

Н.А. Харламова, М.А. Коновалова

# ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ ТРЕЩИН ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КЛИНОВОГО РЕЗЦА И ВЯЗКОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД

Показано, что метод индентирования позволяет не только определить коэффициенты вязкости (трещиностойкости) литологических разностей соляной породы, но и использовать полученные значения для оценки размеров трещин под резцом. Этим методом измерены коэффициенты вязкости сильвина, галита и карналлита. Получена формула для расчета размеров трещин между линиями резов в этих породах. После эксперимента по вдавливанию наконечника резца Дб.22 в качестве индентора в соляную породу в нее введена поправка. Эта расчетная формула связывает между собой параметры резца — ширину режущей кромки и угол заострения, усилие резания и вязкость породы. На основании полученной аналитической зависимости построены трехмерные графики для сильвина галита и карналлита. Графики иллюстрируют зависимость длины трещин от вышеназванных параметров. Используя полученную зависимость, можно смоделировать пространственное распределение и параметры микронарушений соляной породы в результате действия на нее резцового инструмента. В перспективе определять оптимальные глубину, шаг и схему резания для конкретного резца.

Ключевые слова: метод индентирования, вязкость разрушения, соляные породы, резец, трещины, графики.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-204-209

Влияние геометрических параметров резца на режимные параметры исполнительных органов, усилия резания, энергоемкость, долговечность резцов анализировали в работах [1, 2, 3, 4, 5]. Исследований, результатом которых была бы аналитическая, или графическая зависимость, связывающая физические свойства соляной породы, геометрические параметры резца, усилия резания и микроразрушения под резцом не обнаружено. Система трещин в области следа от резца позволяет оценить эффективность разрушения, прогнозировать схему и режимы резания, выход мелких фракций.

Резцы различных типов (например клиновые — Дб.22, цилиндрические — РКС) создают определенную систему трещин на поверхности обрабатываемого вещества.

Тангенциальный (клиновый) резец обладает ориентированным эффектом разрушения и предпочтительнее с точки зрения эффективности разрушения, поэтому исследования проводили с резцами такого типа. Трещины вокруг следа от резца тангенциального типа можно разбить на две группы: сеть трещин под следом и трещины расходящиеся кустом от краев следа.

В данной работе была поставлена задача выяснить, как зависит длина трещин в валиках между линиями резов от ширины режущей кромки, угла заострения для сильвинита, каменной соли и карналлита. Появится возможность прогнозировать нарушения материала при резании вокруг следа от резца, и можно заранее задавать максимальное или, наоборот, минимальное нарушение поверхностного слоя, выбрать соответствующий резец, схему резания.

Для решения этой задачи был выбран метод определения вязкости разрушения (трещиностойкости) индентированием [6]: в полированную поверхность образца вдавливают индентор в форме пирамиды (индентор Виккерса). Нагрузку подбирают таким образом, чтобы после вдавливания в поверхность образца из вершин отпечатка шли трещины рис. 1. Из существующих методов определения вязкости разрушения метод индентирования, пожалуй, единственный, который позволяет сравнить сопротивление распространению трещины у набора структурных разностей соляной породы.

Образцы для испытаний были отобраны из подстилающей каменной соли, сильвинита и карналлита Верхнекамского калийного месторождения. Для испытаний использовали образцы с различным размером зерна и разной окраски. Метод индентирования использовали в комплексе с дополнительными экспериментами по вдавливанию наконечника резца (как индентора) при фиксированной нагрузке.

Коэффициент трещиностойкости (вязкости разрушения), обозначаемый  $K_{1c}$  определяют по формуле

$$K_{1c} = \frac{2,3 \cdot \sin \theta \cdot P}{\Phi \cdot (a)^{3/2}} \cdot \lg \frac{4,5 \cdot a}{C_r}, \quad (1)$$

где  $\theta$  — угол между нормалью к поверхности и гранью индентора;  $P$  — нагрузка на индентор;  $2a$  — длина диагонали от-

печатка;  $C_r$  — половина длины трещины;  $\Phi$  — постоянная.  $\Phi \approx 3$  для многих материалов.

