

УДК 621.924

**РАСЧЁТ ИНДИКАТОРОВ РАЗРУШЕНИЯ РЕЖУЩЕГО  
ИНСТРУМЕНТА**

***В. А. Залого**, д-р техн. наук, профессор;*

***В. В. Нагорный**, аспирант;*

*Сумский государственный университет, г. Сумы*

*Рассматриваются два подхода, следующих теориям Париса и Шенли, к оценке характера разрушения лезвия режущего инструмента, причиной которого является усталостная трещина, возникающая вследствие воздействия на лезвие знакопеременного усилия резания.*

***Ключевые слова:** усталостная трещина, скорость развития трещины, интенсивность напряжения, скол, индикатор скола.*

*Розглядаються два підходи, що дотримуються теорій Паріса і Шенлі, до оцінки характеру руйнування леза різального інструменту, причиною якого є втомна тріщина, що виникає внаслідок впливу на лезо знакозмінного зусилля різання.*

***Ключові слова:** втомна тріщина, швидкість розвитку тріщини, інтенсивність напруги, відкол, індикатор відколу.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Известно [1], что характерными видами отказов режущего инструмента являются либо его постепенный отказ (изнашивание, затупление), либо разрушение (внезапный отказ). Физическая природа этих внешне отличающихся процессов, как показали многолетние исследования, в большинстве своем обуславливается одним и тем же - усталостным разрушением [1,2] в результате интенсивного трещинообразования. Усталостная трещина образуется и развивается под действием знакопеременного усилия, возникающего в процессе резания. Наибольшее распространение в механике разрушения к настоящему времени получили два подхода к оценке характера развития трещин, а именно: оценка длины трещины по зависимости, предложенной Парисом [3], и по теории, выдвинутой Шенли [4].

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Для удобства диагностирования и наглядности представления его результатов целесообразно оперировать безразмерными параметрами – индикаторами, в сжатой (кумулятивной) форме характеризующими состояние лезвия. Для получения и сравнения выражений для индикаторов, характеризующих развитие усталостных трещин по каждой из названных теорий, рассмотрим схему разрушения лезвия инструмента (рис.1).

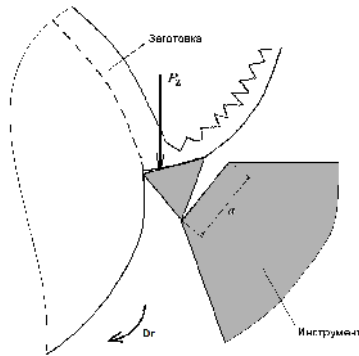


Рисунок 1 – Схема скола режущей кромки инструмента

### ИНДИКАТОР, ОПИСЫВАЮЩИЙ РАЗВИТИЕ ТРЕЩИНЫ ПО ЗАВИСИМОСТИ, ПРЕДЛОЖЕННОЙ ПАРИСОМ

Скорость развития усталостной трещины  $v_{тр}$  описывается графиком зависимости  $v_{тр}(K)$ , где  $K$  – интенсивность напряжений [5]. Типичный вид графика приведен на рис. 2. Развитие трещины согласно зависимости (1), предложенной Парисом, описывается [3, 5] линейным участком графика, представленного на рис. 2:

$$v_{тр} = C \cdot K^\beta, \quad (1)$$

где параметры  $C$  и  $\beta$  в определяющей мере зависят от свойств инструментального материала: для разных материалов значения  $C$  и  $\beta$  изменяются в широком интервале. Эти параметры не имеют физического смысла, но их геометрический смысл хорошо можно представить из рис. 2.

