

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **23260**

(13) **С1**

(46) **2020.12.30**

(51) МПК

**G 01N 3/32** (2006.01)

(54) **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ  
ОБРАЗЦА ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

(21) Номер заявки: а 20190083

(22) 2019.03.25

(43) 2020.10.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого" (ВУ)

(72) Авторы: Степанкин Игорь Николаевич; Халецкий Андрей Васильевич; Ткачев Виктор Михайлович; Гутман Роман Евгеньевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого" (ВУ)

(56) ФИРСТОВ С.А. и др. Наука и инновации, 2010. - Т. 6. - № 5. - С. 7-18.

RU 2451282 С1, 2012.

ГОСТ 24941-81. Породы горные. Методы определения механических свойств нагружением сферическими инденторами.

НЕМЕЧЕК Й. Актуальные вопросы машиностроения. - 2017. - № 6. - С. 301-304.

WO 97/39333, 1997.

(57)

1. Способ определения предела прочности на сжатие образца горной породы, при котором в первом цикле вдавливают индентор переменного сечения непрерывно возрастающей нагрузкой до установленного максимального значения, после достижения которого прекращают вдавливание и производят разгрузку образца до нулевого значения нагрузки; не изменяя положения индентора, повторяют циклы вдавливания и разгрузки образца, обеспечивая в каждом последующем цикле дискретное увеличение максимального значения нагрузки, после достижения которого производят разгрузку образца, при этом строят зависимости величины нагрузки от глубины перемещения индентора для каждого цикла увеличения нагрузки до максимального значения и разгрузки; для каждого цикла вдавливания рассчитывают давление на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на текущую площадь контактной поверхности; для каждого цикла разгрузки рассчитывают давление на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на максимальную площадь контактной поверхности; в каждом цикле для одних и тех же глубин перемещения индентора рассчитывают разности между давлением на контактной поверхности в период увеличения нагрузки и давлением в период разгрузки, определяют максимальное значение разности указанных давлений для каждого цикла увеличения нагрузки и разгрузки образца; строят графическую зависимость полученных максимальных значений разностей давлений от максимальных значений нагрузок в циклах; на построенной графической зависимости определяют значение максимальной разности давлений, соответ-

вующее горизонтальному участку графика, и принимают предел прочности на сжатие образца равным этому значению.

2. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что площадь контактной поверхности рассчитывают исходя из геометрической формы индентора и величины его перемещения или принимают ее равной площади проекции индентора при его соответствующем положении.

---

Изобретение относится к физико-механическим испытаниям горных пород путем вдавливания индентора в поверхность образца и может быть использовано при инженерно-геологических изысканиях.

Известен способ определения прочности горных пород при объемном сжатии, для осуществления которого цилиндрический образец устанавливается в рабочую камеру объемного сжатия, в которой боковые поверхности образца нагружаются гидравлическим давлением постоянной величины со стороны рабочей жидкости, а торцовые поверхности - непрерывно возрастающей нагрузкой до разрушения образца с регистрацией величины нагрузки в момент разрушения материала образца, с последующим вычислением предела прочности материала горной породы путем деления величины разрушающей нагрузки на площадь поперечного сечения образца [1].

Недостатком данного способа является однократное использование образца, не позволяющее проводить повторные исследования материала образца с целью повышения точности результата испытания.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому является способ определения прочностных характеристик материалов, включающий вдавливание в материал индентора переменного сечения с нарастающей нагрузкой и последующей разгрузкой, регистрацией зависимости нагрузки от перемещения индентора, в результате которого по положению касательной к ветви разгрузки, проведенной через верхнюю точку графической зависимости, определяется статический модуль Юнга  $E^*$  испытываемого материала, а отношение приложенной к индентору нагрузки  $F$  к площади контактной поверхности  $S$  между индентором и испытываемым материалом, определенное при вдавливании индентора, принимается за величину твердости  $H_T$  испытываемого материала. Недостатком данного способа является необходимость определения на графике разгрузки точки, определяющей две доли общей глубины отпечатка индентора, отражающих глубину внедрения, на протяжении которой осуществляется контакт между индентором и материалом, и глубину, на протяжении которой контакт индентора с материалом отсутствует в результате образовавшегося в материале углубления вокруг индентора. Соотношение между указанными глубинами находится в линейной зависимости от соотношения между твердостью  $H_T$  и модулем упругости  $E^*$ , из указанной зависимости невозможно определить количественное значение предела прочности материала [2].

Задача заявляемого способа заключается в определении предела прочности на сжатие образца горной породы без его разрушения.

