

01;05.1

©1995

## ГЕНЕРАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ПРИ ВНЕШНЕМ ТРЕНИИ УПРУГИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*В.Л.Попов, А.В.Колубаев*

Известно, что в процессе трения на поверхности трения часто возникают структуры с хорошо выраженной периодичностью вдоль направления относительного движения трущихся тел. Одной из причин формирования таких структур может служить генерация волн, распространяющихся вблизи поверхности трения. В случае, если в паре трения создаются условия для генерации поверхностных волн, энергия, поступающая в систему, концентрируется в узком поверхностном слое, что способствует его разрушению. Знание условий генерации и характеристик поверхностных волн дает возможность сформулировать рекомендации для подбора материалов, их структуры и режимов трения, которые позволяют избежать нежелательной концентрации энергии.

Для пояснения основной идеи нахождения условий распространения поверхностных волн рассмотрим сначала идеализированный случай контакта двух одинаковых упругих тел без трения (с идеальным проскальзыванием поверхностей). Очевидно, что в этой системе возможно одновременное возбуждение двух волн Рэлея с одинаковой длиной волны и амплитудой (рис. 1, а). Действительно, распространяясь согласованно, эти волны вообще не будут взаимодействовать друг с другом (нормальная компонента поверхностной силы отсутствует из-за того, что "горбы" и "впадины" волн движутся совместно, а тангенциальная — из-за предположенного отсутствия сил трения на поверхности).

В качестве второго этапа рассмотрим контакт двух тел с разными упругими характеристиками (скорости распространения волн Рэлея обозначим соответственно через  $c_R^{(1)}$  и  $c_R^{(2)}$ ), движущихся относительно друг друга со скоростью  $v_0$  (рис. 1, б и в). В этом случае совместное распространение поверхностных волн возможно при выполнении очевидных условий

$$c_R^{(1)} = c_R^{(2)} + v_0 \quad (1)$$

в ситуации, изображенной на рис. 1, б, и

$$c_R^{(1)} = c_R^{(2)} - v_0 \quad (2)$$

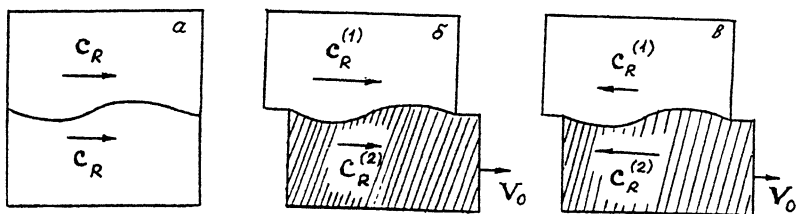


Рис. 1. К определению условий совместного распространения поверхностных волн в контактирующих (без трения) телах: а — упругие характеристики тел одинаковы и тела неподвижны; б, в — упругие характеристики различны и средняя относительная скорость движения равна  $v_0$ .

в ситуации, изображенной на рис. 1, в. Их физический смысл состоит в том, что горбы и впадины обеих волн должны двигаться согласованно, для того чтобы не “мешать” друг другу.

Рассмотрим далее контакт конечного слоя толщины  $h$ , на который нанесено покрытие толщины  $d$ , с упругим полупространством (рис. 2). В такой системе скорость поверхностных волн будет зависеть от длины волны. Напомним, что глубина затухания поверхностной волны в глубь материала имеет тот же порядок величины, что и ее длина волны [1]. Поэтому при длинах волн  $\lambda \ll d$  скорость волны будет полностью определяться упругими характеристиками покрытия (обозначим ее через  $c_d$ ), при  $d \ll \lambda \ll h$  — упругими характеристиками основного слоя ( $c_h$ ), а при  $h \ll \lambda$  она будет представлять собой уже не собственно поверхностную, а продольную волну в тонкой пластинке, скорость которой  $c_{plate}$ , в свою очередь, отличается от скорости рэлеевской волны ( $c_{plate} > c_h$ ). Характер изменения скорости волны в зависимости от длины волны определяется дисперсионной

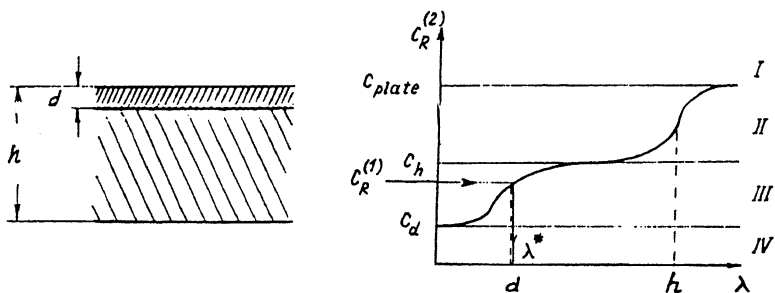


Рис. 2. Слоистая структура и схематический вид дисперсионной зависимости скорости поверхностных волн от длины волны.

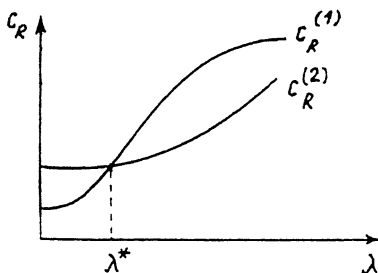


Рис. 3. Определение длины волны поверхностных волн в случае, если оба тела проявляют дисперсию скорости.