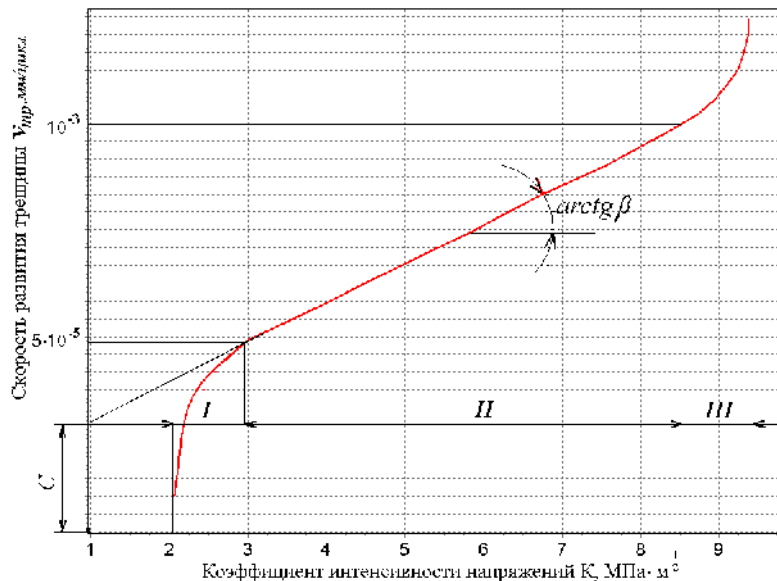


Рисунок 2 - Диаграмма изменения скорости роста усталостной трещины в зависимости от коэффициента интенсивности  $K$ , построенная в логарифмическом масштабе

Приведенный на рис. 2 график является основной информацией о процессе усталостного разрушения из-за развития трещины и охватывает диапазон изменения скорости роста трещины от нуля до критического значения, соответствующего моменту разрушения образца. На диаграмме, изображенной в логарифмических координатах, можно выделить три участка, каждый из которых характеризуется своими феноменологическими и физическими закономерностями развития трещин: I - низких ( $0 < v_{mp} < 5 \cdot 10^{-5}$  мм/цикл), II - средних ( $5 \cdot 10^{-5} < v_{mp} < 10^{-3}$  мм/цикл), III - высоких ( $v_{mp} > 10^{-3}$  мм/цикл) скоростей развития трещины.

На основе уравнения (1) можно рассчитать долговечность инструмента при наличии усталостных трещин. Для этого левую часть уравнения (1) представим в виде

$$\frac{da}{dn} = C \cdot K^\beta, \quad (2)$$

где  $a$  - длина трещины, мм (рис. 1);  $n$  - число циклов нагружения, характеризующее его длительность.

Коэффициент интенсивности  $K$  выражают [5] через величину напряжения, действующего в нагруженном сечении, и длину развивающейся в нем трещины  $a$ :

$$K = \sigma_{ucx} \cdot \sqrt{Y \cdot a}, \quad (3)$$

где  $Y$  - параметр, характеризующий геометрию лезвия, схему его нагружения и форму трещины;  $\sigma$  - исходная величина напряжения, испытываемого режущей кромкой в начале процесса резания, когда резец еще остро заточен.

Подставив (3) в (2), придём к следующему выражению:

$$\frac{da}{dn} = C \cdot (\sigma_{ucx} \cdot \sqrt{Y \cdot a})^\beta. \quad (4)$$

Разделяя в (4) переменные и вводя интеграл, получим

$$\frac{1}{C \cdot \sigma_{ucx}^\beta \cdot Y^{\frac{\beta}{2}}} \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{a^{\frac{\beta}{2}}} = \int_{n_1}^{n_2} dn. \quad (5)$$

Для определения выражения для индикатора скола по Парису  $a_{СК}^{\Pi}$  дважды проинтегрируем левую и правую части равенства (5). При интегрировании в первом случае в левой части выражения (5) пределы интегрирования равны исходной ( $a_1 = a_{ucx}$ ) и текущей ( $a_2 = a_i$ ) длинам трещины, а в правой части, соответственно, исходному ( $n_1 = n_{ucx}$ ), т.е. при котором начинает формироваться трещина, и текущему ( $n_2 = n_i$ ) числам циклов нагружения.

Во втором случае в левой части пределы интегрирования равны исходной ( $a_1 = a_{ucx}$ ) и предельной ( $a_2 = a_{раз}$ ) длинам трещины, а в правой части, соответственно, исходному числу циклов нагружения ( $n_1 = n_{ucx}$ ) и числу циклов, при котором происходит разрушение (скол, выкрашивание) режущей кромки ( $n_2 = N_{раз}$ ).

