

Мисиров М.Х.
Misirov M. Kh.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ И РАЗРУШАЮЩЕЙ СИЛЫ ПРИ РЕЗАНИИ ХРУПКИХ
МАТЕРИАЛОВ**
**DETERMINATION OF STRESSED-DEFORMED STATE AND
DESTRUCTIVE FORCES DURING CUTTING FRAGILE MATERIALS**

Есть большой класс хрупких неметаллических материалов, механическая обработка которых имеет свои особенности. К таким особенностям можно отнести хрупкое разрушение при обработке, образование трещин при формировании стружки. Эти особенности, при определенных условиях, присущи грунтам и почвам. Поэтому в данной работе процесс механической обработки этих материалов рассматривается с позиции механики разрушения.

Опираясь на положения механики разрушения, разработана математическая модель разрушения хрупких материалов. Данная модель позволяет определять напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне резания. НДС в зоне обработки определяется величиной коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Используя текущие значения КИН, получили количественную картину распределения около вершины трещины радиальных, касательных и окружных напряжений. С помощью картины распределения окружных напряжений определена начальная траектория движения трещины, что важно при исследовании качества обработки. Данная методика основана на критерии максимальных окружных напряжений.

Теоретически из модели получено, что при разрушении отрывом, когда сдвигающая составляющая силы резания отсутствует, силы сопротивления минимальны. Эти силы сопротивления более чем в семь раз меньше сил, возникающих при разрушении сдвигом.

Из разработанной математической модели следует условие деформации чистого сдвига. Этот результат модели положен в основу запатентованного способа (патент РФ № 2650613) по определению КИН при поперечном сдвиге твердого тела.

There is a large class of brittle non-metallic materials, the machining of which has its own characteristics. These features include brittle fracture during processing, cracking during chip formation. These features, under certain conditions, are inherent in soils and soils. Therefore, in this work, the process of mechanical processing of these materials is considered from the standpoint of fracture mechanics.

Based on the provisions of fracture mechanics, a mathematical model for the destruction of brittle materials has been developed. This model allows you to determine the stress-strain state (SST) in the cutting zone. The SST in the treatment zone is determined by the value of the stress intensity factors (SIF). Using the current values of the SIF, we obtained a quantitative picture of the distribution of radial, tangential, and circumferential stresses near the crack tip. Using the pattern of distribution of circumferential stresses, the initial trajectory of the crack is determined, which is important when studying the quality of processing. This technique is based on the criteria for maximum circumferential stresses.

It is theoretically obtained from the model that when breaking by separation, when the shear component of the cutting force is absent, the resistance forces are minimal. These resistance forces are more than seven times less than the forces arising from fracture shear.

From the developed mathematical model follows the condition of pure shear deformation. This model result is the basis of the patented method (RF patent No. 2650613) for the determination of the oil recovery factor with a transverse shear of a solid.

Ключевые слова: механика резания, механика разрушения, нормальный отрыв, попе-

речный сдвиг, трещина, резание неметаллических материалов, обработка хрупких материалов, сопротивление резанию, коэффициент интенсивности напряжений.

Key words: cutting mechanics, fracture mechanics, normal separation, transverse shear, crack, cutting of non-metallic materials, processing of brittle materials, cutting resistance, stress intensity factor.

Мисиров Мухамад Хусаинович – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик

Тел.: 8 928 718 26 01

E- mail: misir56@mail.ru

Misirov Mukhamad Khusainovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik

Tel.: 8 928 718 26 01

E- mail: misir56@mail.ru

Введение. Вопрос о характере разрушения при резании хрупких неметаллических материалов является одним из главных в механике резания. Это обусловлено тем, что от характера разрушения зависит как энергоемкость механической обработки, так и другие технологические параметры. Многочисленные исследования показывают, что пласт почвы может отделяться как путем отрыва под действием нормальных растягивающих напряжений, так и путем сдвига под действием касательных сдвигающих напряжений. Надо отметить, что единого мнения по этому вопросу еще нет.

