

ОБЛАСТЬ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ, ВЫЗЫВАЮЩЕЙ СТРАГИВАНИЕ ТРЕЩИНЫ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ

Актуальность темы. При разработке подземных месторождений полезных ископаемых одну из наибольших опасностей представляет внезапное катастрофически быстрое разрушение горной породы. Как правило, такое явление происходит при воздействии на породу различных добычных механизмов, которые являются источником упругих колебаний в породном массиве. Разрушение пород можно трактовать как процесс трещинообразования. Горная порода находится под влиянием квазистатического напряжения и меняющегося колебательного нагружения. Поскольку динамические явления связаны с развитием трещин в породной среде необходимо определение достаточно общих условий, при которых колебательная нагрузка генерирует разрушение среды с определенными структурными нарушениями (трещинами). Условие старта (страгивания) трещины и исследования параметров, входящих в это условие, важны для дальнейшего развития акустической методики прогноза динамических явлений.

Материал исследований. Исследуем величины, которые входят в обобщенное условие страгивания трещины, инициированного колебаниями в породной напряженно-деформированной среде:

$$\bar{a} \sin c \left(\bar{l} \right) \cos \left(\bar{l} \right) \geq \frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \cdot \bar{l}}{2} - \text{sign}(\sigma_0), \quad (1)$$

где безразмерные величины:

$$\bar{a} = \frac{a}{|\sigma_0|}; \bar{l} = \frac{l \vartheta}{c_R}; \alpha = \frac{k}{|\sigma_0| \cdot \vartheta}; K_{cv} = \frac{K_{1c}}{2 \cdot |\sigma_0|} \cdot \sqrt{\frac{\pi \vartheta}{c_R}}; \tau = \frac{l}{c_R}.$$

Функция $\sin c(x) = \frac{\sin x}{x}$. $\lfloor \bar{l} \rfloor$ – целая часть значения \bar{l} , округленная до ближайшего целого в меньшую сторону. Здесь a – амплитуда колебаний в породном массиве, σ_0 – постоянная составляющая напряжения, $k = \left(\frac{d\sigma}{dt} \right)_{t=t_0}$ – скорость роста квазистатических напряжений, t_0 – момент страгивания трещины, l – характерный размер (радиус) дисковой трещины, c_R – скорость волн Релея, ϑ – частота колебаний в момент страгивания трещины, $K_1(t)$ – коэффициент интенсивности напряжения, K_{1c} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжения K_1 .

Значение величины K_{1c} определяется экспериментально либо учитывая корреляционную взаимосвязь трещиностойкости и предела прочности горных пород на сжатие.

При выводе условия (1) принято, что регулярное напряжение, действующее в окрестности трещины, имеет вид $\sigma_1(t) = \sigma_0 + k \cdot (t - t_0) + a \cdot \cos[2\pi\vartheta \cdot (t - t_0)]$.

Очевидно, что изменение напряжённого состояния породного массива, не связанное с колебаниями, влияет на значения параметров нагружения, при которых может начаться рост трещин. Согласно обозначениям такое изменение напряжения определяется величинами σ_0 и α .

Если в окрестности момента страгивания величина $\alpha > 0$, тогда регулярное напряжение $\sigma(t)$ является возрастающей функцией, то есть до момента страгивания регулярное напряжение σ было ниже $\sigma(t_0)$. Если регулярное напряжение, действующее в породном массиве, является растягивающим, тогда получаем: напряжение $\sigma(t)$ меньше напряжения $\sigma(t_0)$. В случае сжимающего напряжения получаем: модуль напряжения $|\sigma(t)|$ больше, чем модуль напряжения $|\sigma(t_0)|$. Если в окрестности момента страгивания величина $\alpha < 0$, то страгивание происходит в условиях предшествующего моменту страгивания уменьшения напряжения (регулярное напряжение $\sigma(t)$ является убывающей функцией). Тогда до момента страгивания регулярное растягивающее напряжение $\sigma(t)$ больше $\sigma(t_0)$. В случае сжимающего напряжения модуль сжимающего напряжения $|\sigma(t)|$ меньше модуля напряжения $|\sigma(t_0)|$.

Очевидно, что значения параметра α могут быть такими, что условия страгивания (1) выполняются и при отсутствии колебательной нагрузки. Это может иметь место, если выполняется неравенство

$$\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \text{sign}(\sigma_0) \leq 0 \quad (2)$$

Из обобщенного условия страгивания трещины (1) следует зависимость:

$$\bar{a}(\bar{l}) = \frac{\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \text{sign}(\sigma_0)}{\sin c \cos \bar{l}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \sin c \cos \bar{l} \neq 0 \quad (4)$$

и выполняется условие (2).

Условие (2) при значении величины $\alpha = 0$ имеет вид:

$$\bar{l} \neq 1, 2, \dots \text{ и } 0 < \bar{l} \leq K_{cv}^2 \quad (5)$$

При сжимающей постоянной составляющей напряжения ($\sigma_0 \leq 0$) и $\alpha = 0$ страгивание трещины без колебательной нагрузки невозможно.

Исследовав значения величин, которые входят в критерий (1), при значениях величины $\alpha \neq 0$, получаем следующее.

