

УДК 622.243.051

**А. М. Исонкин**, канд. техн. наук

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

## **ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ЕДИНИЧНЫМ АЛМАЗОМ ГОРНЫХ ПОРОД С РАЗЛИЧНЫМИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

*Приведены результаты склерометрирования горных пород с различными упруго-пластическими характеристиками и минералогическим составом алмазным индентором, свидетельствующие о том, что при его повторном прохождении по одному и тому же следу деформирования образование микротрещин и изменение их параметров происходит циклически с различным периодом и усилием резания.*

**Ключевые слова:** алмаз, склерометрирование, горная порода, микротрещина.

Научно обоснованные разработки конструкций алмазных коронок, вопросы их выбора применительно к конкретным геолого-техническим условиям и установление рациональных параметров режима бурения должны опираться на закономерности разрушения горных пород единичными алмазами с учетом специфики их работы в коронке.

Большинство исследователей рассматривает процесс разрушения горной породы как результат совместного воздействия на алмазные зерна осевой нагрузки и окружного усилия. Под действием осевой нагрузки алмазные зерна внедряются в породу на некоторую глубину и одновременно под действием окружного усилия разрушают породу [1]. Однако мнения исследователей относительно механизма разрушения породы при алмазном бурении существенно различаются. Одни считают, что породы при алмазном бурении разрушаются преимущественно вследствие смятия или раздавливания. Другие утверждают, что процесс алмазного бурения представляет собой поверхностное истирание, царапание, а в отдельных случаях усталостный износ породы. Результаты исследователей ВИТР с применением скоростной киносъемки показывают, что породы разрушаются вследствие скалывания и последующего дробления.

В результате исследований механизма разрушения природного камня единичными алмазными зернами установлено [2], что при незначительных нагрузках на поверхности камня в результате пластической деформации образуются гладкие вдавленные борозды глубиной до 1 мкм. При увеличении нагрузки алмазных зерен на камень на его поверхности образуются борозды с закономерной структурой, состоящие из регулярно повторяющихся углублений («выколов») и микротрещин (дефектного слоя), образованных в результате хрупкого разрушения.

В процессе алмазного бурения скважин наряду с отделением от горного массива продуктов разрушения в призабойном пространстве формируется специфический по структурно-механическим характеристикам слой породы, ослабленный системой микротрещин, называемый зоной предразрушения. Роль трещин при разрушении твердых пород существенна, поскольку при приложении внешней нагрузки в поликристаллическом агрегате, напряжение распределяется неравномерно, а концентрируется на границах ослабленных мест [3; 4]. После приложения нагрузки зародышевые трещины сразу начинают развиваться. В зависимости от степени структурного ослабления прочность пород снижается в несколько раз.

С учетом изложенного цель настоящего исследования – детализировать характер разрушения алмазами горных пород с различными упруго-пластическими характеристиками.

### **Методика исследований**

Для изучения взаимодействия единичного алмаза с горной породой были выбраны образцы мрамора, габбро, гранита и оптического стекла, так как они охватывают основной диапазон категорий буримости горных пород при бурении алмазными буровыми коронками. Выбранные образцы имеют различные упруго-пластические характеристики, что позволяет проследить их влияние на процесс разрушения большого разнообразия горных пород.

Исследования проводили в соответствии с методикой, приведенной в работе [5], при участии М. М. Потемкина. Прибор для склерометрических исследований настроили на диапазон вертикальных нагрузок  $P_y$  на индентор 1–7 Н, чувствительность измерительного тракта прибора 80 мВ и скорость движения диаграммной ленты 2 мм/с. Выбранный диапазон нагружения определяли для каждого образца породы отдельно исходя из условия исчерпания динамического диапазона системы регистрации тангенциального усилия  $P_z$ .

Исследования проводили при двух видах контактирования: индентор движется по поверхности полированного образца; индентор многократно движется по собственному следу. Изучали царапины, образованные при одном и четырех проходах индентора по одной трассе.

Такой подход к изучению процесса разрушения горной породы позволяет оценить специфику изменения силовых параметров при прохождении алмазного зерна по предразрушенному слою по сравнению с исходными свойствами материала.

В качестве индентора использовали кристалл природного алмаза зернистостью 800/630 мкм, закрепленный в специальной державке.