Первое интегрирование

$$\phi \cdot \left( a_{ucx}^{1-\frac{\beta}{2}} - a_i^{1-\frac{\beta}{2}} \right) = n_i - n_{ucx}, \quad (6)$$

где

$$\phi = \frac{1}{C \cdot \sigma_{ucx}^{\beta} \cdot Y^{\frac{\beta}{2}}}.$$

Второе интегрирование

$$\phi \cdot \left( a_{ucx}^{1-\frac{\beta}{2}} - a_{раз}^{1-\frac{\beta}{2}} \right) = N_{раз} - n_{ucx}. \quad (7)$$

Разделим (6) на (7):

$$\frac{a_{ucx}^{1-\frac{\beta}{2}} - a_i^{1-\frac{\beta}{2}}}{a_{ucx}^{1-\frac{\beta}{2}} - a_{раз}^{1-\frac{\beta}{2}}} = \frac{n_i - n_{ucx}}{N_{раз} - n_{ucx}}. \quad (8)$$

Левая часть выражения (8) представляет собой индикатор скола по Парису, т. е.

$$a_{СК}^{\Pi} = \frac{a_{ucx}^{1-\frac{\beta}{2}} - a_i^{1-\frac{\beta}{2}}}{a_{ucx}^{1-\frac{\beta}{2}} - a_{раз}^{1-\frac{\beta}{2}}}, \quad (9)$$

который изменяется от нуля (при  $a_i = a_{ucx}$ ) до единицы (при  $a_i = a_{раз}$ ).

Именно это обстоятельство позволяет использовать индикатор скола  $a_{СК}^{\Pi}$  при диагностическом контроле состояния инструмента.

В (8) от числа циклов можно перейти ко времени действия нагрузки (длительности резания  $\tau$ , мин), используя известное соотношение между этими параметрами:

$$n = \tau \cdot f, \quad (10)$$

где  $f$  - доминирующая частота звука, генерируемого в процессе резания.

С учетом (9) и (10) выражение (8) запишется в следующем виде:

$$a_{СК}^{\Pi} = \frac{\tau - \tau_{ucx}}{T - \tau_{ucx}}, \quad (11)$$

где  $T$  - стойкость инструмента, мин, т. е. наработка инструмента до замены его режущей кромки.

Результаты расчетов индикатора скола  $a_{СК}^{\Pi}$  по формуле (11) приведены на рис. 3.

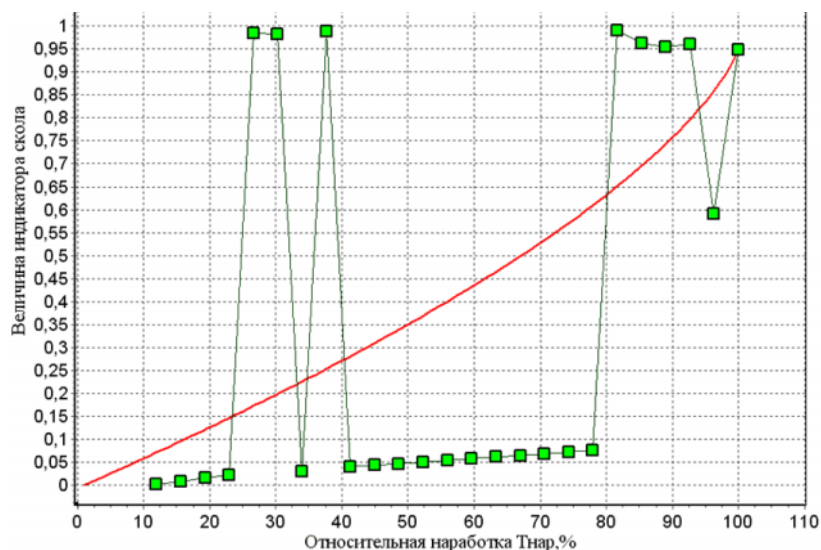


Рисунок 3 - Изменение индикатора скола  $a_{СК}^П$  в зависимости от длительности резания

Для расчета в качестве исходных данных использовалась информация, полученная при фрезеровании, в ходе которого фреза гарантированно доводилась до состояния, требующего её замены. Приведенная на рисунке кривая представляет собой график функции (11), параметры которой определены по результатам диагностирования состояния инструмента перед его заменой. Эта кривая описывает изменение индикатора скола  $a_{СК}^П$  по мере роста длительности процесса резания. Приведенные на рис. 3 точки характеризуют значение индикатора скола  $a_{СК}^П$  в дискретные моменты времени, которые рассчитаны на основе данных, полученных в заданные моменты периодического диагностирования состояния инструмента.