I) страгивание трещины без колебательной нагрузки возможно при значениях величины $\alpha < 0$ и напряжении $\sigma_0 \geq 0$, если приведенная длина трещины $\bar{l} \geq \bar{l}_1$, где

$$\bar{l}_1 = \left[\left(\sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3} - \frac{K_{cv}}{\alpha}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(-\frac{K_{cv}}{\alpha} - \sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (6)$$

II) старт трещины без колебательной нагрузки возможен, при значениях величины $\alpha < 0$ и напряжении $\sigma_0 < 0$, когда $\bar{l} \geq \bar{l}_2$, где

$$\bar{l}_2 = \left[\left(\sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 + \frac{8}{27\alpha^3} - \frac{K_{cv}}{\alpha}} \right)^{1/3} + \left(-\frac{K_{cv}}{\alpha} - \sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 + \frac{8}{27\alpha^3}} \right)^{1/3} \right]^2 \quad (7)$$

III) при значениях величины $\alpha > \frac{8}{27K_{cv}^2}$ и напряжении $\sigma_0 \geq 0$ страгивание трещины без дополнительного

нагружения произойти не может. При $0 < \alpha < \frac{8}{27K_{cv}^2}$ условие страгивания трещины без колебательной

нагрузки выполняется для трещин с приведенной длиной \bar{l} , удовлетворяющей условию $\bar{l}_3 < \bar{l} < \bar{l}_1$, где \bar{l}_1 вычисляется по формуле (6).

$$\bar{l}_3 = \left\{ \frac{\sqrt{\bar{l}_1} + i \cdot \sqrt{3}}{2} \left[\left(\sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3} - \frac{K_{cv}}{\alpha}} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(-\frac{K_{cv}}{\alpha} - \sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \right\}^2 \quad (8)$$

IV) при значениях величины $\alpha > 0$ и напряжении $\sigma_0 < 0$ страгивание трещины без дополнительной нагрузки невозможно.

Полученные результаты позволяют представить ограничения на параметры, при которых страгивание трещины может быть инициировано колебательной нагрузкой, в виде таблицы.

Области значений приведенной длины трещины \bar{l} , страгивание которой может быть инициировано колебательной нагрузкой, при напряжении σ_0 и величине α

σ_0	α	\bar{l}	Номер формул для вычислений $\bar{l}_i, i = 1,3$
$\sigma_0 \geq 0$	$\left(-\infty, 0 \right]$	$\left(\bar{l}_1, \infty \right)$	(6)
	$\left(0, \frac{8}{27K_{cv}^2} \right)$	$\left(\bar{l}_3, \infty \right) \cup \left(\infty, \infty \right)$	(6),(8)
	$\left(\frac{8}{27K_{cv}^2}, \infty \right)$	$\left(\infty, \infty \right)$	
$\sigma_0 < 0$	$\left(-\infty, 0 \right]$	$\left(\bar{l}_2, \infty \right)$	(7)
	$\left(0, \infty \right)$	$\left(\infty, \infty \right)$	

Учитывая данные из таблицы, для случая $K_{cv} = 0,8$ на рисунке 1 построены кривые $\bar{l}(\alpha)$, отделяющие область (заштрихована), в которой возможно страгивание трещины при колебательном нагружении. Аналогичные кривые для других значений величины трещиностойкости K_{cv} представлены на рисунке 2 (штриховка для областей страгивания опущена).

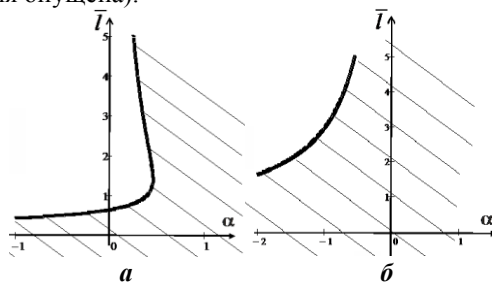


Рисунок 1 – Область изменения \bar{l} и α , в которой возможно инициирование страгивания трещины колебательной нагрузкой, $K_{cv} = 0,8$: а) $\sigma_0 \geq 0$, б) $\sigma_0 < 0$

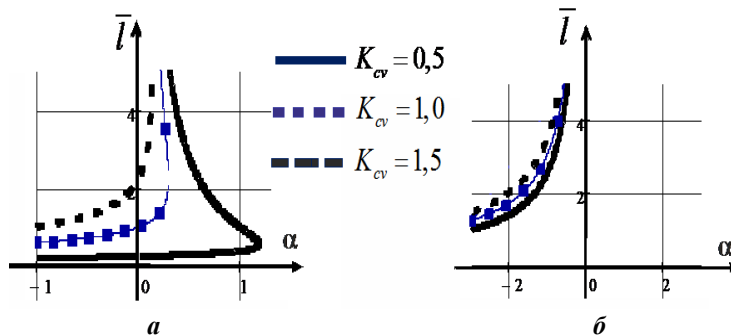


Рис. 2. Области изменения \bar{l} и α , в которых возможно инициирование страгивания трещины колебательной нагрузкой при различных значениях параметра K_{cv} : а) $\sigma_0 \geq 0$, б) $\sigma_0 < 0$

При постоянном статическом напряжении в массиве с увеличением амплитуды колебаний наступление динамических явлений возможно в момент скачка длин страгиваемых трещин; при изменении квазистационарных напряжений с увеличением амплитуды колебаний в массиве наступление динамических явлений возможно по тем же причинам, но возникает еще следующий эффект: при определенной амплитуде колебаний начинают одновременно страгиваться трещины длиной l и длиной практически в 2 раза большей.