В процессе склерометрирования оценивали среднее максимальное тангенциальное усилие на инденторе  $P_z$ . В процессе анализа оценивали ширину образованной царапины, характер и степень повреждаемости, а также особенности деформирования, отраженные на фотографиях.

### **Результаты и их обсуждение**

К особенностям царапин, образовавшихся на поверхности всех образцов, можно отнести то, что образуются микротрещины, расположенные волнами перпендикулярно к направлению царапания. С повышением нагрузки амплитуда волн уменьшается, царапина обретает четкие границы, в которых образуются макротрещины, пересекающие под прямым углом всю ширину канавки.

Царапина на поверхности мрамора формируется довольно специфически (рис. 1). При малом усилии царапина состоит из отдельных следов отделения материала, причем различных размеров, расположенных как по оси, так и под углом к ней.

При дальнейшем повышении нагрузки края царапины преобразуют прерывистые границы. Однако поверхность борозды не содержит ярко выраженных следов микротрещин и четко направленных сколов. В большей степени она похожа на следы пластического деформирования, характерного для вязкого разрушения.

Характерный вид царапин при деформировании габбро показан на рис. 2. Особенность царапин на поверхности габбро состоит в ярко выраженной блочной структуре, которая проявляется при более высоких нагрузках.

При минимальном усилии на инденторе царапина имеет прерывистую форму со следами разрушения, не имеющими ярко выраженного направления. С повышением нагрузки царапина обретает четкие границы, в которых следы разрушения ориентированы перпендикулярно к направлению царапания. При дальнейшем повышении усилия царапания след индентора пересекается четко выраженной системой трещин, причем материал разрушается мелкими блоками, границы которых идут по трещинам и слоям.

При царапании гранита (рис. 3) характерно, что при малом усилии на инденторе царапина имеет четко выраженные границы со следами разрушения, ориентированными перпендикулярно к направлению царапания. С повышением нагрузки царапина обретает форму последовательности каплевидных участков. Это свидетельствует о том, что материал перед индентором разрушается скачками, причем после достижения порогового усилия

отделяется сразу большой объем материала, по размерам выходящий за контур царапины. При увеличении нагрузки происходит переход от мелкодисперсной структуры поверхности царапины к следам удаления больших по объему частиц материала. Следует отметить, что речь идет о преимущественных процессах.

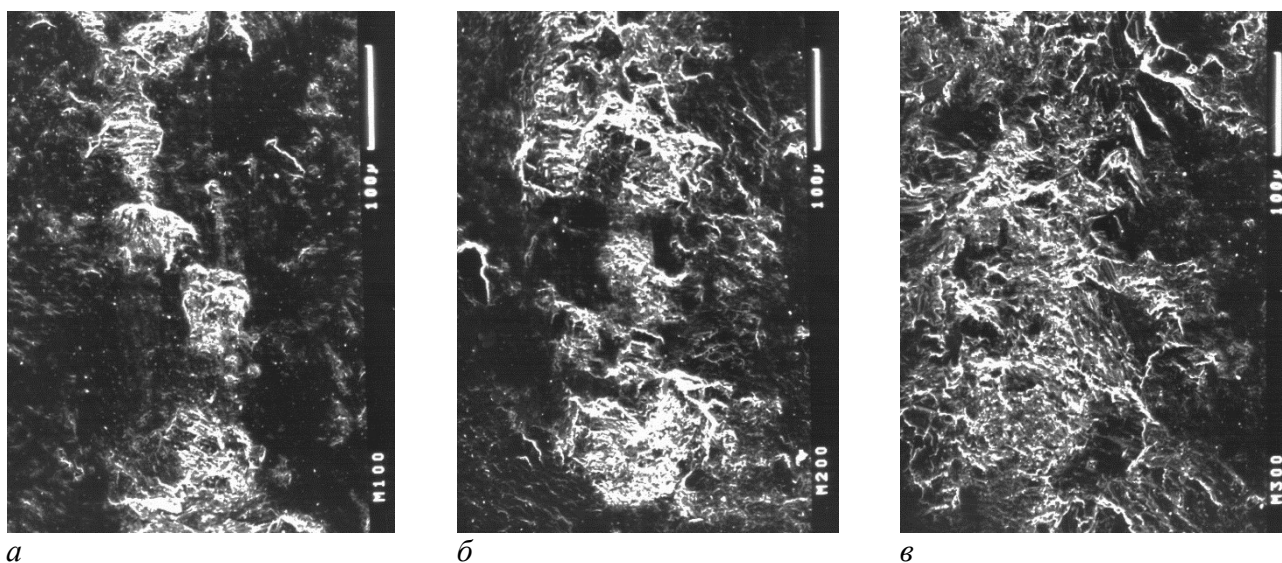


Рис. 1. Характерный вид деформирования мрамора при нагрузке на алмаз:  
а – 1Н; б – 2Н; в – 3Н