Значения коэффициента вязкости разрушения для галита, сильвина и карналлита получены методом индентирования в работе [7]. Средние значения для сильвина, галита и карналлита 3,5, 1,3 и 0,27 МПа м<sup>1/2</sup> соответственно.

Чтобы результаты расчета размера трещин между линиями резов от резца соответствовали их значениям, полученным методом индентирования, проводили эксперимент по вдавливанию наконечника резца ДБ.22 в качестве индентора в соляную породу при фиксированной нагрузке. Вдавливание проводили на установке Роквелл при нагрузках 60, 100 и 150 кг. Измеряли длину отпечатка индентора и длину отходящих от краев отпечатка трещин. После измерения длины трещин, отходящих из углов отпечатка кромки резца и длины самого отпечатка по формуле

$$\Phi \cdot K_{1c} = \frac{2,3 \cdot \sin \theta \cdot P}{(b/2)^{3/2}} \cdot \lg \frac{4,5 \cdot b/2}{C_r},$$



Рис. 1. Отпечаток индентора в форме пирамиды на полированной поверхности образца соляной породы:  $2a$  — длина диагонали отпечатка;  $2C_r$  — длина трещины

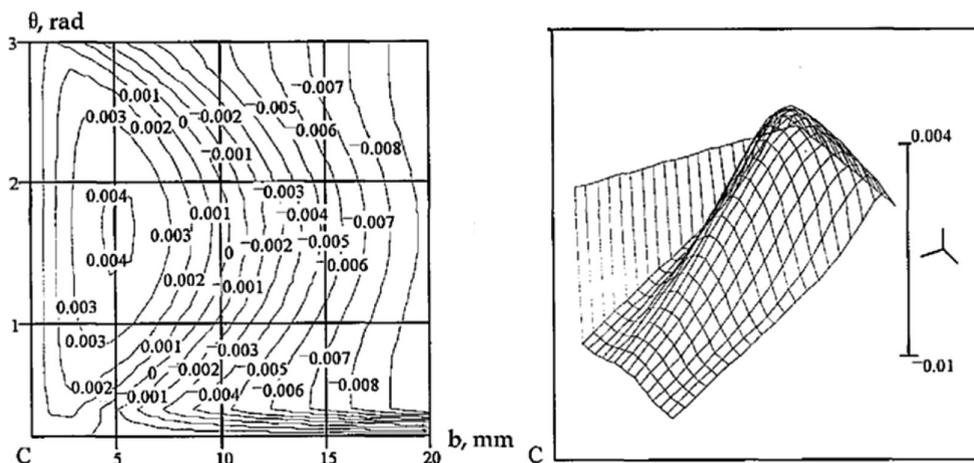


Рис. 2. Зависимость длины трещин  $C$  между линиями резов от ширины режущей кромки  $b$  и угла заострения  $\theta$  в сильвине

где  $b$  — ширина режущей кромки, определили значение произведения  $\Phi \cdot K_{1c}$ . Средние значения  $\Phi \cdot K_{1c}$  для сильвина, галита и карналита получили соответственно 4,6, 3,6 и 1 МНм<sup>-3/2</sup>.

Чтобы произвести обратный расчет длины трещин для реальных условий резания необходимо знать зависит ли коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1c}$  от скорости движения резца (индентора) и учесть усилие резания  $P$ .

В работе [8] было доказано, что значение коэффициента интенсивности на-

пряжений не зависит от скорости движения индентора в интервале 0,005–10 мм/мин. Для оценки влияния более высокой скорости движения индентора на численное значение  $K_{1c}$  и  $\Phi \cdot K_{1c}$  в работе [7] проводился дополнительный эксперимент динамического воздействия клинового резца на соляную породу. По результатам этого эксперимента порядок величины  $\Phi \cdot K_{1c}$  остался тем же, а численное значение лежит в пределах разброса этой величины в полученной серии измерений. В этой же работе

