

## РАЗВИТИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СИСТЕМ ТРЕЩИН ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

*А.О. Чернявский*

Показано, что сетки поверхностных трещин в деталях могут образовываться и устойчиво развиваться не только при тепловом, но и при механическом нагружении. При этом поведение трещин при тепловом и механическом воздействиях качественно различно: при тепловом вначале образуется сетка мелких и частых трещин, по мере роста часть их останавливается, что приводит к образованию сетки более редких и более глубоких трещин; при механическом нагружении (подвижной нагрузкой) вначале образуются редкие трещины, и лишь после достижения ими определенной глубины образуются промежуточные трещины, причем взаимодействие между трещинами приводит к увеличению коэффициентов интенсивности напряжений. Процесс проиллюстрирован численными расчетами кинетики трещин.

Интенсивные поверхностные воздействия на элементы конструкций нередко приводят к образованию поверхностных трещин – одиночных или целых систем. Образование систем трещин чаще наблюдается при дилатационном нагружении (объемном расширении или усадке материала конструкции вследствие нагрева, облучения, диффузии вещества из внешней среды или в нее) [1]. В этих случаях появление одиночной трещины может не приводить к разгрузке (снижению напряжений) в областях, удаленных от трещины; образующиеся новые трещины могут взаимодействовать друг с другом, что сказывается на скорости и направлении их роста. Такое разрушение характерно для ряда конструкций металлургического, химического, энергетического оборудования. При механическом нагружении образование систем трещин встречается реже, поскольку, в отличие от дилатационного нагружения, появление трещины не вызывает снижения номинальных напряжений и с учетом того, что зародившаяся трещина является мощным концентратором напряжений, естественно ожидать, что только эта трещина и будет развиваться. Однако и при механической нагрузке в ряде случаев встречается разрушение с образованием сеток трещин:

- при наличии конструктивных концентраторов напряжений типа отверстий или пазов возможна ситуация, когда зародившаяся в зоне концентрации трещина, развиваясь, попадет в зону с меньшими напряжениями – меньшими настолько, что более выгодным с энергетической точки зрения окажется зарождение новых трещин. Пример такого разрушения приведен на рис. 1а;
- перераспределение напряжений вследствие ползучести или пластичности материала может также способствовать торможению существующих трещин (и зарождению новых) – см., например, рис. 1б;
- подвижные нагрузки (например, в парах качения) приводят к появлению множественных трещин (рис. 1в);
- наконец, фактором, способствующим появлению систем трещин, может являться агрессивная внешняя среда, примером могут служить сетки трещин коррозионного растрескивания под напряжением в трубопроводах (рис. 1г.)

Анализ распространения трещин предусматривает решение нескольких задач, являющихся, по существу, задачами устойчивости: устойчивости неподвижного состояния трещины (отсутствие ее подрастания при заданных нагрузках), устойчивости прямолинейного распространения трещины (отсутствия поворотов, способных привести к отделению фрагментов от тела – выкрашиванию; отсутствия ветвления), устойчивости сеток трещин (возможность развития периодической системы трещин с сохранением периодичности или вырождение этой системы с образованием одной магистральной трещины). Некоторые аспекты этих задач рассмотрены в данной работе с помощью математического моделирования в рамках механики сплошной среды.