### ИНДИКАТОР, ОПИСЫВАЮЩИЙ РАЗВИТИЕ ТРЕЩИНЫ В СООТВЕТСТВИИ С ТЕОРИЕЙ, ПРЕДЛОЖЕННОЙ Ф. Р. ШЕНЛИ

Шенли Ф. Р. предложил следующий закон развития трещины [6]:

$$a = A \cdot e^{\beta \cdot n}, \quad (12)$$

где  $a$  - длина трещины,  $A$  - константа,  $\beta$  - коэффициент, зависящий от амплитуды напряжения,  $n$  - число циклов изменения нагрузки.

Параметр  $\beta$  Шенли Ф. Р. представил в следующем виде:

$$\beta = C \cdot \sigma_{исх}^m, \quad (13)$$

где  $m$  - показатель, который определяется по экспериментальным данным,  $C$  - константа.

Подставив (13) в выражение (12), получим

$$a = A \cdot e^{C \cdot \sigma_{исх}^m \cdot n}. \quad (14)$$

Определим константы  $A$  и  $C$ , для чего прологарифмируем правую и левую части равенства (14) и запишем получившееся равенство для

произвольного момента нагружения, характеризующегося числом циклов нагружения  $n_i$ , и для момента разрушения инструмента при числе циклов  $N_{раз}$ .

$$\begin{cases} \ln a = \ln A + C \cdot \sigma_{ucx}^m \cdot n_i, \\ \ln a_{раз} = \ln A + C \cdot \sigma_{ucx}^m \cdot N_{раз}. \end{cases} \quad (15)$$

Решим систему (15) относительно искомых констант:

$$\ln A = \frac{N_{раз} \cdot \ln a_i - n_i \cdot \ln a_{раз}}{N_{раз} - n_i}. \quad (16)$$

$$C = \frac{\ln a_{раз} - \ln a_i}{\sigma_{ucx}^m \cdot (N_{раз} - n_i)}. \quad (17)$$

Используя начальные условия, когда  $n_i = n_{ucx} = 0$ ,  $a_i = a_{ucx}$ , получим окончательные выражения для констант:

$$A = a_{ucx}. \quad (18)$$

$$C = \frac{\ln \frac{a_{раз}}{a_{ucx}}}{\sigma_{ucx}^m \cdot N_{раз}}. \quad (19)$$

С учётом (18) и (19) выражение (14) запишется в следующем виде:

$$a = a_{ucx} \cdot e^{\frac{\ln \frac{a_{раз}}{a_{ucx}} \cdot n_i}{N_{раз}}}. \quad (20)$$

Для получения выражения для индикаторной функции скола режущей кромки инструмента по Шенли ( ) запишем выражение (20) для двух случаев – для произвольного момента резания (формула (9)) и для момента разрушения инструмента:

$$a_{раз} = a_{ucx} \cdot e^{\frac{\ln \frac{a_{раз}}{a_{ucx}} \cdot n_i}{N_{раз}}}. \quad (21)$$

Разделим (20) на (21). Полученное при этом выражение и будет искомым индикатором скола по Шенли:

$$a_{СК}^{III} = \frac{a_i}{a_{раз}} = e^{\frac{\ln \frac{a_{раз}}{a_{ucx}} \cdot n_i - N_{раз}}{N_{раз}}}. \quad (22)$$

В (22), как и в предыдущем случае, можно перейти от циклов нагружения ко времени резания  $\tau$  и стойкости инструмента  $T$ :

$$a_{СК}^{III} = e^{\frac{\ln \frac{a_{раз}}{a_{ucx}} \cdot \tau - T}{T}}. \quad (23)$$

При  $\tau = \tau_{ucx} = 0$  индикатор скола по Шенли будет равен

$$a_{СК}^{III} = \frac{1}{e^{\frac{Ln a_{раз}}{a_{исх}}}}$$

Согласно статистике [4]  $\frac{a_{раз}}{a_{исх}} = 100 - 1000$ , поэтому в исходный момент резания  $a_{СК}^{III} = 10^{-3} - 10^{-2}$ ;

При  $\tau = T$  в соответствии с (23) индикатор скола по Шенли будет равен

$$a_{СК}^{III} = 1.$$

Преобразуем равенство (19) следующим образом:

$$\sigma_{исх}^m \cdot N_{раз} = \frac{Ln \frac{a_{раз}}{a_{исх}}}{C}.$$

Если правую часть этого уравнения обозначить некоторой постоянной  $B$ , а в левой абстрагироваться от конкретного обозначения напряжения и числа циклов, то получим известное выражение для степенного уравнения кривой усталости [5]:

$$\sigma^m \cdot N = B. \quad (24)$$

Результаты расчетов индикатора по формуле (23) приведены на рис. 4.