Технический результат достигается тем, что в способе определения предела прочности на сжатие образца горной породы в первом цикле вдавливают индентор переменного сечения непрерывно возрастающей нагрузкой до установленного максимального значения, после достижения которого прекращают вдавливание и производят разгрузку образца до нулевого значения нагрузки; не изменяя положения индентора, повторяют циклы вдавливания и разгрузки образца, обеспечивая в каждом последующем цикле дискретное увеличение максимального значения нагрузки, после достижения которого производят разгрузку образца, при этом строят зависимости величины нагрузки от глубины перемещения индентора для каждого цикла увеличения нагрузки до максимального значения и разгрузки; для каждого цикла вдавливания рассчитывают давление на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на те-

кущую площадь контактной поверхности; для каждого цикла разгрузки рассчитывают давление на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на максимальную площадь контактной поверхности; в каждом цикле для одних тех же глубин перемещения индентора рассчитывают разности между давлением на контактной поверхности в период увеличения нагрузки и давлением в период разгрузки, определяют максимальное значение разности указанных давлений для каждого цикла увеличения нагрузки и разгрузки образца; строят графическую зависимость полученных максимальных значений разностей давлений от максимальных значений нагрузок в циклах; на построенной графической зависимости определяют значение максимальной разности давлений, соответствующее горизонтальному участку графика, и принимают предел прочности на сжатие образца равным этому значению. Площадь контактной поверхности рассчитывают исходя из геометрической формы индентора и величины его перемещения.

С целью упрощения расчетов, при применении инденторов пирамидальной или конической формы, за величину площади контактной поверхности принимают проекцию площади контактной поверхности индентора с соответствующим поправочным коэффициентом.

Сущность изобретения поясняется фигурами. Фиг. 1 - график, отражающий изменение нагрузки, приложенной к индентору и соответствующего изменения глубины перемещения индентора  $h$  при многократном повторении увеличения нагрузки и разгрузки образца. Фиг. 2 - график, отражающий изменение нагрузки, приложенной к индентору, и соответствующего изменения глубины перемещения индентора, в случае однократного вдавливания индентора. Фиг. 3 - графики, отражающие изменение давления на контактной поверхности между индентором и образцом в момент увеличения нагрузки и давления в момент разгрузки индентора, а также изменение разности между указанными давлениями на контактной поверхности в зависимости от перемещения индентора. Фиг. 4 - графики, отражающие зависимости разности давлений в каждом цикле от максимальных значений нагрузок в соответствующих им циклах испытаний.

Способ осуществляют следующим образом.

Плоскопараллельный образец горной породы устанавливают на стол нагружающего стенда и вдавливают индентор непрерывно возрастающей нагрузкой  $F$  до максимального значения  $F_{\max 1}$  произвольной величины, после достижения которого прекращают вдавливание и производят разгрузку образца до нулевого значения нагрузки  $F$ . Не изменяя положения индентора, повторяют его вдавливание непрерывно возрастающей нагрузкой до максимальной величины  $F_{\max 2}$ , превышающей первоначальное значение  $F_{\max 1}$ , и затем аналогично производят разгрузку. Описанное циклическое вдавливание индентора продолжают повторять  $i$  раз, обеспечивая в каждом цикле непрерывное возрастание нагрузки  $F$  и разгрузку образца, повышая в каждом следующем цикле максимальное значение нагрузки  $F_{\max i}$ , после которого начинается разгрузка индентора, с уменьшением величины нагрузки  $F$  до нулевого значения (фиг. 1). Регистрируют зависимость величины нагрузки  $F$  от перемещения  $h$  индентора при каждом цикле увеличения нагрузки до максимального значения  $F_{\max i}$  и разгрузки. Для полученной в каждом цикле вдавливания индентора зависимости величины нагрузки  $F$  от перемещения  $h$  индентора рассчитывают давление на контактной поверхности между индентором и материалом образца для каждого текущего значения перемещения  $h_i$  индентора (фиг. 2). При этом в момент увеличения нагрузки ее величину  $F_i$  делят на площадь контактной поверхности  $S_i$ , которая увеличивается пропорционально увеличению перемещения  $h_i$  индентора, и рассчитывают давление  $P_i = F_i/S_i$  на контактной поверхности между индентором и материалом образца в момент увеличения нагрузки. Площадь контактной поверхности рассчитывают исходя из геометрической формы индентора и величины его перемещения  $h_i$  или принимают ее равной площади проекции поверхности индентора с поправочным коэффициентом. В период разгрузки индентора