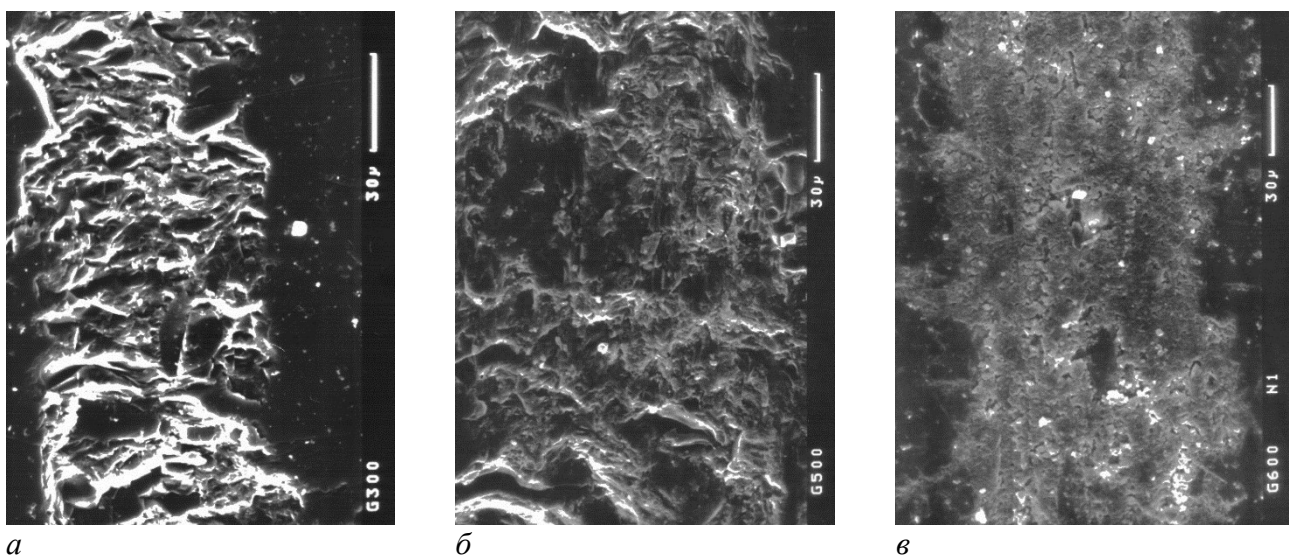
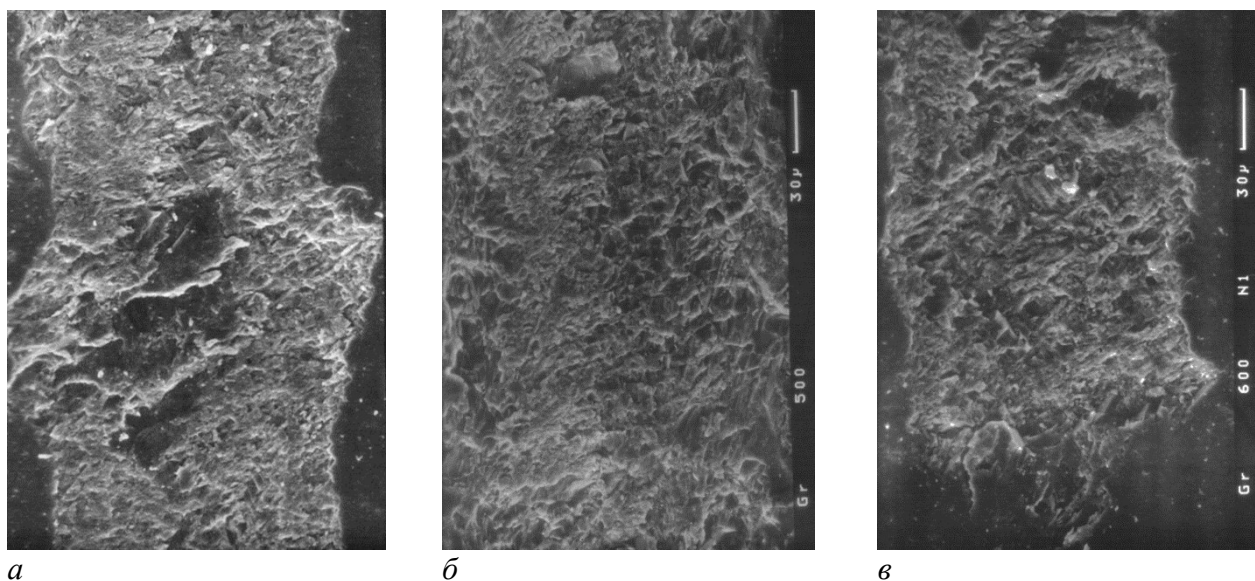