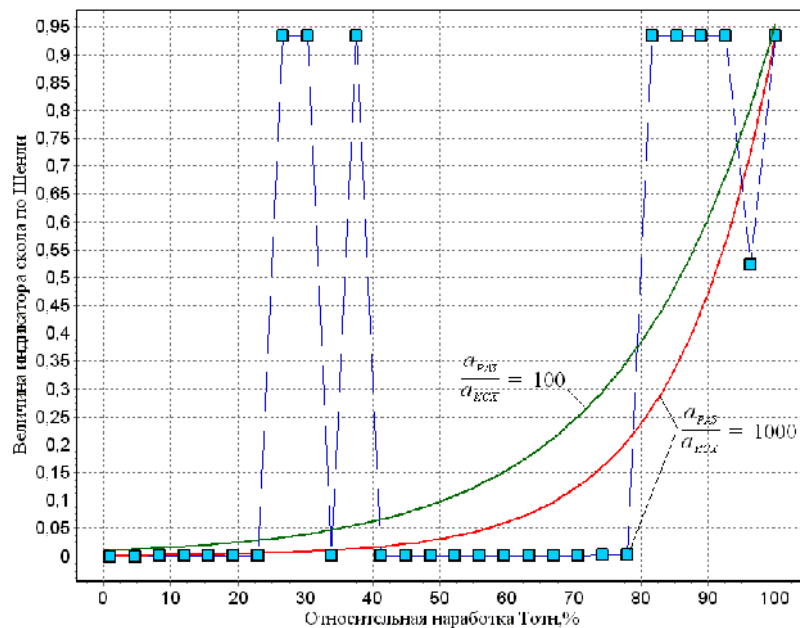


Рисунок 4 - Изменение индикатора скола  $a_{СК}^{III}$  в зависимости от длительности резания

Для расчета в качестве исходных данных использовалась информация, полученная при фрезеровании, в ходе которого фреза, как и в первом случае, гарантированно доводилась до состояния, требующего её замены.

На рис. 4 приведены две кривые, характеризующие изменение индикатора скола в зависимости от длительности резания. Эти кривые представляют собой графики функции (23), рассчитанные для двух крайних значений отношения критической и исходной длин трещин  $\frac{a_{раз}}{a_{исх}} = 100$  и  $\frac{a_{раз}}{a_{исх}} = 1000$ . Параметр  $T$  в формуле определен по результатам диагностирования фактического состояния инструмента перед его заменой. Как видим, изменение отношения исходной и критической длин трещин на порядок не приводит к существенному отличию графиков. Меньшая величина отношения описывает рост трещины с некоторым запасом прочности лезвия, так как находится выше кривой, описывающей рост трещины при большем отношении длин. Обе кривые показывают, что непосредственно перед заменой инструмента образующаяся в лезвии трещина практически равна ее предельному значению.

Кроме этого, на рис. 4 приведены результаты расчёта величины индикатора скола по Шенли в дискретные моменты времени на основе данных, полученных в моменты периодического диагностирования инструмента. Отношение — при этом принималось равным 1000.

На рис. 5 приведены графики изменения индикаторов скола по Шенли  $a_{СК}^{III}$  и по Парису  $a_{СК}^{II}$  в зависимости от длительности резания.