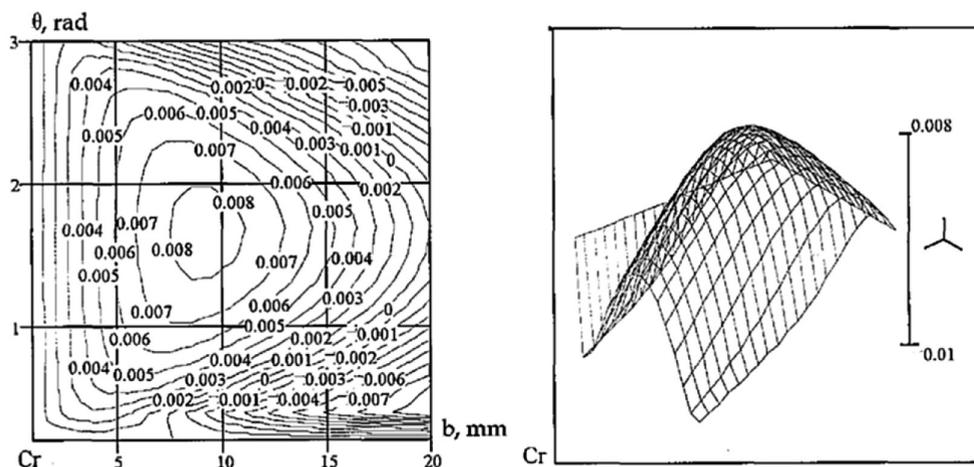


Рис. 3. Зависимость длины трещин  $C$ , между линиями резов от ширины режущей кромки  $b$  и угла заострения  $\theta$  в галите

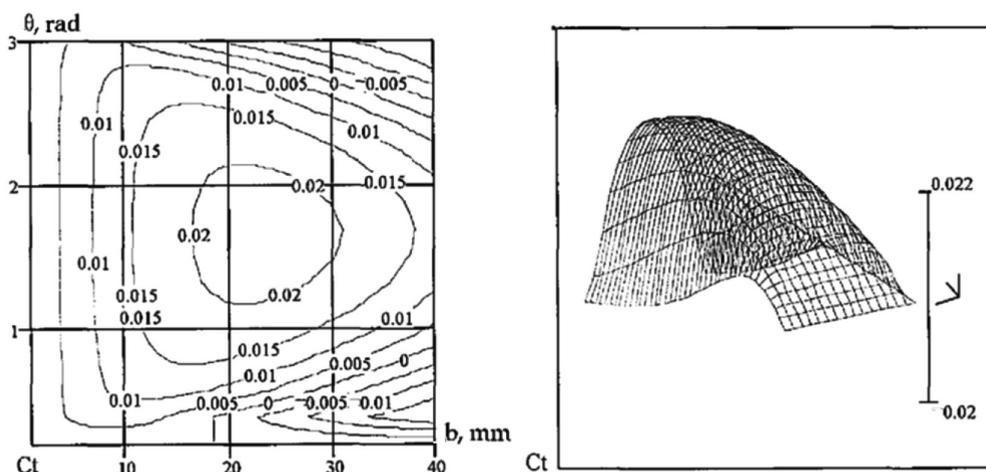


Рис. 4. Зависимость длины трещин  $C_t$  между линиями резов от ширины режущей кромки  $b$  и угла заострения  $\theta$  в карналлите

определены значения нагрузки — как усилия резания  $Z$ . Учет зависимости усилия резания от ширины режущей кромки и угла заострения провели по формуле [9]

$$Z = A_p \cdot h^n_{cp} \cdot K_b \cdot K_a \cdot K_{(t-b)/h}, \text{ кГ},$$

где  $K_p = 0,3 + 0,35 \cdot b$ ;  $K_a = 0,55 + 0,009 \cdot \alpha_p$   
 В расчетах угол резания  $\alpha$  заменен на угол  $\theta + 0,2 \cdot \theta$ ,  $\theta$  — угол заострения.

$A_p$  — сопротивляемость резанию, равна усилию, приходящемуся на 1 см глубины резания. Сопротивляемость резанию взяли равной 3000 Н (из результатов стендовых испытаний);  $h = 1$  см,  $K_{(t-b)/h} = 0,7$  (для толщины 1 см и средних значений  $b = 10$  мм и  $t = 30$  мм).

