

УДК 622.23.054

КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЛИПТИЧЕСКОМ РАБОЧЕМ ИНСТРУМЕНТЕ МАШИНЫ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТОВ

Афанасьев А.И., Федосеев А.П.

*ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru, fedoseev48@mail.ru*

Работоспособность инструментов ударного действия при контактном взаимодействии и протекании деградационных процессов усталостного характера в значительной степени зависит от напряженно-деформированного состояния (НДС) поверхностного слоя пар трения, формируемого при изготовлении, и динамики его изменения в процессе работы. Прочность горной породы является основным показателем, который определяет конструктивные параметры рабочего инструмента и энергоемкость процесса разрушения. Основными прочностными характеристиками для большинства горных пород являются прочность на сжатие, сдвиг, растяжения. Отсюда следует важный вывод, что наиболее эффективными будут те машины, у которых при взаимодействии рабочих органов с массивом горной породы в нем (массиве) возникают напряжения сдвига или растяжения. В работе приводится расчет контактных напряжений в эллиптическом рабочем инструменте машины для разрушения негабаритов. Методом конечных элементов производится проверка достоверности полученных уравнений. Приводятся результаты расчетов, которые подтверждают адекватность модели.

Ключевые слова: контактные напряжения, прочностные характеристики, негабариты горных пород, радиус кривизны, конструктивные параметры, усилия, площадка контакта, рабочий орган, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние (НДС), адекватность модели

CONTACT TENSION IN THE ELLIPTIC ROCK CUTTING TOOL OF THE MASINE FOR CRUSHING OF THE HUGE ROCK

Afanasyev A.I., Fedoseev A.P.

Ural state mining University, Yekaterinburg, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru, fedoseev48@mail.ru

Operability of instruments of shock action at contact interaction and course the degradatsionnykh of processes of fatigue character substantially depends on the intense the deformed state (IDS) of a blanket of couples of the friction formed at production, and dynamics of its change in work process. Durability of rock is the main indicator which determines design data of the working tool and power consumption of process of destruction. The main strength characteristics for the majority of rocks are durability on compression, shift, stretchings. From here the important conclusion follows that the most effective will be those cars which at interaction of working bodies with the rock massif in it (massif) have shift or stretching tension. In work calculation of contact tension is given in the elliptic working tool of the car for destruction of not dimensions. The method of final elements makes check of reliability of the received equations. Results of calculations which confirm adequacy of model are given.

Keywords: contact tension, strength characteristics, not dimensions of mountain breeds, curvature radius, design data, efforts, contact platform, working body, method of final elements, intense the deformed state (IDS), adequacy of model

В настоящее время известны следующие формы ударных инструментов: клин (двусторонний), долото, конус (пика), плоская сфера. Наиболее эффективной по энергоемкости и износостойкости при разрушении горных пород, особенно крепких (крепость по шкале М.М. Протодяконова 10 и выше), является сферическая форма [4, 2, 7]. Рабочий инструмент такой формы имеет достаточно высокий коэффициент передачи энергии негабариту.

С другой стороны, многие исследователи [1] отмечают, что наиболее эффективным по энергоемкости при направленном расколе негабаритных кусков горной породы является инструмент клиновидной или долотообразной формы. Однако этот инструмент имеет относительно большую интенсивность износа и, соответственно, невысокий ресурс.

Можно предположить, что еще более эффективной как по энергоемкости и износостойкости инструмента, так и по направ-

ленности удара и управления процессом разрушения может стать форма инструмента, контактная поверхность которого будет эллиптической формы, то есть некоторой промежуточной формой между клиновидной и сферической формой ударных инструментов. Следует отметить, что расчетов на статическую и усталостную прочность рабочего инструмента эллиптической формы в известной литературе нет.

Практика эксплуатации различных по форме рабочих инструментов показывает, что потеря работоспособности происходит из-за относительно больших контактных напряжений, которые возникают на площадке контакта его с горной породой. При превышении этими напряжениями предела текучести, выносливости или прочности может произойти питтинг, расклепывание, а также износ поверхности контакта.

В основе расчетов на контактную прочность лежит формула Герца [3, 5, 10]. Она достаточно точно определяет контактные

напряжения при взаимодействии тел с постоянными радиусами кривизны:

$$\sigma_{\text{н}} = A[PE^2\rho^{-2}]^{0,333} \quad (1)$$

где ρ – приведенный радиус кривизны рабочего инструмента, м;

E – приведенный модуль упругости материала рабочего инструмента и горной породы, Па;

P – усилие прижатия тел, Н;

A – постоянный коэффициент пропорциональности.

