

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

---

УДК 658.56:621.824

*Н. Е. Артёмова*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Приводятся результаты исследований разрушения поверхностных слоев деталей резьбовых соединений в условиях вибрационного нагружения. Дается теоретическое объяснение природы зарождения микротрещины, ее поведения до момента раскрытия. Установлена зависимость «подрастания» клиновидной полости от параметров дислокации, диффузионной подвижности примесной атмосферы, параметров вибрационного нагружения и материала. Приведены результаты экспериментальных исследований развития дефектов в структуре материала.

Анализ эксплуатации деталей машин показывает, что они выходят из строя по причинам, связанным с функционированием и несовершенством их поверхностных слоев [1–3]. Это относится и к широко применяемым в различных областях техники резьбовым соединениям (РС), которые составляют 15–20% от общего количества соединений в конструкциях современных машин [4].

Существующие требования к резьбовым соединениям регламентируют материал, технологию изготовления и нагрузку в статических условиях и не учитывают изменения, происходящие в материале РС в процессе повторно-переменных нагрузок. Вместе с тем в процессе воздействия интенсивных вибрационных нагрузок вследствие специфики работы РС колебания, возбуждаемые в материале РС, сопровождаются знакопеременными напряжениями, которые могут вызвать движение линейных дефектов кристаллической структуры и образование их скоплений у препятствия в виде комплекса примесей. Это может привести к образованию микротрещин (МТ) в поверхностном слое с последующим разрушением материала. Процесс разрушения контактирующих поверхностей в большинстве случаев протекает по усталостному механизму, вызванному упругими, упругопластическими и пластическими деформациями, которые сопровождаются процессами генерирования и аннигиляции дефектов, накопления сдвиговой энергии, образования и разрушения адгезионных связей и др. [5].

В процессе формообразования резьбы и при эксплуатационном многоцикловом нагружении происходит непрерывное накопление пластических деформаций, что приводит к исчерпыванию запаса пластичности металла в поверхностном слое и возникновению несплошностей в виде трещин.

Усталостное разрушение резьбовых соединений, часто встречающееся на практике, – результат действия многоцикловых переменных нагрузок. Амплитуда переменной нагрузки, приводящей к разрушению, оказывается в 10–20 раз меньшей, чем при статическом разрушении. В результате исследо-

вания разрушенных болтов и шпилек установлена характерная черта усталостной поломки – почти полное отсутствие деформаций в зоне разрушения, даже болтов из высокопластичных (при статическом разрушении) сталей [6]. В начале разрушения трещины обычно настолько малы, что их трудно обнаружить. При достижении трещиной макроскопических размеров наблюдается ее интенсивный рост, приводящий к полному разрушению резьбового соединения за малый промежуток времени.

Известно, что процесс образования микротрещин в твердом теле сопровождается акустической эмиссией (АЭ) [7]. Значение АЭ весьма велико для фундаментальных исследований, поскольку ее спектр может дать ценную информацию о динамике дислокаций и микротрещин, а также кинетике разрушения материалов [8].

Общий метод анализа АЭ микротрещин (МТ) произвольного вида в ограниченных упругих телах основан на принципе Гюйгенса и позволяет определить закон движения берегов МТ под воздействием приложенных внешних напряжений и спектральную плотность АЭ [7]. Однако рассмотренные в [7] режимы развития микротрещин не содержат конкретных физических механизмов, объясняющих их появление.

Между тем природа зарождения МТ и ее поведение до момента раскрытия основывается на представлениях о процессах дислокационной ползучести в поле знакопеременных напряжений (модель Стро) [9–11]. Эти напряжения стимулируют процессы диффузии атомов примесей, декорирующих дислокации. При этом диффузионное расплывание зон Коттрелла приводит к увеличению эффективной длины дислокационного сегмента с последующим освобождением дислокации от примесной атмосферы. При некотором критическом напряжении  $\sigma_0$  дислокация может покинуть атмосферу с последующим совместным дрейфом в поле знакопеременных деформаций. Вблизи препятствия в виде комплекса примесей часть дислокаций сливается и образуется клиновидная полость с размером  $L = n^2 b$  (где  $n$  – число дислокаций,  $b$  – величина вектора Бюргерса). Раскрытие полости сопровождается АЭ. Эта полость является источником «скрытого зарождения» МТ и ее эффективный размер  $L$  определяется как [9, 10]

$$L = b \dot{\epsilon}_{k0}^2 \tau_2^2 \left( 1 + \frac{\eta \omega_f Q^{-1} \sigma_0}{2\pi \beta N_d E D_0} \right), \quad (1)$$