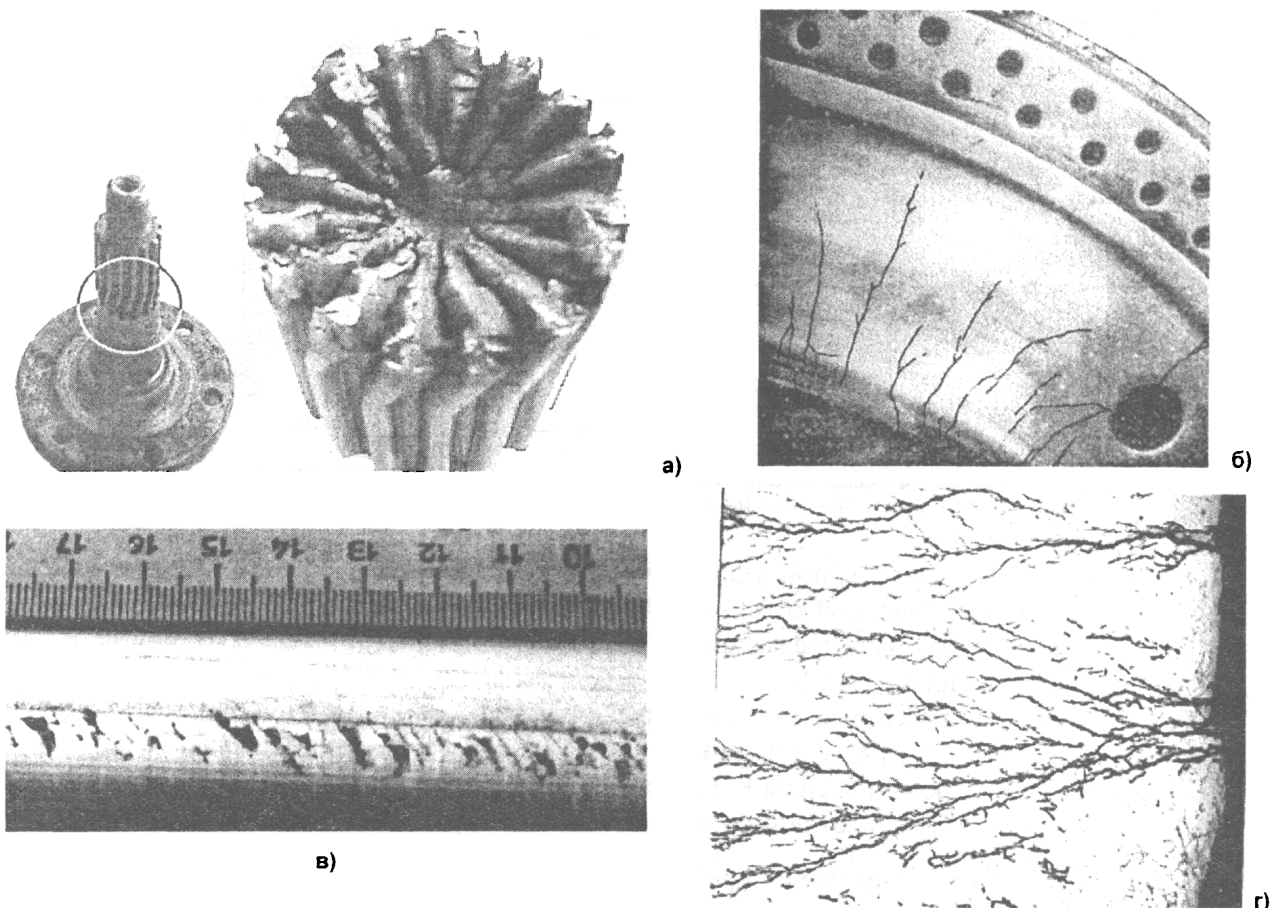


Рис. 1. Развитие систем трещин при механическом нагружении:

- а) шлицевое соединение: система осевых трещин, возникших в результате циклического кручения;  
 б) трещины в полотне диска паровой турбины [2];  
 в) трещины в рельсах (поверхностный слой рельса удален механической обработкой);  
 г) коррозионное растрескивание стенки трубы, длина трещин – до 50 мм