текущее значение нагрузки  $F_i'$  делят на площадь контактной поверхности  $S_{\max i}$ , соответствующую положению индентора  $h_{\max i}$  в момент начала разгрузки, и принимают постоянной, т.к. в момент разгрузки образца материал образца совершает только упругое восстановление, которое не изменяет сформировавшейся на этапе увеличения нагрузки максимальной площади контактной поверхности между индентором и образцом. При этом величина нагрузки  $F_i'$  уменьшается до нулевого значения сообразно перемещению индентора. Таким образом, рассчитывают давление  $P_i'$  на контактной поверхности между индентором и образцом в период разгрузки. Для одной и той же величины перемещения  $h_i$  индентора рассчитывают разницу  $\Delta P_i = P_i - P_i'$  между давлением на контактной поверхности в момент увеличения нагрузки  $P_i$  и давлением в момент разгрузки  $P_i'$  и по полученной зависимости  $\Delta P_i$  от  $h_i$  определяют максимальное значение разницы  $\Delta P_{\max i}$  для каждого  $i$ -го цикла увеличения нагрузки и разгрузки индентора.

По результатам эксперимента строят зависимость  $\Delta P_{\max i}$  от  $F_{\max i}$  и на основании полученной зависимости определяют предел прочности испытуемого материала на сжатие, считая данной величиной значение  $\Delta P_{\max i}$ , соответствующее горизонтальному участку указанной зависимости.

### **Пример** осуществления способа.

Исследовали материал зерна горной породы, извлеченной из скважины № 208 Речицкого месторождения Республики Беларусь. Испытания проводят на цилиндрических образцах диаметром 30 мм и высотой 60 мм, что соответствует ГОСТ 21153.3-85. Образец устанавливают на испытательный стол станда "INSTRON". В качестве индентора используют алмазную пирамиду Виккерса, которую с помощью специальной оправки закрепляют на траверсе станда "INSTRON". Затем вдавливают индентор в поверхность образца с непрерывным увеличением нагрузки до максимального значения  $F_{\max 1} = 100$  Н, после чего вдавливание прекращают и осуществляют разгрузку индентора до нулевого значения. Регистрируют изменение нагрузки  $F_1$  в зависимости от перемещения  $h_1$  индентора.

Повторное и следующие за ним вдавливания индентора проводят, не изменяя взаимного расположения образца и индентора, увеличивая максимальную нагрузку  $F_{\max i}$  на 100 Н, при которой прекращают процесс вдавливания и начинают разгрузку в каждом последующем цикле вдавливания индентора. Величина максимальной нагрузки в рассматриваемом примере возрастала в следующей последовательности: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 Н. Регистрируют изменение нагрузки  $F_i$  в зависимости от координаты  $h_i$  индентора при его перемещении в процессе всех циклов вдавливания индентора. Получают зависимость нагрузки  $F$  от перемещения  $h$  индентора, которую представляют в графическом виде (фиг. 1).

Для каждого цикла вдавливания проводят расчет величины давления  $P$  на контактной поверхности между индентором и образцом путем деления нагрузки  $F$ , приложенной к индентору, на площадь  $S$  контакта между индентором и поверхностью исследуемого образца. Величину давления  $P_i$  на контактной поверхности в момент непрерывного увеличения нагрузки  $F_i$  рассчитывают с учетом непрерывного увеличения площади  $S_i$  контактной поверхности, которую рассчитывают исходя из глубины внедрения  $h_i$  индентора, а также исходя из его геометрической формы, представляющей собой четырехгранную пирамиду с углом при вершине  $136^\circ$ . Для алмазного индентора Виккерса площадь контактной поверхности между индентором и испытуемым материалом рассчитывают по формуле  $S_i = 4h_i^2 \sin 68^\circ / \cos^2 68^\circ$  или  $S_i = 26,428h_i^2$ . В качестве величины нагрузки  $F_i$  и перемещения индентора  $h_i$  используют экспериментальные данные, полученные в результате телеметрии процесса вдавливания. Величину давления  $P_i'$  на контактной поверхности в момент разгрузки рассчитывают путем деления текущей величины нагрузки  $F_i'$ , регистрируемой с помощью телеметрии, на площадь контактной поверхности  $S_{\max i}$ , соответствующую перемещению  $h_{\max i}$  индентора, в каждом цикле испытания. В расчете величины давления  $P_i'$  на контактной поверхности в момент разгрузки используют постоянную величину площади

контактной поверхности  $S_{\max i}$ , полученную при перемещении индентора до величины  $h_{\max i}$ . Для каждого цикла углубления индентора строят графическую зависимость изменения величины нагрузки  $F_i$  от перемещения  $h_i$  индентора в момент вдавливания индентора и  $F_i'$  от  $h_i$  в момент разгрузки индентора, при этом для каждого цикла испытаний регистрируют значения  $h_{\max i}$  и  $F_{\max i}$  (фиг. 2).