Формула 1 применима для расчета контактных напряжений при взаимодействии: шар-шар; цилиндр-шар; цилиндр-цилиндр(оси цилиндров перпендикулярны); шар-плоскость.

Модуль упругости горной породы является случайной величиной [2], имеющей коэффициент вариации до 30%. Для предлагаемого рабочего инструмента радиусы

кривизны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях не равны друг другу. Следовательно, осуществить точное решение уравнения Герца и аналитически определить контактные напряжения с необходимой степенью точности затруднительно. В данной работе предложено приближенное решение данной проблемы, основанное на законе сохранения энергии.

Согласно этому закону определим площадь контакта рабочего инструмента с ровной поверхностью куска горной породы. Объем эллипсоида контактных давлений ($2\pi ab\sigma_{\text{нmax}}/3$) равен силе давления (P) [10]:

$$\sigma_{\text{нmax}} = 1,5*P/\pi ab, \quad (2)$$

где a и b – полуоси эллипса площадки контакта рабочего инструмента с горизонтальной плоскостью, м (см. рис. 1).

На рис. 1 приведено сечение рабочего инструмента в двух плоскостях: $OA = R$; $OA_1 = r$.

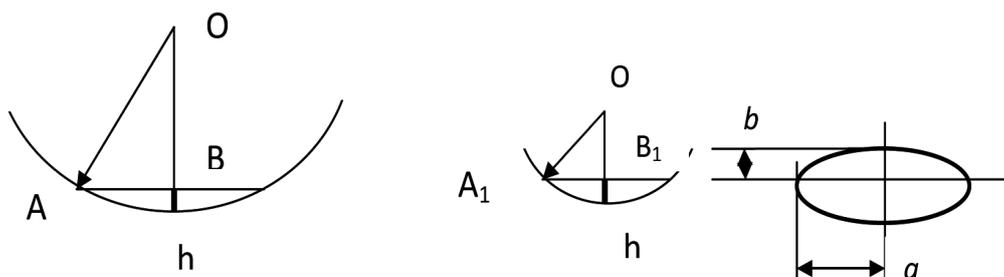


Рис. 1. Зависимость площади контакта при действии постоянной единичной силы от соотношения радиусов ударной части: 1 ряд – по теории Герца; 2 ряд – по методу конечных элементов

Площадка контакта рабочего инструмента в проекции на горизонтальную плоскость имеет форму эллипса с полуосями: $AB = a$ и $A_1B_1 = b$. Из прямоугольных треугольников OAB и OA_1B_1 можно определить a , b и, соответственно, площадь эллипса.

$$F_{\text{э}} = \pi a*b = \pi [4Rrh^2 - 2(R+r)h^3 + h^4]^{0,5}, \quad (3)$$

где h – величина заглупления рабочего инструмента, м.

Так как величина заглупления рабочего инструмента в горную породу на два-три порядка меньше радиусов, то вторым и третьим членом уравнения 3 можно пренебречь и его можно преобразовать к виду:

$$F_{\text{э}} \approx 2 \pi h(Rr)^{0,5} \quad (4)$$

Из формулы Герца следует [3,5,10], что радиус площадки при контакте шара с плоскостью равен:

$$a = A[PE^{-1}\rho]^{0,333} \quad (5)$$

С другой стороны, согласно рис. 1, этот радиус равен:

$$a = [R^2 - (R-h)^2]^{0,5} \quad (6)$$

Учитывая соотношение радиуса и величины заглупления, уравнение 5 можно преобразовать к виду:

$$a \approx (2Rh)^{0,5} \quad (7)$$

Определим величину заглупления из уравнения 7 и подставим её в уравнение 4. После преобразований получим:

$$h = (2R)^{-1}A^2[P^2E^{-2}\rho^2]^{0,333} \quad (8)$$

В работе [3] приведена формула Герца для определения сближения (в нашем случае заглупления) при статическом сжатии двух тел:

$$h = kP^{2/3} \quad (9)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Приравняв уравнения 7 и 8, получим величину коэффициента пропорциональности:

$$k = (2)^{-1} A^2 [E^{-2} \rho^{-1}]^{0,333} \quad (10)$$

Используя уравнение, приведенное в [10], а также уравнения 4 и 10, получим зависимость величины площади контакта рабочего инструмента эллиптической формы:

$$F_y = 3,76(Rr)^{0,5} [P^2 E^{-2} r^{-1}]^{0,333} \quad (11)$$

Если подставить в уравнение 10 $R = r$, что соответствует контакту сферы с плоскостью, то получится уравнение

$$F_{cf} = 3,76 [P^2 E^{-2} r^2]^{0,333} \quad (12)$$

Это уравнение получится, если решить совместно уравнения 2.27...2.29, приведенные в [6]. Это подтверждает известный факт, что сфера является частным случаем эллипсоида.