Для контактирующих деталей с перемещающейся зоной контакта разрушение путем образования сетки приповерхностных трещин и последующего выкрашивания достаточно характерно: широко известно разрушение дорожек подшипников, поверхности зубьев тяжело нагруженных шестерен. В большинстве случаев образующиеся трещины имеют достаточно маленькие размеры, сопоставимые с размером зерна материала, что делает невозможным применение подходов классической механики разрушения. Однако при достаточно больших размерах контактирующих деталей – и, соответственно, размерах трещин – эти подходы могут быть применены. Примером такой детали могут служить рельсы: наблюдения, выполненные в РСП-17 (ст. Полтаво Южно-Уральской железной дороги), показали, что у поверхности рельсов после достаточно большой наработки (порядка  $10^8$  циклов, соответствующих проходам колеса), часто отмечаются сетки трещин с размерами, заметно превосходящими размеры зерна материала (см. рис. 1в).

В качестве методического примера рассмотрим контакт бесконечного цилиндра с полупространством (плоское деформированное состояние). Решение задачи о сетке трещин в таких условиях можно получить, по-видимому, только численно; пример расчета, выполненного методом конечных элементов, показан на рис. 2. При вычислениях использовались 3 типа конечных элементов: 6-узловые треугольные (с узлами на серединах сторон); сингулярные – для описания области вокруг вершины трещины (на рис. 2а эти элементы выделены, они представляют собой 6-узловые треугольные элементы со смещенными узлами на двух сторонах, отражающие особенность в напряжениях вида  $r^{-1/2}$ ); контактные элементы для исключения взаимного проникновения цилиндра в полупространство и берегов трещины друг в друга. Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_1$  и  $K_2$  определялись путем сравнения формы берегов трещины у ее вершины с известными аналитическими решениями (поскольку точность определения перемещений в МКЭ при обычном подходе выше точности определения напряжений).

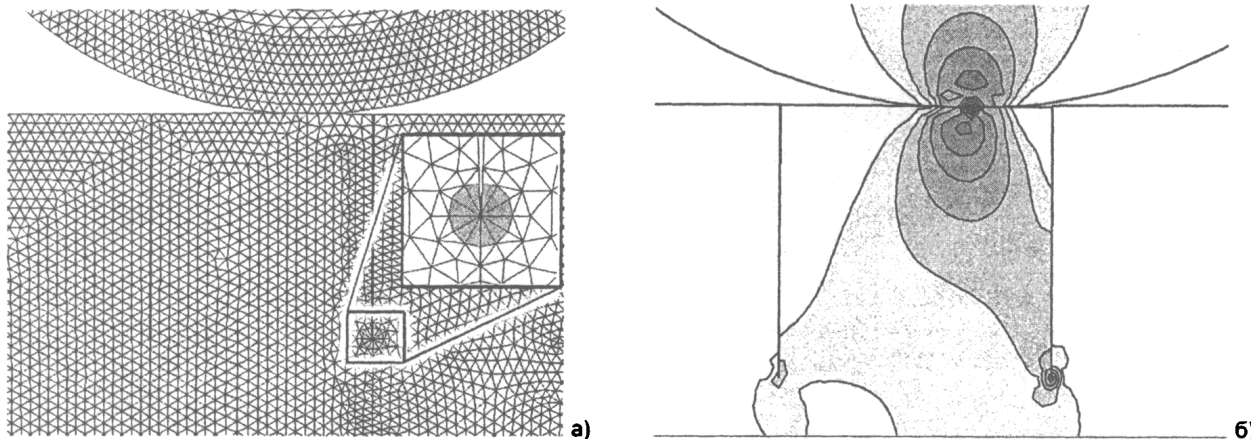


Рис. 2. Расчет напряжений в контактной задаче при наличии сетки трещин: а) сетка КЭ, б) распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений

Геометрическая нелинейность, присущая контактным задачам (зависимость зоны контакта и распределения контактных давлений от приложенной нагрузки) осложняет поиск закономерностей в этой задаче. Более удобным представляется начать рассмотрение с задачи о действии единичной сосредоточенной силы – рис. 3а.