Рис. 2. Характерный вид деформирования габбро при нагрузке на алмаз:  
а – 3Н; б – 5Н; в – 6Н

При дальнейшем увеличении нагрузки восстанавливаются более четкие границы царапины и происходит переход от следов мелкозернистого разрушения к более крупным частицам, что выражается в формировании довольно гладких и протяженных плоскостей отделения материала.



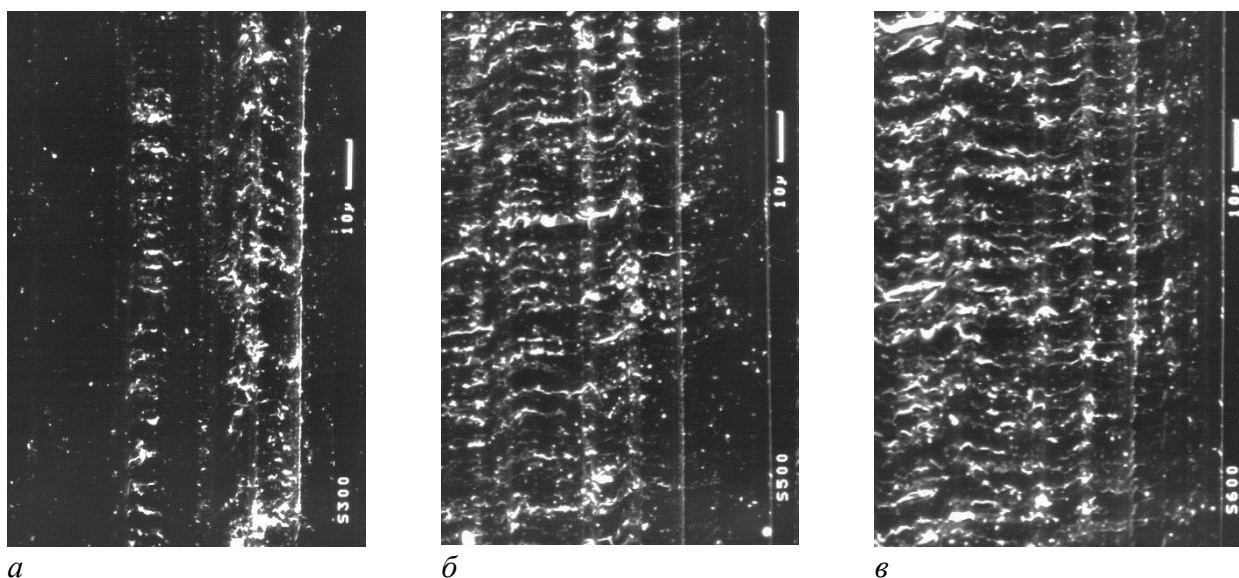
а

б

в

Рис. 3. Характерный вид деформирования гранита при нагрузке на алмаз:  
а – 3Н; б – 5Н; в – 6Н

Рассматривая результаты анализа изображений царапин, образованных на поверхности стекла, необходимо отметить, что они имеют особенности, характерные только этому материалу (рис. 4). Это выражается в наличии микротрещин, располагающихся волнами перпендикулярно к направлению царапания. С увеличением нагрузки амплитуда волны уменьшается и приближается к прямой явно выраженной трещине, уходящей вглубь материала образца. Это свидетельствует о формировании предразрушенного слоя. Степень разрушения стекла охарактеризовать довольно сложно, поскольку при увеличении нагрузки до 6 Н количество волн микротрещин увеличивается, но они остаются относительно небольшого размера. При нагрузке 7 Н количество волн уменьшается, но образуются макротрещины, пересекающие под прямым углом всю ширину канавки.