Расчет длины трещин проводили по формуле

$$c_{ij} = \frac{4,5 \cdot 0,5 \cdot b_i}{10^{r_{ij}}} - 0,5b_i$$

где  $r_{ij} = \frac{(0,5b_i)^{3/2} \cdot \Phi \cdot K_{1c}}{Z \cdot 2,3 \cdot \sin \theta_j}$ .

Результат в графической форме представлен на рис. 2, 3, 4. Отрицательные значения на графике означают: возникающая под резцом трещина не выходит за пределы кромки резца и не проникает в валик между линиями резов.

Резцы, с геометрическими параметрами, лежащими правее нулевой изолинии, являются неэффективными.

Размеры трещин, возникающих при работе клиновых резцов с разной шириной режущей кромки и с разными углами заострения на рис. 2, 3, 4. Длина трещины (в метрах) указана по вертикальной оси. Угол заострения  $\theta$  указан в радианах, длина режущей кромки  $b$  — в миллиметрах. Все испытания и расчеты произведены для одиночного, острого стандартного резца.

В перспективе, для определения оптимальных глубины, шага и схемы резания можно смоделировать пространственное распределение и параметры микроразрушений соляной породы в результате действия на нее режцового инструмента. Можно выяснить, насколько рыхлой становится порода вокруг следа от резца. Это, в конечном счете, влияет на выход мелких фракций и усилия резания. Полученная зависимость связывает вязкость разрушения соляной породы, усилия резания и геометрические параметры резца. Уточняя и корректируя ее можно прогнозировать эффективность работы конкретных резцов для конкретных усилий, режимов и схем резания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В. В. и др. Обоснование параметров и выбор резцов исполнительного органа проходческоочистного комбайна для добычи калийных руд // Горное оборудование и электромеханика. — 2010. — № 4. — С. 6–9.
2. Нескромных В. В., Борисов К. И. Аналитическое исследование процесса резания-скальвания горной породы долотом с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323. — № 1. — С. 191–192
3. Павлыш В. Н., Стеблин В. В., Топчий С. Е., Гродзинский П. Я. Исследование характеристик режущих инструментов исполнительных органов современных горных машин // Прогресивні технології і системи машинобудування. — 2014. — № 2(48).
4. K. Pradeep Kumar Mouli, Srinivasa Rao Nandam, P. Vijay Kumar Raju, G. Appala Raju, A. Chandrakanth. Optimization of Cutting Tool Geometry by CAE Approach for Titanium Alloy // 1P 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India, P. 667–1, 667–6
5. Zhang Qianqian<sup>1</sup>, Han Zhennan<sup>1</sup>, Zhang Mengqi<sup>2</sup>, Zhang Jianguang<sup>2</sup> Prediction of Tool Forces in Rock Cutting using Discrete Element Method. 1 College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China. 2 Taiyuan Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China 2015. Pp. 1607–1725.
6. Тюрин А. И., Шуварин И. А., Пирожкова Т. С., Купряшкин А. М. Влияние масштабного фактора и типа индентора на критерии корректного определения вязкости разрушения при динамическом микро и наноиндентировании // Вестник ТГУ. — 2013. — Т. 18. — вып. 4. — С. 1593–1594.
7. Харламова Н. А. Исследование механизма разрушения горных пород резцовым инструментом: дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. — Пермь, 1998. — С. 110–112.
8. Зильбершмидт В. Г., Титов Б. В. Зависимость вязкости разрушения каменной соли от скорости деформирования // Известия вузов. Горный журнал. — 1987. — № 8. — С. 5–7.
9. Бреннер В. А., Жабин А. Б., Щеголевский М. М. и др. Щитовые проходческие комплексы. — М.: изд-во «Горная книга», 2009. — 447 с. **ИДБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Харламова Нэлли Артемьевна<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент, e-mail: Nellia59@yandex.ru,

Коновалова Мария Алексеевна<sup>1</sup> — ассистент, e-mail: mashkin\_\_@mail.ru,

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 4, pp. 204–209.