Используя результаты работы [5] и формулу 11, получим уравнение для определения максимальных контактных напряжений в эллипсоиде:

$$\sigma_{Hmax} = 0,4(Rr)^{-0,5} (PE^2 r)^{0,333} \quad (13)$$

Если подставить в уравнение 11 $R = r$, что соответствует контакту сферы с плоскостью, то получится известное [5] уравнение

$$\sigma_{Hmax,cf} = 0,4(PE^2 r^2)^{0,333} \quad (14)$$

Таким образом, уравнение 13 не противоречит теории Герца и позволяет определять контактные напряжения в эллипсоиде, а затем сравнить их с допускаемыми и сделать вывод о работоспособности или неработоспособности рабочего инструмента.

Осуществить экспериментальным методом проверку адекватности формул 11 и 13 практически невозможно. Это объясняется тем, что использовать тензометрию для замера контактных напряжений невозможно из-за относительно больших размеров тензодатчика. Минимальная длина активной части проволоочных или фольговых тензодатчиков равна 5 мм. Последний будет замерять средние по его длине напряжения, что существенно искажает общую картину распределения напряжений. Кроме того, установка тензодатчиков предполагает подготовку площадки, что существенно изменяет форму рабочей части инструмента.

Наиболее целесообразным и экономичным при проверке адекватности моделей будет апробированный метод конечных элементов [6, 8, 9].

На рис. 2 приведен график изменения площади эллиптической площадки контакта при действии на ударник постоянной единичной силы. Зависимость имеет нелинейный характер и показывает, что уменьшение радиуса кривизны одной из осей с 220 мм до 22 мм приводит к существенному уменьшению площади контакта при статическом нагружении, что не противоречит классической теории контактного взаимодействия.

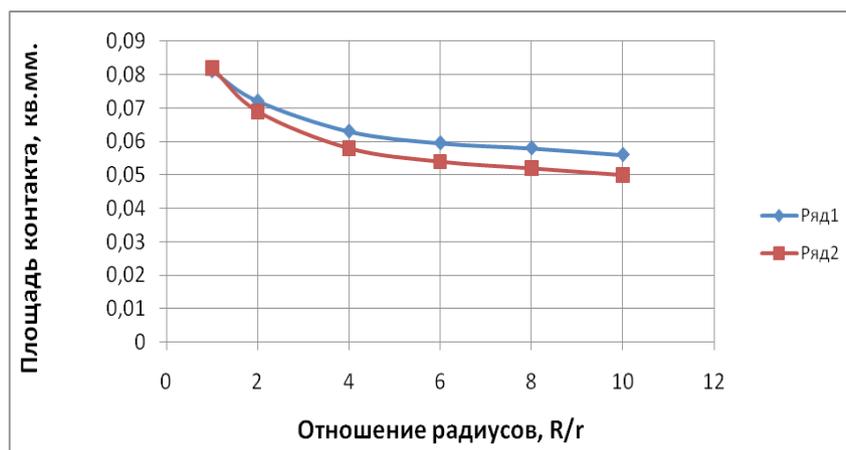


Рис. 2. Зависимость площади контакта при действии постоянной единичной силы от соотношения радиусов ударной части: 1 ряд – по теории Герца; 2 ряд – по методу конечных элементов

На рис. 3 приведена зависимость величины максимальных контактных напряжений в зависимости от размеров ударной части при действии постоянной силы такой

величины, которая для наиболее «острого» ударника обеспечивает максимальные контактные напряжения, равные пределу прочности разрушаемого материала (200 МПа).

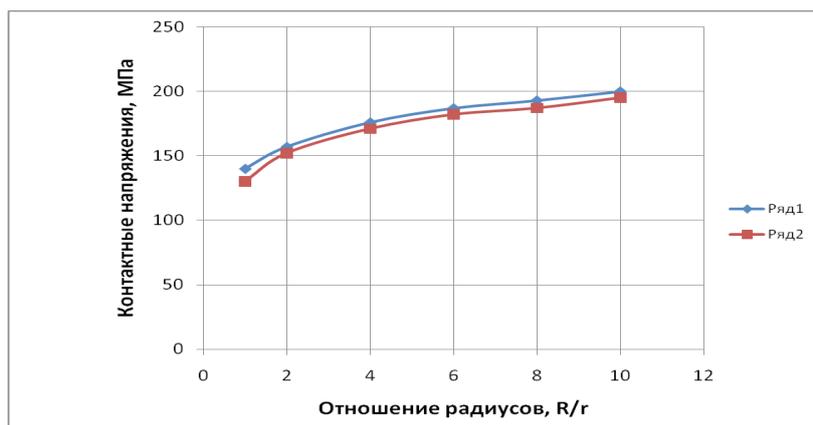


Рис. 3. Зависимость величины максимальных контактных напряжений (МПа) от размеров ударной части при постоянной силе взаимодействия
1 ряд – по теории Герца; 2 ряд – по методу конечных элементов