Практические данные свидетельствуют, что при разрушении отрывом силы резания ниже, чем при разрушении сдвигом, хотя теоретического объяснения данного факта нет.

В данной работе сделана попытка оценить силы сопротивления резанию при разрушении режущим клином путем отрыва и сдвига пласта хрупкого неметаллического материала.

Для этого необходимо разработать математическую модель механики процесса резания для определения напряженного и деформированного состояния (НДС), используя положения механики резания и разрушения.

Постановка задачи, исходные предпосылки и допущения. Рассматриваемая задача теории резания с исходными данными и допущениями в общем виде сформулирована в работе [1,2], как задача механики разрушения. Расчетная схема нагружения и направления развития разрушения стружки сечением

ab и длиной ℓ под действием силы резания R представлена на рис. 1. Сила R наклонена к поверхности резания под углом ω , который называется углом действия и теоретически может изменяться в следующих пределах $-90^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$. Угол действия ω при работе почвообрабатывающим клином с применяемыми на практике углами резания $\delta = 15 \dots 40^\circ$ изменяется в следующих пределах $\omega = 37 \dots 71^\circ$ [3,4]. В силу этого в расчетной модели принято данное направление силы R (рис. 1).

Сила R является равнодействующей сил резания и разложена на две составляющие: отрывающую силу $P_o = R \cdot \sin \omega$ и сдвигающую силу $P_{сд} = R \cdot \cos \omega$.

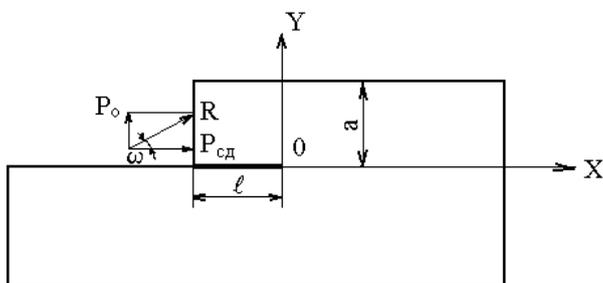


Рисунок 1 - Расчетная схема нагружения и развития разрушения

Задача состоит в определении НДС и предельного значения внешней нагрузки – силы резания $R = R_{max} = R_c$, по достижении которой трещина начинает распространяться, то есть происходит локальное разрушение.

Определение напряженно-деформированного состояния. В соответствии с линейной механикой разрушения, задачу определения разрушающей нагрузки R_c и НДС в общем случае, когда тело находится в сложном напряженном состоянии ($K_I(R, \ell) \neq 0$; $K_{II}(R, \ell) \neq 0$), можно разделить на несколько этапов:

- расчет K_I и K_{II} – текущих значений коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для трещины нормального отрыва и поперечного сдвига;
- нахождение из специальных экспериментов или из научно-технической литературы характеристик трещиностойкости материала – критических значений КИН при распространении трещины путем отрыва K_{IC} и поперечного сдвига K_{IIC} ;

- выбор критерия локального разрушения, то есть функции $F_2(K_I, K_{II}, K_{IC}, K_{IIC}) = 0$. Из этого соотношения определяется разрушающая нагрузка - R_c .

НДС в окрестности вершины трещины общего вида, используя принцип суперпозиции, можно представить как сумму напряженно-деформированных состояний отрыва и поперечного сдвига. Таким образом, задачу можно разложить на две, что графически представлено на рис. 2.