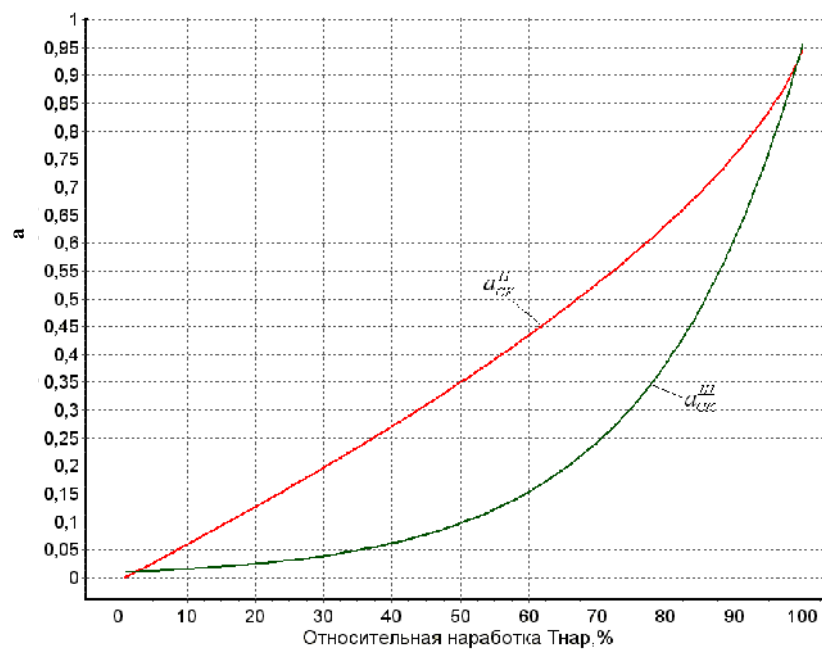


Рисунок 5 - Изменение индикаторов скола  $a_{СК}^{III}$  и  $a_{СК}^{II}$  в зависимости от длительности резания

Анализ показывает, что индикатор скола по Парису  $a_{СК}^{II}$  сигнализирует о большей величине трещины по сравнению с индикатором  $a_{СК}^{III}$ , свидетельствуя, таким образом, о более интенсивном



трещинообразовании практически в течение всего периода резания. Таким образом, при диагностическом контроле состояния инструмента индикатор скола  $a_{СК}^{II}$  за счет большей величины прогнозируемой длины усталостной трещины может обеспечить более надежную работу инструмента, чем индикатор скола  $a_{СК}^{III}$ . Использование же при диагностическом контроле состояния инструмента индикатора скола  $a_{СК}^{III}$  хоть и приводит к некоторому снижению надежности инструмента, вместе с тем позволяет увеличить его ресурс.

#### ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАЗВИТИЕ ТРЕЩИНЫ И ОБРАЗОВАНИЕ СКОЛОВ (ВЫКРАШИВАНИЙ)

Определим параметр  $\beta$  в выражении (8), который характеризует угол наклона кривой в зависимости скорости развития трещины от коэффициента интенсивности напряжений  $K$  (рис. 2). Для этого рассмотрим совместно выражения (22) и (8). Разрешив (8) относительно отношения текущей длины трещины  $a_i$  к её предельной длине  $a_{раз}$ , предшествующей сколу, получим

$$\frac{a_i}{a_{раз}} = \zeta = \left[ \left( \frac{a_{уцх}}{a_{раз}} \right)^{1-\frac{\beta}{2}} - \frac{n_i - n_{уцх}}{N_{раз} - n_{уцх}} \left\{ \left( \frac{a_{уцх}}{a_{раз}} \right)^{1-\frac{\beta}{2}} + 1 \right\} \right]^{\frac{2}{2-\beta}}. \quad (27)$$

Искомый параметр  $\beta$  определим путём минимизации следующего функционала:

$$U = \sum_{i=1}^L (\gamma - \zeta)^2, \quad (28)$$

где  $L$  - количество раз, когда осуществлялся контроль состояния инструмента;

$$\gamma = e^{\frac{Ln \frac{a_{раз} n_i - N_{раз}}{a_{уцх} N_{уцх}}}{}}.$$

Анализ данных, приведенных на рис. 3, показал, что показатель степени  $\beta$  равен трём. На практике этот параметр изменяется от 2 до 10 [4].

На рис. 6 приведена диаграмма изменения скорости роста усталостной трещины в зависимости от коэффициента интенсивности  $K$ , построенная в относительных величинах  $v_{отн}(K_{отн})$ .

$$v_{отн} = \frac{v}{v_{раз}} = \left( \frac{K}{K_{раз}} \right)^\beta = \left( \sqrt{\frac{a_i}{a_{раз}}} \right)^\beta. \quad (29)$$

С учетом (22) выражение (29) примет следующий вид:

$$v = \left( \sqrt[e]{\frac{Ln^{\frac{a}{n-N}} \cdot n - N}{N}} \right)^{\beta} \quad (30)$$

Как и прежде, перейдем в выражении (30) от циклов к длительности резания:

$$v = \left( \sqrt[e]{\frac{Ln^{\frac{a}{\tau-T}} \cdot \tau - T}{T}} \right)^{\beta} \quad (31)$$

Графики функции (31) для двух соотношений между исходным и критическим размерами трещины (100 и 1000) приведены на рис. 6.