а

б

в

Рис. 4. Характерный вид деформирования оптического стекла при нагрузке на алмаз:  
а – 3 Н; б – 5 Н; в – 6 Н

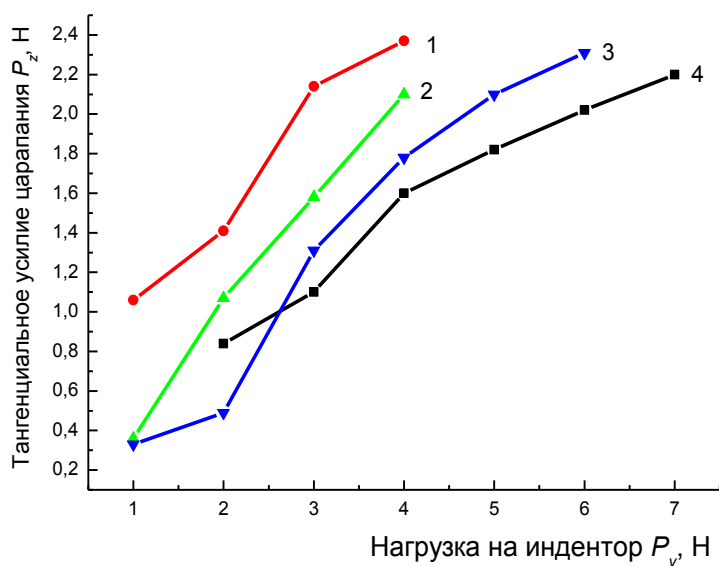


Рис. 5. Изменение тангенциального усилия царапания в зависимости от вертикальной нагрузки на алмаз: 1–мрамор, 2–габбро, 3–гранит, 4–стекло

Из анализа графиков на рис. 5 следует, что в исследуемом диапазоне условий тангенциальное усилие на инденторе для них повышается практически линейно и можно утверждать, что механизм разрушения горной породы для них существенно не изменяется.

Для гранита с повышением до некоторого уровня вертикальной нагрузки на индентор степень неоднородности поверхностного слоя образца, подвергнутого деформированию, также повышается. Это обусловлено тем, что при нагружении деформируется некоторый объем материала. Если материал структурно неоднороден и деформируемый объем включает один из структурных элементов,

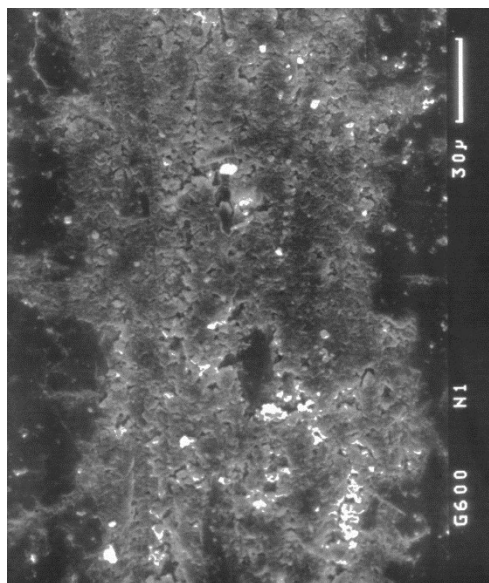
поверхность разрушается фрагментарно в соответствии с различными структурными составляющими материала с широким диапазоном прочностных свойств. При увеличении деформируемого объема в него попадает несколько структурных составляющих и разрушение идет более крупными блоками, прочностные свойства которых являются промежуточными за счет наличия в каждом из них нескольких структурных минеральных элементов. Это подтверждают данные о ширине царапины, полученные при различной нагрузке на индентор (табл. 1).