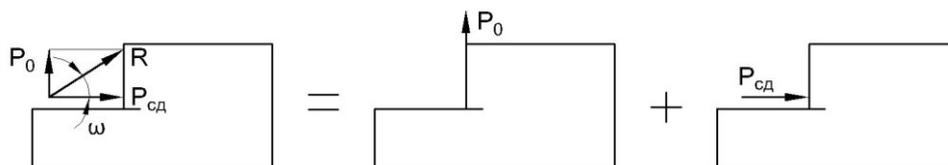


Рисунок 2 – Схема решения задачи при $\omega \geq 0$

НДС в окрестности вершины рассматриваемой трещины определяется тремя компонентами тензора упругих напряжений σ_r, σ_θ и $\tau_{r,\theta}$ и двумя составляющими вектора перемещений v_r и v_θ в полярной системе координат (рис. 3) r, θ , с полюсом в вершине трещины θ и полярной осью, направленной по касательной к контуру трещины в ее вершине.

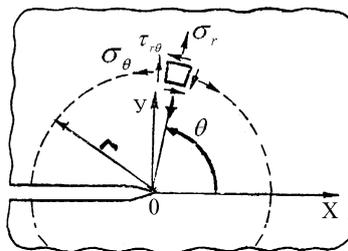


Рисунок 3 – Компоненты напряжений около вершины трещины

Известно, что величина напряжений контролируется только значениями КИН. Он однозначно определяет НДС в вершине трещины и является основной расчетной характеристикой механики разрушения [5,6]. Определение КИН является самостоятельной задачей теории трещин. Текущее значение КИН при отрыве K_I определяется выражением [7]:

$$K_I = \frac{P_o}{0,1933 \cdot b \cdot \sqrt{a}} \quad (1)$$

Текущее значение КИН для трещины сдвига K_{II} приведено в работе [2,7]:

$$K_{II} = \frac{P_{co}}{\sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{a}} \quad (2)$$

Основным теоретическим результатом разработанной модели резания являются уравнения (1) и (2). Из предложенной модели вытекает ряд практических следствий.

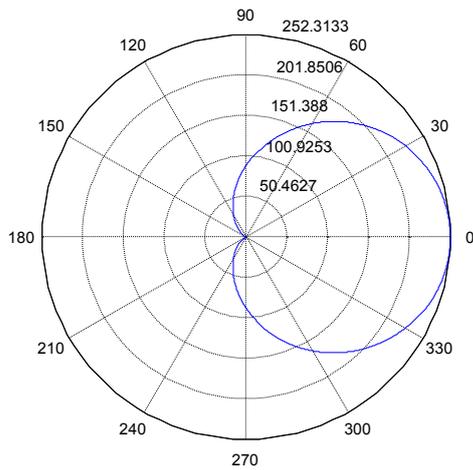
Практическое приложение полученных результатов. Подставляя численные значения коэффициентов интенсивности напряжений K_I и K_{II} из формул (1) и (2), в соотношения, описывающие поля напряжений около вершины трещины [6], можно представить картину количественного распределения упругих напряжений в вершине трещины общего вида, т.е. в зоне резания.

Распределение напряжений σ_r, σ_θ и $\tau_{r\theta}$ в вершине трещины общего вида имеет следующий вид:

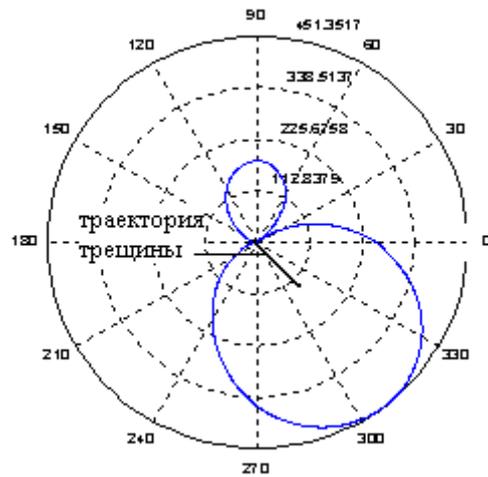
$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \left(\frac{P_o}{0,1933 \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{2\pi r}} \right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 - \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] + \left(\frac{P_{co}}{\sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{2\pi r}} \right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - 3 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right], \\ \sigma_\theta &= \left(\frac{P_o}{0,1933 \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{2\pi r}} \right) \cos^3\left(\frac{\theta}{2}\right) - \left(\frac{P_{co}}{\sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{2\pi r}} \right) 3 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right), \\ \tau_{r\theta} &= \left(\frac{P_o}{0,1933 \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{2\pi r}} \right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + \left(\frac{P_{co}}{\sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{2\pi r}} \right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - 3 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Графическое распределение окружных напряжений в вершине трещины, в полярной системе координат представлено на рис. 4.