На рис. 3б приведены некоторые результаты расчета – зависимости значений коэффициентов интенсивности напряжений  $K_1$  и  $K_2$  у вершины одной из трещин (отмеченной на рис. 3а кружком) периодической сетки от положения силы  $P$ . Расчеты выявили следующие закономерности.

1. Оба коэффициента  $K_1$  и  $K_2$  отличны от нуля. Условие страгивания трещины в изотропном материале в первом приближении можно принять в виде  $K_{\Sigma} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} = K_{Ic}$  [3,4] (значения  $K_{\Sigma}$  показаны на рис. 3б жирными линиями). С увеличением глубины трещин (при неизменных прочих размерах)  $K_{\Sigma}$  возрастает.

2. При пропорциональном увеличении всех размеров (и глубины трещин  $l$ , и расстояния между ними  $c$ ) и при неизменном значении нагрузки коэффициенты интенсивности напряжений падают пропорционально квадрату размеров (как и следовало ожидать, учитывая вид решения для напряжений в подобной задаче без трещин).

3. Соотношение  $K_1/K_2$  для различных геометрических параметров сетки лежит в диапазоне  $1/5 \dots 1/2$ .

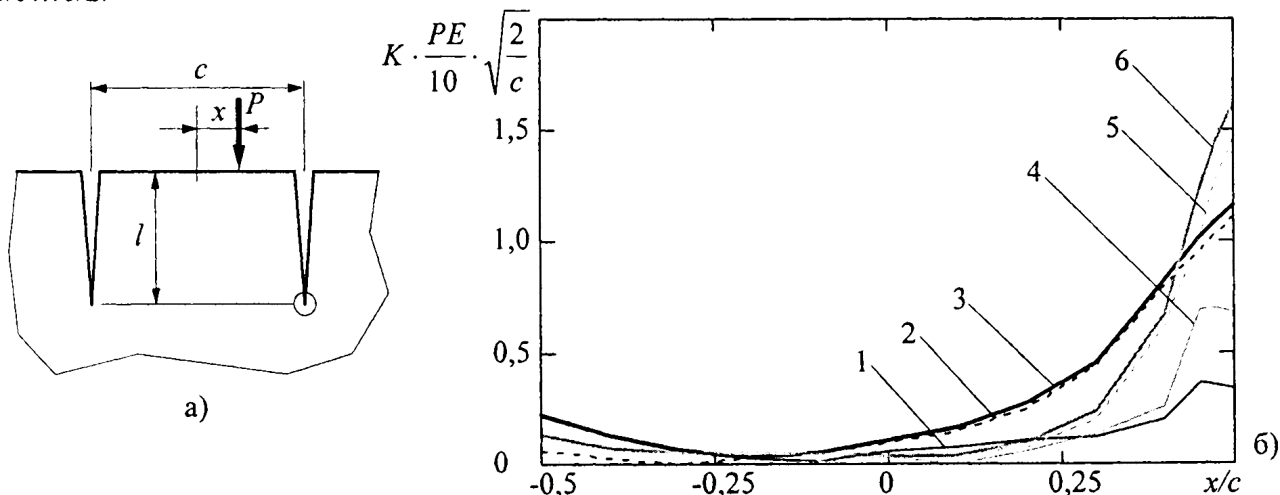


Рис. 3. Нагружение единичной силой: а) схема; б) результаты расчета (кривые 1,2,3 –  $l/c = 0,125$ ; 4,5,6 –  $l/c = 0,5$ ; 1 и 4 –  $K_1$ ; 2 и 5 –  $K_2$ ; 3 и 6 –  $K_{\Sigma}$ )

Из результатов 1 и 2 можно заключить, и численные эксперименты подтверждают это заключение, что уменьшение расстояния между трещинами при неизменной их глубине приведет к увеличению  $K_{\Sigma}$ . Таким образом, сетка трещин в данной задаче будет развиваться быстрее, чем одиночная трещина.