где  $\dot{\epsilon}_{k0} = 8bN_d D_0 / (2r_0)$  – скорость дислокационной ползучести в отсутствие вибрационного нагружения;  $2r_0$  – диаметр дислокационной трубки с облаком Коттрелла;  $\omega_f$  – частота вибрационного нагружения;  $\eta \approx 10^{-4}$ ;  $Q^{-1}$  – коэффициент внутреннего трения;  $\beta \leq 1$ ;  $\sigma_0$  – амплитуда механического напряжения;  $E$  – модуль Юнга;  $N_d$  – плотность дислокаций;  $D_0$  – коэффициент диффузии примесей в отсутствие вибрационного воздействия;  $\tau_2$  – характерное время до начала развития МТ:

$$\tau_2 = \tau_0 \exp \left\{ 8\pi \epsilon \epsilon_0 + \left[ \pi \beta \tau_0 / (2b\eta \omega_f C_m \Delta T \sigma_0) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\tau_0$  – период циклического нагружения;  $\varepsilon_0 = 4r_0^2 / l_{c0}^2$ ;  $l_{c0}$  – эффективная длина дислокационного сегмента в отсутствие вибрационного нагружения;  $\varepsilon = \rho l^2 / l_d^2$ ;  $l$  – длина дислокационной петли;  $l_d$  – длина диффузии закрепляющей примеси;  $C_m$  – параметр теории, определяемый из эксперимента для внутреннего трения материала;  $\Delta T$  – изменение температуры материала в процессе вибрационного нагружения.

Как видно из формулы (1), величина «подрастания» клиновидной полости  $L$  определяется параметрами дислокации ( $2r_0, l, l_{c0}$ ), диффузионной подвижностью примесной атмосферы ( $D_0, l_d$ ), параметрами вибрационного нагружения ( $\sigma_0, \omega_f$ ) и параметрами данного материала ( $N_d, E, Q^{-1}$ ). Значение величины  $L$  при числе Пуассона  $\nu_x = 0,3$ , плотности материала  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ , модуле сдвига  $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ,  $b = 10^{-10} \text{ м}$ ,  $\sigma_0 = 10^5 \text{ Н/м}^2$ ,  $2r_0 = 0,1 \text{ мкм}$ ,  $N_d = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $l = 1 \text{ мкм}$ ,  $D_0 = 3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\omega_f = 88 \text{ с}^{-1}$ ,  $T = 400 \text{ К}$  составляет  $\sim 0,75 \text{ мм}$ .

В рамках модели «мгновенно распространяющейся МТ» получена аналитическая формула для ширины главного лепестка  $\Delta\Theta_{l(t)}$  диаграммы направленности акустического излучения продольных ( $l$ ) и поперечных ( $t$ ) волн [10]:

$$\Delta\Theta_{l(t)} = 2 \arcsin \left[ 2C_{l(t)} / (\pi\omega_s) \right], \quad (3)$$

где  $C_{l(t)}$  – продольная (поперечная) составляющая скорости звука в данном материале.

Значение величины  $\Delta\Theta_l$  при  $L = 0,75 \text{ мм}$  и  $\omega_s = 3 \text{ МГц}$  (где  $\omega_s$  – частота излучаемой акустической волны) составляет  $\Delta\Theta_l \approx 116^\circ$ . Для оценки плотности энергии  $W$  излучаемой акустической волны получена следующая приближенная формула [9, 10]:

$$W \approx \frac{\sigma_0^2 \omega_s^4}{64\pi^6 \rho c_l^6} b^4 \dot{\varepsilon}_{k0}^8 \tau_2^8 \left( 1 + \frac{\eta \omega_f Q^{-1} \sigma_0}{2\pi\beta N_d E D_0} \right). \quad (4)$$

Величина  $W$  при тех же значениях параметров, входящих в (4), как и в случае оценки  $L$  и  $\Delta\Theta_l$ , составляет порядка  $72 \text{ Дж/м}^3$ , а интенсивность излучения около  $0,04 \text{ Вт/см}^2$ .