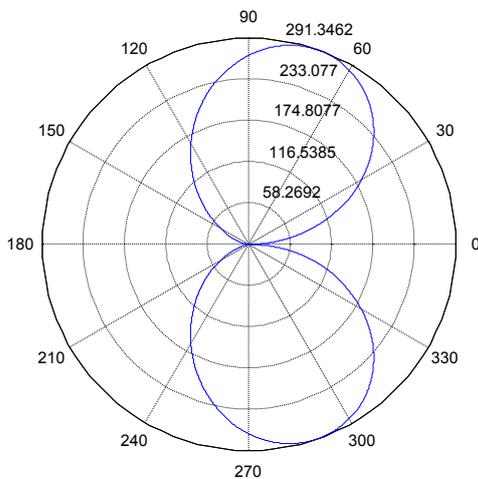
Зная значения КИН, также можно определить перемещения в вершине трещины.



1)



2)



3)

Рисунок 4 - Распределение окружных напряжений σ_θ в окрестности вершины трещины:

1) $K_I > 0, K_{II} = 0$;

2) $K_I = K_{II} > 0$;

3) $K_I = 0, K_{II} > 0$.

Графическое представление распределения окружных напряжений можно использовать для наглядного определения направления (угол θ_c на рис. 3) роста начальной траектории трещины. Для этого используют критерий максимальных окружных напряжений σ_θ , заключающийся в следующем: окружные растягивающие напряжения направлены по нормали к радиусу вектору r , соответственно трещина будет расти в направлении радиуса вектора, для которого напряжения σ_θ имеют максимум.

Например, для схем 1 и 2 на рис.4 угол θ_c , соответственно, равен 0 и 55 градусам. Траекторию трещины важно учитывать при оценке качества обработанной поверхности, например, трещиноватости поверхности.

Заменив отрывающую и сдвигающую силы равнодействующей силой R (см. рис.1) соотношения (1) и (2) можно представить в следующем виде:

$$K_I = \frac{R \cdot \sin \omega}{0,1933 \cdot b \cdot \sqrt{a}} = 5,17 \cdot \sin \omega \cdot \frac{R}{b \cdot \sqrt{a}} \quad (4)$$

$$K_{II} = \frac{R \cdot \cos \omega}{\sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{a}} = 0,71 \cdot \cos \omega \cdot \frac{R}{b \cdot \sqrt{a}} \quad (5)$$

Графическое представление данных соотношений показано на рис. 5.

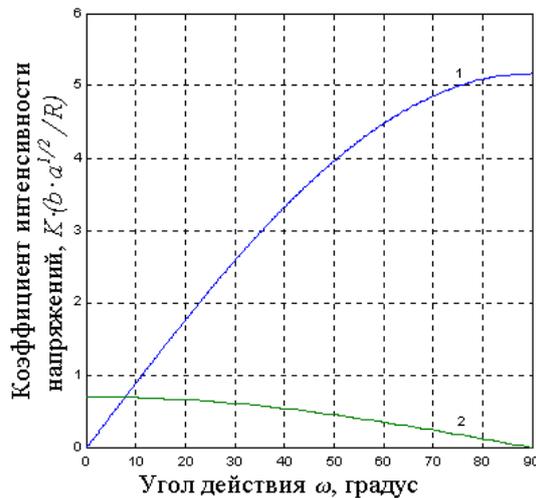


Рисунок 5 - Зависимость текущего значения КИН от угла действия ω .

