных долот и их совершенствование». Москва, «Недра», 1975, стр. 31 -38 и стр. 44 – 46.
3. Журнал «Популярная механика», Москва, март, №3(77), 2009, стр. 91.