Спектральная плотность и направленность акустического излучения полностью определяются конкретными механизмами зарождения МТ, что позволяет использовать метод АЭ для исследования дефектной структуры материала. Основным достоинством этого метода является то, что АЭ сопровождается только развивающиеся, т.е. наиболее опасные дефекты кристаллической структуры. Источником звука в этом случае являются сами дефекты, благодаря чему задача их обнаружения и локализации значительно облегчается [12].

В настоящее время не существует теории, связывающей статистические характеристики излучаемого акустического поля с параметрами деформирования для различных материалов, хотя закономерности элементарных актов излучения, сопровождающего различные виды движения отдельных дислокаций и их скоплений, достаточно хорошо изучены [12].

Для эффективного использования метода АЭ необходимо иметь зависимости между показателями напряженно-деформированного состояния материала, характеристиками дефектов кристаллической структуры и параметрами излучаемых ими упругих волн. С этой целью создана акустическая установка и разработана методика проведения экспериментальных исследований зависимости числа импульсов АЭ, возникающих в исследуемых металлических образцах в режиме одноосной деформации – продольного растяжения, от величины деформирующей силы [13].

В качестве исследуемых образцов использовались металлические стержни с резьбой на обоих концах (типа шпилек) трех типоразмеров: М6, М10, М12. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что с увеличением механической нагрузки на испытуемый образец число импульсов  $N$  акустической эмиссии, соответствующее текущему значению механической нагрузки  $F$ , при котором наблюдается генерация импульсов АЭ, в области упругих деформаций в пределах статистического распределения случайной величины практически не изменяется и среднее значение составляет  $\bar{N} \approx 2400$  импульсов (рис. 1). С увеличением механической нагрузки в области упругих деформаций ( $F = 2,5 \dots 4,5$  кН) зависимость числа импульсов АЭ от приложенного механического напряжения носит явно нелинейный характер, имеющий вид асимметричного контура с явно выраженным максимумом. Положение этого максимума соответствует граничной области упругих деформаций. Интенсивная генерация сигналов АЭ свидетельствует о выходе дислокаций и МТ на поверхность исследуемого образца. Зависимость плотности потока сигналов АЭ от остаточной деформации может быть описана произведением плотности распределения источников сигнала АЭ по остаточной деформации на скорость остаточного деформирования [14]. В общем виде это распределение является распределением Вейбулла. При дальнейшем увеличении нагрузки ( $F > 6$  кН) число импульсов АЭ монотонно спадает и практически остается неизменным в области пластической деформации ( $F > 10$  кН). На этой стадии зависимость источников АЭ (т.е. дефектов) от остаточной деформации достаточно хорошо может быть описана обратно-экспоненциальной зависимостью, которую можно рассматривать как частный случай распределения Вейбулла. Такой характер АЭ указывает на процесс массового коллективного движения дислокаций, в результате чего происходит уменьшение числа импульсов. Среднее значение числа импульсов, соответствующее текущему значению механической нагрузки, в этой области составляет  $\bar{N} = 1550$  импульсов. Дальнейшее развитие пластической деформации заканчивается образованием шейки и разрывом образца (при  $F > 11$  кН).

Из изложенного следует, что, используя метод АЭ, можно уже на стадии упругой деформации регистрировать наличие и развитие дефектов в структуре цилиндрической резьбовой детали при относительно небольших напряжениях. Появление зоны пластической деформации на диаграмме обу-

словлено началом интенсивного движения дислокаций и образованием микротрещин.