1 - при нормальном отрыве K_I ;

2 - при поперечном сдвиге K_{II} .

Из формул (4) и (5) получаем, что $K_I = 7,28 \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot K_{II}$. Из данного соотношения следует, что при условии $P_{\omega} = 7,316 \cdot P_o$ или при угле действия, равном $\omega = 0,1359 \text{ рад.} = 7^{\circ} 47'$ текущие значения КИН K_I и K_{II} равны $K_I = K_{II}$.

Определим величину разрушающей нагрузки (силы резания) при разрушении отрывом и сдвигом. Для этого используем критерии локального разрушения.

Имеется силовой критерий разрушения отрывом $K_I = K_{IC}$ и сдвигом $K_{II} = K_{IIC}$, т.е. разрушение происходит тогда, когда коэффициенты интенсивности напряжений K_I и K_{II} достигают критической величины, соответственно, K_{IC} , K_{IIC} . Максимальную разрушающую силу отрывом можно определить из выражения (1):

$$P_{o \max} = 0,1933 \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot K_{IC} \quad (6)$$

Максимальную разрушающую силу сдвигом определяем из формулы (2):

$$P_{\omega \max} = \sqrt{2} \cdot b \cdot \sqrt{a} \cdot K_{IIC} \quad (7)$$

Сравним силу разрушения – резание для двух граничных значений угла действия $\omega = 0$ и $\omega = 90^\circ$. В первом случае разрушение происходит путем чистого сдвига (отрывающая составляющая силы резания отсутствует), и сила резания оценивается формулой (7). Во втором варианте разрушение происходит путем чистого отрыва, и сила резания определяется формулой (6). Используя соотношения (6) (7), запишем:

$$\frac{P_{cd\ max}}{P_{o\ max}} = \frac{7,3K_{IC}}{K_{IC}} \quad (8)$$

Используя графические данные на рис. 5 для угла $\omega = 0,1359\ rad. = 7^\circ 47'$ можно в первом приближении (8) записать: $P_{cd\ max} \cong 7,3 \cdot P_{o\ max}$. Отсюда следует, что максимальная разрушающая сила имеет место при сдвиге. При разрушении отрывом сила резания имеет минимальное значение. Максимальная и минимальная разрушающие силы разнятся более, чем в 7 раз.

Формулы (6) и (7) можно использовать для определения критических значений КИН.

Для корректного определения значения K_{IC} по формуле (7) в процессе резания необходимо, чтобы отрывающая сила $P_o = R \cdot \sin \omega$ отсутствовала, т.е. угол действия $\omega = 0$. Данное требование выполняется, если передний угол режущего клина и угол трения пары «резец – обрабатываемый материал» равны.

Этот результат модели положен в основу нового способа по определению критического коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге твердого тела. Предложенный способ определения критического значения КИН запатентован [8].

Выводы. 1. Разработана математическая модель разрушения хрупких неметаллических материалов при механической обработке. Она позволяет определять НДС в зоне резания, силу сопротивления резанию, начальную траекторию трещины.

2. Получены соотношения, описывающие количественное распределение напряжений вблизи вершины трещины (в зоне резания).

3. По формулам (6,7) можно определить максимальную разрушающую силу - силу сопротивления резанию при разрушении, соответственно, отрывом и сдвигом.

4. Теоретически показано, что при разрушении отрывом силы резания значительно ниже, чем при разрушении сдвигом.

5. Полученные формулы позволяют проводить ранжирование материалов по сопротивляемости резанию по величине K_{IC} и K_{IIc} .

6. Из разработанной математической модели следует условие деформации чистого сдвига. Этот результат модели положен в основу запатентованного способа (патент РФ № 2650613) по определению КИН при поперечном сдвиге твердого тела.