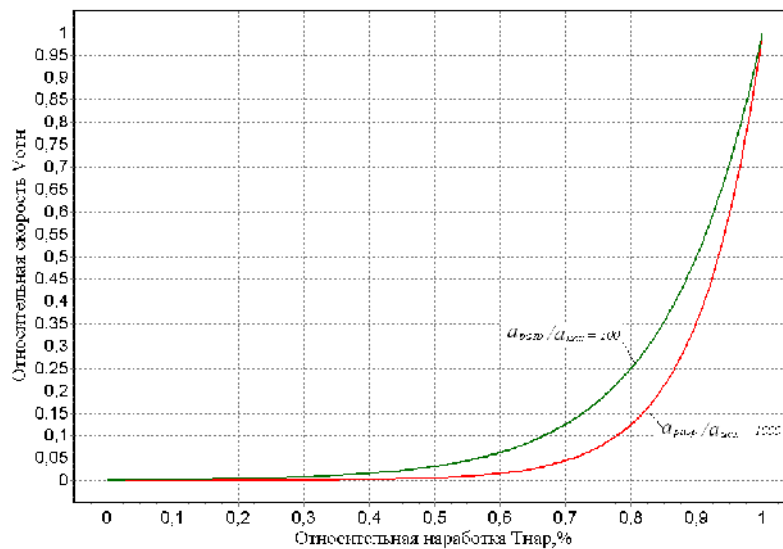


Рисунок 6 – Диаграмма изменения скорости роста усталостной трещины  $V_{отн}$  в зависимости от длительности резания (наработки резца), построенная в относительных координатах

Как видим, параметр  $V$  изменяется от 0 до 1, и поэтому его тоже можно рассматривать в качестве индикатора разрушения лезвия инструмента. Как следует из диаграммы, он практически не чувствителен к соотношению между исходным и критическим размерами трещин, что очень важно, т.к. оно является сугубо статистической оценочной величиной и поэтому его фактическое значение для конкретного инструмента неизвестно.

### ВЫВОДЫ

Получены выражения для индикаторов разрушения (сколов, выкрашиваний) режущей кромки лезвия режущего инструмента. Индикаторы представляют собой безразмерные величины, изменяющиеся от нуля до единицы. Они в сжатой (кумулятивной) форме характеризуют состояние режущей кромки лезвия инструмента, что позволяет их эффективно использовать при прогнозировании момента его замены. В

качестве индикатора можно использовать также и параметр, характеризующий изменение безразмерной (относительной) скорости развития трещины.

## SUMMARY

### CALCULATION OF DESTRUCTION INDICATORS OF CUTTING TOOL

*Zaloga V. A., Nagorny V. V.,  
Sumy State University, Sumy, Ukraine*

*Two approaches that follow the theories of Paris and Shanley, are considered to assess the destruction nature of the blade of the cutting tool, which is the cause of fatigue crack that occurs as a result of exposure to the alternating blade cutting forces.*

**Key words:** *fatigue crack, rate of crack development, intensity of stress, indicator of cleavage.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Внуков Ю. М. Зношення і стійкість різальних лезових інструментів / Ю. М. Внуков, В. О. Залога. – Суми: Сумський державний університет, 2010. – 243 с.
2. Старков В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
3. Парис П. Анализ напряженного состояния около трещины // Прикладные вопросы вязкости разрушения / П. Парис, Дж. Си. – М.: Мир, 1968. – С. 64–142.
4. Шенли Ф. Р. Анализ веса и прочность самолетных конструкций / Ф. Р. Шенли. - М., 1957. – 428 с.
5. Троценко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 частях / В. Т. Троценко, Л. А. Сосновский. - Киев: Наукова думка, 1987. - Ч. 1. – 503 с.; Ч. 2. – 802 с.
6. Кренделл С. Случайные колебания / С. Кренделл. - М.: Мир, 1967. - 356 с.

*Поступила в редакцию 12 марта 2012 г.*