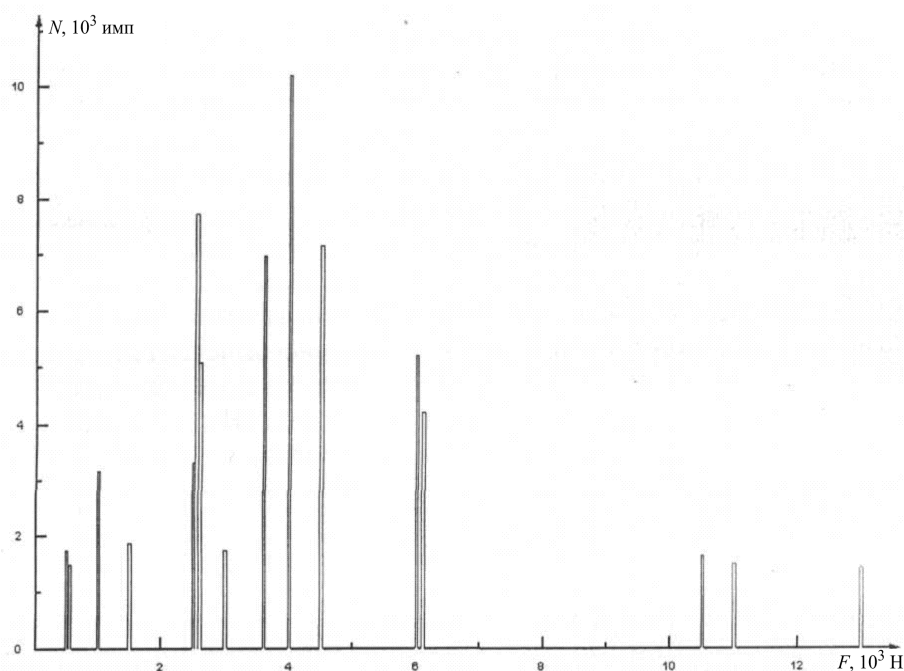


Рис. 1

Проведенные исследования, устанавливающие зависимость акустического излучения от напряженно-деформированного состояния материала, позволяющую определять образование и развитие очага разрушения, в сочетании с конкретным механизмом зарождения МТ делают возможным разработку технологии получения резьбовых деталей, обеспечивающей требуемое качество поверхностного слоя.

#### Список литературы

1. **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. — М. : Машиностроение, 1987. — 118 с.
2. **Суслов, А. Г.** Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при эксплуатации / А. Г. Суслов, С. О. Сухарев, Д. И. Петрешин // Справочник. Инженерный журнал. — 1999. — № 5. — С. 19–23.
3. **Мусохранов, М. В.** Поверхностная энергия как показатель качества поверхностного слоя / М. В. Мусохранов // Справочник. Инженерный журнал. — 2005. — № 12. — С. 62–64.
4. **Гельфанд, М. П.** Сборка резьбовых соединений / М. П. Гельфанд, Я. И. Ципенюк, О. К. Кузнецов. — М. : Машиностроение, 1978. — 109 с.
5. **Берсудский, А. Л.** Влияние напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя на износостойкость поверхностей деталей / А. Л. Берсудский // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2006. — № 6. — С. 52–59.
6. **Биргер, И. А.** Резьбовые соединения / И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. — М. : Машиностроение, 1973. — 256 с.
7. **Крылов, В. В.** Об излучении звука развивающимися трещинами / В. В. Крылов // Акустический журнал. — 1983. — Т. XXXIX. — № 6. — С. 790–798.

8. **Красильников, В. А.** Введение в физическую акустику / В. А. Красильников, А. В. Крылов. – М. : Наука, 1984. – 400 с.
9. **Артёмов, И. И.** Акустическая эмиссия в условиях «скрытого» подрастания микротрещин / И. И. Артёмов, В. Д. Кревчик // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 4. – С. 92–95.
10. **Кревчик, В. Д.** Модель вибростимулированной акустической эмиссии микротрещин дислокационной природы / В. Д. Кревчик, Н. Е. Артёмова // Новые промышленные технологии. – 2005. – № 2. – С. 58–61.
11. **Криштал, М. А.** Ползучесть и разрушение сплавов / М. А. Криштал, И. Л. Миркин. – М. : Металлургия, 1966. – 169 с.
12. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в атомной энергетике / под ред. К. Б. Вакара. – М. : Атомиздат, 1980. – 216 с.
13. **Рудин, А. В.** Акустическая эмиссия при деформации и разрушении металлов / А. В. Рудин, Н. Е. Артёмова // Нива Поволжья. – Пенза, 2007. – С. 31–34.
14. **Корчевский, В. В.** Изменение кристаллической структуры при пластической деформации отожженной стали 30ХГСНА / В. В. Корчевский // Материаловедение. – 2005. – № 3. – С. 34–37.