Литература

1. Мисиров М.Х. Исследование напряженно-деформированного состояния при резании хрупких материалов // «Современные проблемы машиностроения»: Сборник научных трудов II Международной научно-технической конференции, Томск: Изд-во ТПУ. 2004. С. 493-497.

2. Мисиров М.Х., Габаев А.Х., Мисирова А.М. Определение коэффициента интенсивности напряжений для задач механики резания // «Высокие технологии в современной науке и технике». ВТСНТ-2014: Сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2014. С. 359-363.

3. Мисиров М.Х., Канкулова Ф.Х. Определение условий для разрушения отрывом и сдвигом при резании почв и грунтов клином // АгроЭкоИнфо. 2018. №1. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/1/st_145.doc

4. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс. 2008. 266 с.

5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

6. Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. Механика разрушения и прочность материалов. В 4-х т. п/р Панасюка

В.В. Т. 2. Киев: Наукова думка. 1988. 620 с.

7 Мисиров М.Х., Тарчокова М.А., Мисирова А.М. Определение коэффициента интенсивности напряжений для трещины отрыва и сдвига в задачах резания. //Актуальные проблемы и приоритетные инновационные технологии развития АПК региона: материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов. Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ. 2015. С. 243-246.

8. Патент 2650613, МПК 7 G01N 3/24 (2006.01) Российская Федерация. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге твердого тела /А.К. Апажев, М.Х. Мисиров, А.Х. Габеев, А.М. Мисирова. №2017109045; заявл. 17.03.2017; опубл. 16.04.2018, Бюл. №11. 8 с.: ил.

References

1. Misirov M.KH. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri rezanii khrupkikh materialov // «Sovremennyye problemy mashinostroyeniya»: Sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii - Tomsk: Izd-vo TPU. -2004.- S. 493-497.

2. Misirov M.KH., Gabayev A.KH., Misirova A.M. Opredeleniye koeffitsiyenta intensivnosti napryazheniy dlya zadach mekhaniki rezaniya // «Vysokiye tekhnologii v sovremennoy nauke i tekhnike». VTSNT-2014: Sbornik nauchnykh trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2014. S. 359-363.

3. Misirov M.KH., Kankulova F.KH. Opredeleniye usloviy dlya razrusheniya otryvom i sdvigom pri rezanii pochv i gruntov klinom // AgroEkoInfo. 2018, №1. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/1/st_145.doc

4. Panov I.M., Vetokhin V.I. Fizicheskiye osnovy mekhaniki pochv. Kiyev: Feniks. 2008. 266 s.

5. Cherepanov G.P. Mekhanika khrupkogo razrusheniya. M.: Nauka. 1974. 640

S.

6. Savruk M.P. Koeffitsiyenty intensivnosti napryazheniy v telakh s treshchinami. Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov. V 4-kh t. p/r Panasyuka V.V. T. 2. Kiyev: Naukova dumka. 1988. 620 s.

7 Misirov M.KH., Tarchokova M.A., Misirova A.M. Opredeleniye koeffitsiyenta intensivnosti napryazheniy dlya treshchiny otryva i sdviga v zadachakh reza-niya. //Aktual'nyye problemy i prioritetye innovatsionnyye tekhnologii raz-vitiya APK regiona: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konfe-rentsii prepodavateley, aspirantov, magistrantov i studentov. Nal'chik: Ka-bardino-Balkarskiy GAU. 2015. S. 243-246.

8. Patent 2650613, MPK 7 G01N 3/24 (2006.01) Rossiyskaya Federatsiya. Spособ opredeleniya kriticheskogo koeffitsiyenta intensivnosti napryazheniy pri pope-rechnom sdvige tverdogo tela /A.K. Apazhev, M.KH. Misirov, A.KH. Gaba-yev, A.M. Misirova. №2017109045; zayavl. 17.03.2017; opubl. 16.04.2018, Byul. №11. 8 s.: il.