N.A. Kharlamova, M.A. Konovalova

## DEPENDENCE OF FRACTURE LENGTH ON WEDGE CUTTER BIT GEOMETRY AND VISCOSITY OF SALT ROCKS

The review of the existing publications shows that they analyze the influence exerted by the cutter geometry on the operating conditions of cutting tools, on the cutting force, energy consumption of cutting and on the life of cutters. There are no studies aimed to connect physical properties of salt rocks, geometry of cutters, cutting force and microfailure of rocks under a cutter. In the meanwhile, based on the system of cracks generated by cutters between the cutting lines, it is possible to assess the efficiency of destruction and to project a pattern and conditions of cutting, and to predict the yield of fines. It is demonstrated that using the method of indentation allows determining fracture toughness coefficients of lithological varieties of rocks, which are applicable to evaluation of sizes of cracks under a cutter. Using the said methods, the fracture toughness coefficients are obtained for sylvinitite, halite and carnallite. The formula is obtained to calculate sizes of cracks between cutting lines in these rock types. After the test indentation of cutter D6.22 in salt rocks, the formula is

amended. The resultant calculation formula connects the cutter geometry, namely, the cutting edge width and cutter angle, with the cutting force and viscosity of rocks. This analytical dependence is used to plot 3D graphs for sylvinite, halite and carnallite. The graphs illustrate the relationship between the length of a crack and the listed parameters. The obtained analytical dependence allows modeling spatial distribution and sizes of microfailures in salt rocks through the action of a cutting tool. In the long term, it is planned to determine the optimal depth, spacing and pattern of cutting per specific cutter.

Key words: indentation method, fracture toughness, salt rocks, cutter, cracks, graphs.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-204-209

## AUTHORS

Kharamova N.A.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: Nella59@yandex.ru, Konovalova M.A.<sup>1</sup>, Assistant, e-mail: mashkin\_\_@mail.ru, <sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia.

## REFERENCES

1. Semenov V.V. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2010, no 4, pp. 6–9.
2. Neskromnykh V.V., Borisov K.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013, vol. 323, no 1, pp. 191–192
3. Pavlysh V.N., Steblin V.V., Topchiy S.E., Grodzinskiy P.Ya. *Progresivni tekhnologii i sistemi mashinobudovannya*. 2014, no 2(48).
4. K. Pradeep Kumar Mouli, Srinivasa Rao Nandam, P. Vijay Kumar Raju, G. Appala Raju, A. Chandrakanth. Optimization of Cutting Tool Geometry by CAE Approach for Titanium Alloy. 1P 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12–14, 2014, IIT Guwahati, Assam, India, P. 667–1, 667–6
5. Zhang Qianqian<sup>1</sup>, Han Zhennan<sup>1</sup>, Zhang Mengqi<sup>2</sup>, Zhang Janguang<sup>2</sup> *Prediction of tool forces in rock cutting using discrete element method*. 1 College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China. 2 Taiyuan Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China 2015. Pp. 1607–1725.
6. Tyurin A.I., Shuvarin I.A., Pirozhkova T.S., Kupryashkin A.M. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013, vol. 18, no 4, pp. 1593–1594.
7. Kharamova N.A. *Issledovanie mekhanizma razrusheniya gornyx porod reztsovyim instrumentom* (Research of the mechanism of rock breaking with a tool), Candidate's thesis, Perm, 1998, pp. 110–112.
8. Zil'bershmidt V.G., Titov B.V. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1987, no 8, pp. 5–7.
9. Brenner V.A., Zhabin A.B., Shchegolevskiy M.M. *Shchitovye prokhdcheskie komplekсы* (Shield tunneling complexes), Moscow, izd-vo «Gornaya kniga», 2009, 447 p.

## FIGURES

Fig. 1. Indentation in the form of a pyramid on the polished surface of a salt rock specimen. 2a—diagonal length of the indentation, 2Cr—crack length.

Fig. 2. Relationship of the crack length C between cutting lines, the cutting edge width b and the cutter angle  $\theta$  in sylvinite.

Fig. 3. Relationship of the crack length Cr between cutting lines, the cutting edge width b and the cutter angle  $\theta$  in halite.

Fig. 4. Relationship of the crack length Ct between cutting lines, the cutting edge width b and the cutter angle  $\theta$  in carnallite.