Преобладание  $K_2$  (результат 3) приводит к тому, что трещина должна стартовать под углом около  $60^\circ$  к первоначальному направлению. Однако появление у вершины трещины участка, повернутого по отношению к первоначальному направлению, меняет ситуацию. Вычисление направления дальнейшего развития трещины по критерию  $\max \sigma_\theta$  [3] дает значение угла  $\alpha \approx 30^\circ$ , а после продвижения силы за трещину –  $\beta \approx 70^\circ$  (рис. 4; при расчетах полагалось, что берега трещины взаимодействуют без трения). Таким образом, несмотря на преобладание  $K_2$  при старте трещины, система трещин растет в глубину детали.

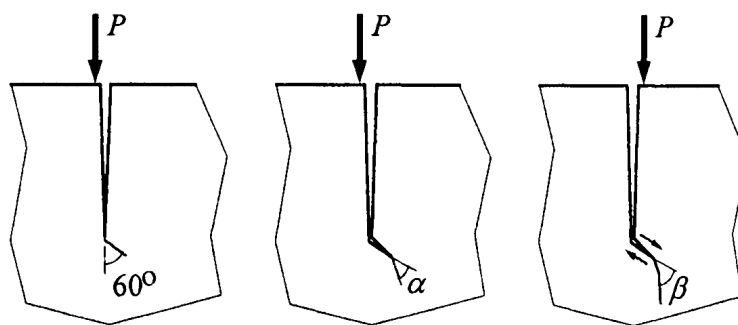


Рис. 4. Направление роста трещины

При произвольном распределении нагрузки по поверхности детали в линейной задаче мог бы быть применен метод суперпозиции, позволяющий получать решения путем соответствующего комбинирования решений для единичной силы. Рассматриваемая задача, строго говоря, не является линейной (из-за возможного контактного взаимодействия берегов трещины), хотя различия между линейным и нелинейным решениями для случая малых перемещений и отсутствия трения между берегами трещины не слишком велики. В приведенном ниже анализе использованы решения нелинейных задач (МКЭ).

Расчеты показали, что при переходе от сосредоточенной нагрузки к распределенной (при сохранении величины равнодействующей и всех геометрических размеров) коэффициенты интенсивности напряжений снижаются, причем тем сильнее, чем больше поверхность, по которой распределена нагрузка.

На рис. 5 приведены значения максимального (по всем положениям нагрузки) коэффициента интенсивности напряжений  $K_\Sigma$  для различных расстояний между трещинами  $c$  при одной и той же глубине трещин  $l$ . С изменением  $d$  меняется и характер зависимости  $K_\Sigma(c)$ : для больших значений  $d$  наибольшие значения КИН соответствуют далеким друг от друга трещинам, а при малых  $d$  – близким (сетка трещин). При неизменном размере  $d$  (что соответствует, например, примерному постоянству размера зоны контакта колеса вагона с рельсом) это приводит к следующим выводам (рис. 6): при развитии трещин до глубины примерно  $10d$  наибольший коэффициент интенсивности напряжений возникает у вершин одиночных (удаленных друг от друга) трещин. Если при этом не происходит катастрофического разрушения конструкции (трещины медленно подрастают с числом циклов), то для более глубоких трещин начинает проявляться взаимодействие между ними, и энергетически