Для каждого цикла вдавливания индентора рассчитывают разницу между давлением в момент увеличения усилия  $P_i$  и его уменьшением  $P_i'$  по формуле  $\Delta P_i = P_i - P_i'$ . Строят графические зависимости изменения  $P_i$ ,  $P_i'$  и  $\Delta P_i$  от перемещения  $h_i$  индентора. На графике зависимости  $\Delta P_i$  от  $h_i$  определяют максимальное значение  $\Delta P_{\max i}$  для каждого цикла испытаний (фиг. 3).

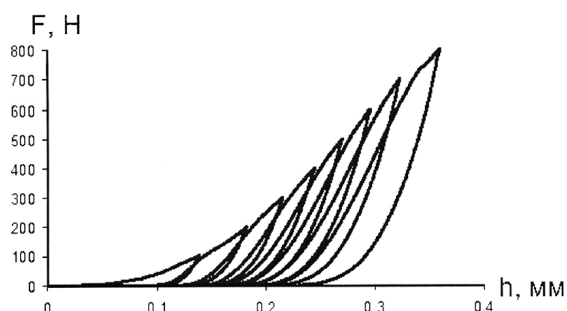
Строят графическую зависимость между величинами максимальных разностей давлений  $\Delta P_{\max i}$  и максимальными значениями нагрузки  $F_{\max i}$  для всех циклов испытаний (фиг. 4). На указанном графике горизонтальный участок, отражающий постоянные величины  $\Delta P_{\max i} = 183$  МПа, соответствует пределу прочности на сжатие испытуемого материала.

Проверочные испытания, проведенные согласно ГОСТ 21153.8-88 с объемным разрушением образца, обеспечивают получение близких значений предела прочности на сжатие, отличающихся не более чем на 25 %.

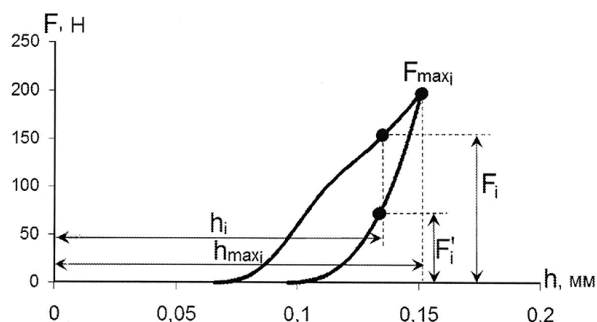
Источники информации:

1. API RP 40, Recommended practice for core - analysis procedure, 2<sup>nd</sup>ed.: Chapter 7.7. American Petroleum Institute. - Washington, D.C., 1998. - 236 p.

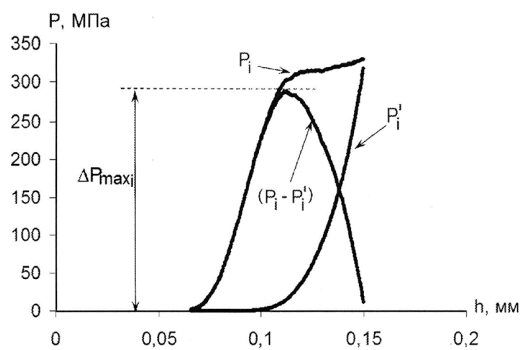
2. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Печковский Э.П. Новые методологические возможности определения механических свойств современных материалов методом автоматического индентирования //Наука та інновації. - 2010. - Т. 6. - № 5. - С. 7-18.



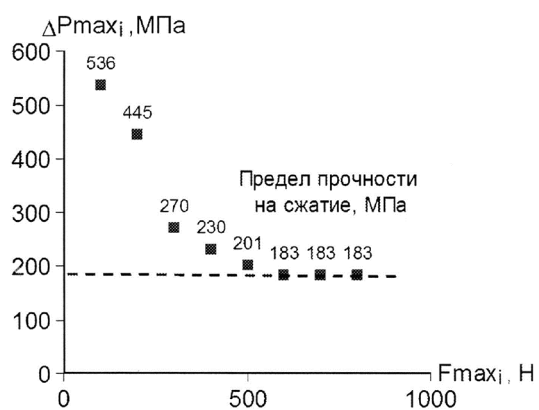
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4