кривой, схематически изображенной на том же рис. 2. Очевидно, что если скорость рэлеевской волны  $c_R^{(1)}$  в “контртеле” попадет в области I или IV (точнее, если в этих областях лежит величина  $c_R^{(1)} \pm v_0$ ), то распространение поверхностных волн оказывается невозможным. Если  $c_R^{(1)}$  попадет в область II, то в системе возможно распространение волн с длиной порядка  $d$  (именно этот случай изображен для примера на рис. 2). Если же  $c_R^{(1)}$  попадет в область III, то длина волны допустимых поверхностных волн будет порядка  $h$ . При плавном изменении упругих характеристик контртела длина волны изменяется скачком с макроскопической величины ( $\approx h$ ) до микроскопической ( $\approx d$ ) при переходе из области II в область III.

В общем случае проявлять дисперсию скорости могут оба трущихся тела. При этом длина волны поверхностных волн, которые могут распространяться в трибосистеме, определяется точкой пересечения дисперсионных кривых обоих слоев (рис. 3).

До сих пор мы рассматривали условия распространения поверхностных волн в системе без трения. Для того чтобы понять характер влияния сил трения на условия распространения поверхностных волн, заметим, во-первых, что ввиду линейности уравнений теории упругости постоянные (средние) составляющие силы трения и давления никак не влияют на характер распространения поверхностных волн, приводя только к постоянным упругим деформациям слоев. Нормальная компонента силы взаимодействия поверхностей (сила давления) в процессе распространения волн рассматриваемой нами конфигурации не изменяется, поэтому на распространение поверхностных волн малой амплитуды оказывает влияние только скоростная зависимость силы трения.

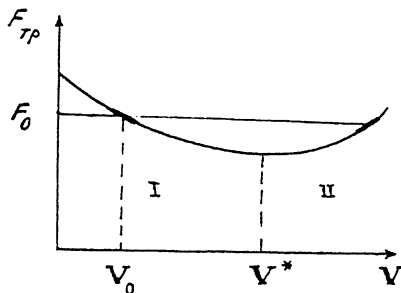


Рис. 4. Типичная скоростная зависимость силы сухого трения.

Типичная скоростная зависимость силы сухого трения приведена на рис. 4. Если дифференциальная скоростная зависимость силы трения положительна (область II на рис. 4), то появление силы трения эквивалентно введению положительной вязкой силы трения, что, очевидно, будет приводить к затуханию волн. В случае же отрицательной дифференциальной зависимости силы трения (область I на рис. 4) в систему вводится отрицательная вязкость, что приведет к экспоненциальному нарастанию амплитуды волны со временем. Амплитуда установившейся волны должна определяться из решения полной нелинейной задачи. Ее порядок величины, однако, может быть оценен из следующих элементарных соображений. Нарастание амплитуды волны может происходить только до того момента, пока амплитуда колебания относительной скорости  $v$  точек трущихся тел не превышает  $v_0$ . При превышении этой величины сила трения скачком меняет знак при  $v - v_0 = 0$  и система становится резко диссипативной. Если обозначить амплитуду и частоту волны соответственно как  $U$  и  $\omega$ , то амплитуда колебаний скорости будет иметь порядок  $\omega U$ . Установившаяся амплитуда определяется, согласно сказанному выше, условием  $\omega U \approx v_0$ , т. е.

$$U = v_0 / \omega. \quad (3)$$

При этом характерная величина упругой деформации будет  $\epsilon \approx \partial U / \partial x \approx kU$ , где  $k$  — волновой вектор. Наконец, для упругих напряжений получаем оценку

$$\sigma \approx \mu \epsilon \approx \mu k U \approx \mu k v_0 / \omega \approx \mu v_0 / c_R. \quad (4)$$

Здесь  $\mu$  — модуль сдвига.

Таким образом, общее правило для избежания концентрации энергии в поверхностном слое при трении состоит в том, что необходимо выбирать упругие и структурные характеристики “образца” и “контртела” таким образом, чтобы их дисперсионные кривые “скорость — длина волны” не

пересекались. Вторым способом подавления поверхностных волн является создание эффективного затухания волны. Для этого целесообразно создавать неоднородные по толщине поверхностные слои с характерным размером неоднородности порядка толщины слоя. В случае однородного слоя поверхностная волна распространяется вдоль свободной поверхности практически без затухания, а при наличии трения будет генерироваться волна с длиной волны порядка  $d$ . В случае же неоднородного слоя поверхностная волна при длинах волн  $\lambda \approx d$  испытывает не только сильную дисперсию, но и интенсивное затухание, что препятствует развитию неустойчивости.

В заключение отметим, что изложенные соображения могут быть почти без изменений перенесены и на другие среды со структурой (не слоистые), например поликристаллические, многофазные или композитные. Отличие этих систем состоит в том, что в них наряду с дисперсией большую роль играет также затухание волн. Анализ условий генерации поверхностных волн в этих системах будет посвящена отдельная статья.

#### Список литературы

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.

Институт физики прочности  
и материаловедения СО РАН  
Томск

Поступило в Редакцию  
3 июля 1995 г.