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что размеры площадей контакта рабочей части инструмента, а также контактные напряжения, определенные по теории Герца и методу конечных элементов имеют отличие не более 12%. Такое отличие приемлемо для инженерных расчетов.

Выводы

На основании теории Герца определена зависимость контактных напряжений в рабочей части инструмента, имеющем различные радиусы кривизны в рабочей части. Адекватность формулы для определения контактных напряжений подтверждена с помощью метода конечных элементов. Расхождение результатов не превышает 12%.

В результате численного решения задачи теории упругости о контактом взаимодействии стальной эллипсоидной ударной части инструмента с плоской гранью параллелепипеда, имитирующего негабарит, установлено, что отношение размера большой оси к размеру малой оси должно составлять 3,5.

Наибольший уровень напряжений, не превышающий 200 МПа, локализуется в зоне ударного взаимодействия инструмента и негабарита. В остальной части инструмента напряжения существенно ниже.

Список литературы

1. Афанасьев А.И., Костенчук С.Ф., Чиркова А.А. Исследование рабочего процесса импульсного двигателя в приводе рабочего органа горной машины. Известия Вузов. Горный журнал, 2006 г. №1 С. 110–115.
2. Барон Л.И., Хмельковский И.Е. Разрушаемость прочность горных пород свободным ударом. М.: Наука, 1971. – 168 с.
3. Беляев Н.М. Сопrotивление материалов. М.: Наука 1976. – 608 с.
4. Боярских Г.А., Симисин Д.И. Ретроспективный анализ исследований и предпосылки обеспечения надежности бурового инструмента//Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2009. № 7. С. 58-65.
5. Добровольский В.А. и др. Детали машин. М.: Машиностроение 1972. – 502с.
6. Митчелл Э., Уэйт Р. Метод конечных элементов для

уравнений с частными производными: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 216 с.

7. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1979.- 272 с.

8. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. – М.: Стройиздат, 1977. – 128 с.

9. Секулович М. Метод конечных элементов: Пер. с сербского – М.: Стройиздат, 1993. – 664 с.

10. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. . М.: Наука 1975. – 832с.

References

1. Afanasyev A.I., Kostenchuk S.F., Chirkova A.A. Issledovaniye rabocheho protsessa impulsnogo dvigatelya v privode rabocheho organa gornoy mashiny. Izvestiya Vuzov. Gornyy zhurnal, 2006 g. no. 1 pp. 110-115.
2. Baron L.I., Khmelkovsky I.Ye. Razrushayemost prochnost gornyykh porod svo-bodnym udarom. M.: Nauka, 1971, 168 p.
3. Belyaev N.M. Soprotivleniye materialov. M.: Nauka 1976.-608 p.
4. Boyarskikh G.A., Simisinov D.I. Retrospektivnyy analiz issledovaniy i pred-posylki obespecheniya nadezhnosti burovogo instrumenta//Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Gornyy zhurnal. 2009. no. 7. pp. 58-65.
5. Dobrovolsky V.A. i dr. Detali mashin. M.: Mashinostroyeniye 1972. – 502 p.
6. Mitchell E., Ueyt R. Metod konechnykh elementov dlya uravneny s chastnymi proizvodnymi: Per. s angl. – M.: Mir, 1981. –216 p.
7. Nikiforovsky V.S., Shemyakin Ye.I. Dinamicheskoye razrusheniye tverdykh tel. Novosibirsk: Nauka, 1979. – 272 p.
8. Rozin L.A. Metod konechnykh elementov v primenenii k uprugim sistemam. M.: Stroyizdat, 1977. – 128 p.
9. Sekulovich M. Metod konechnykh elementov: Per. s serbskogo – M.: Stroyizdat, 1993. – 664 p.
10. Filin A.P. Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruyemogo tela. . M.: Nauka 1975. – 832 p.

Рецензенты:

Неволин Д.Г., д.т.н., заведующий кафедрой «Проектирование и эксплуатация автомобилей», ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург;

Мальцев В.А., д.т.н., доцент, директор института материаловедения и металлургии, ФГАОУ ВПО им. первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 24.06.2014.