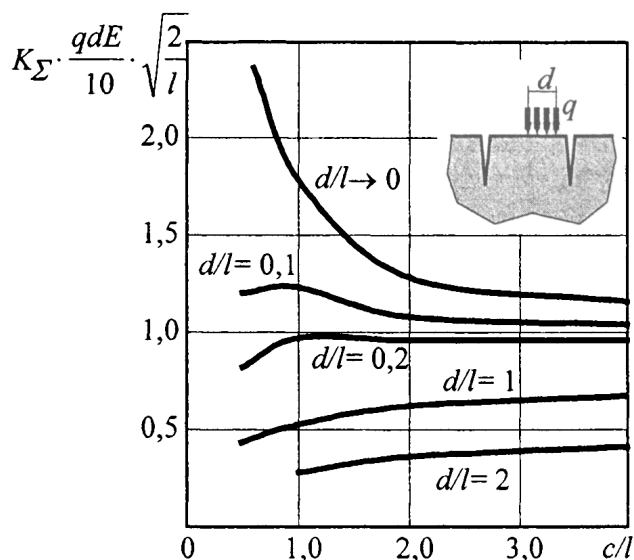


Рис. 5. Зависимость КИН от расстояния между трещинами

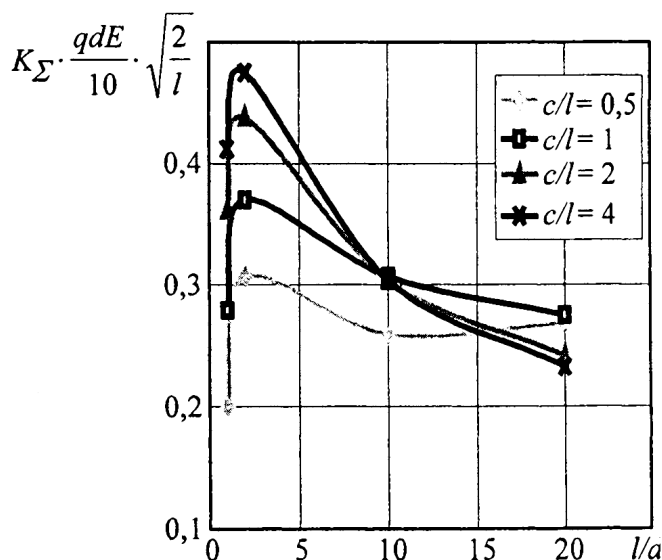


Рис. 6. Зависимость КИН от длины трещин

выгодным становится рост сетки трещин. При этом за счет зависимости КИН от расстояния между трещинами – величина КИН с ростом трещины в глубину уменьшается медленнее, чем для одиночной трещины, то есть сетка трещин оказывается **опаснее** (в смысле скорости роста) одиночной трещины.

Интересно отметить, что такое поведение качественно отличается от поведения сетки трещин, возникающей при тепловом нагружении [1]: при действии подвижной механической нагрузки после достижения трещинами некоторой глубины начинает возрастать «частота» трещин, в то время как при тепловой нагрузке по мере развития сетки трещин в глубину часть трещин останавливается, образуя сетку все более редких трещин

Полученные результаты справедливы лишь для равномерного распределения нагрузки по некоторой площадке. При неравномерном распределении, характерном для контактных задач, количественные результаты, видимо, будут несколько отличаться от приведенных, но качественные закономерности сохранятся. Сравнение с наблюдениями на реальной конструкции (см. рис. 1в) показало качественное правдоподобие результатов расчета. Для достижения количественного соответствия необходимо выполнение более точных расчетов для конкретной конструкции, в частности в задаче о рельсе и колесе – оценка пятна контакта (и распределения контактных давлений) с учетом реальной формы рельса и колеса.

### *Литература*

- 1 Чернявский А.О. Анализ систем взаимодействующих поверхностных трещин //ISSN 0235-7119 Российская академия наук. Проблемы машиностроения и надежности машин. – М.: Наука, – 1995. – № 3. – С.47–52.
2. Исследование изломов. Методические рекомендации и атлас поврежденных деталей прочной части турбины / В.Ф. Резинских, Э.С. Гинзбург, А.М. Клыпина и др.– М.: Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт. – 1993. – 132 с.
3. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.
4. Проблемы разрушения, ресурса и безопасности технических систем. – Красноярск: КОДАС-СибЭРА, 1997. – 520 с.

*Поступила в редакцию 22 апреля 2003 г.*