Таблица 1. Средняя ширина царапины в зависимости от нагрузки при одном проходе индентора

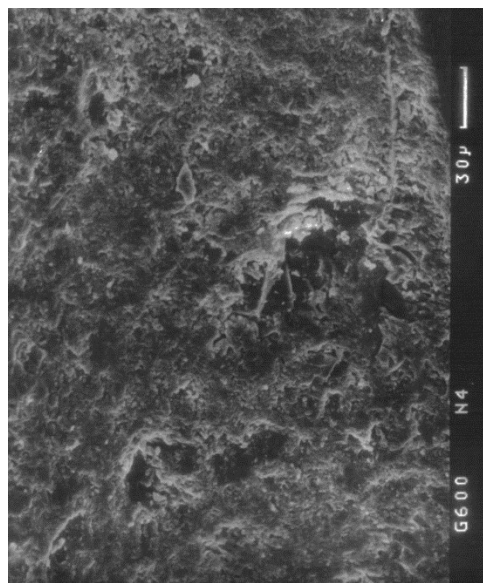
№ п/п	Образец	Средняя ширина царапины, мкм, при нагрузке, Н						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Стекло	–	–	12,5	42,5	67,5	75,0	87,5
2	Мрамор	125	187,5	312,5	–	–	–	–
3	Габбро	64,3	85,7	107,1	150,0	228,0	310,0	–
4	Гранит	–	120,0	150,0	180,0	210,0	270,0	–

Рассматривая особенности разрушения горных пород при многократном прохождении индентора по одной трассе, прежде всего отметим, что однородность структуры материала усиливается с уменьшением размеров отдельных блоков. На таком хрупком материале, как габбро, видна зона предразрушения в виде сетки трещин и вырывов материала (рис. 6); на граните эта тенденция также прослеживается (рис. 7); на мраморе ее не выявлено.

Графики изменения характеристик царапания, полученных при многократном прохождении индентора по одному следу различных материалов показаны рис. 8–10. Результаты анализа данных, полученных при многократном прохождении индентора по одному следу, свидетельствуют, что исследуемые образцы существенно различаются реакцией на повторное деформирование по трассе царапания.

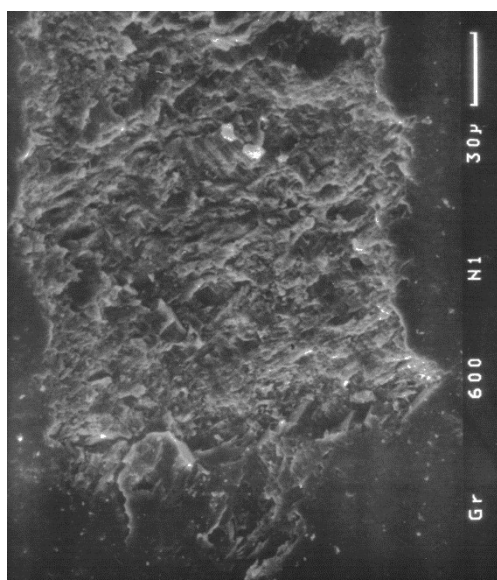


*а*

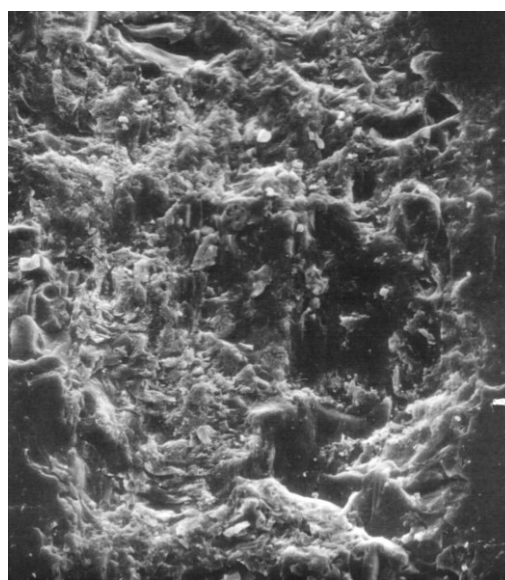


*б*

*Рис. 6. Характерный вид деформирования габбро при различном количестве проходов алмаза: а – один проход; б – четыре прохода*



*а*



*б*

*Рис. 7. Характерный вид деформирования гранита при различном количестве проходов алмаза: а – один проход; б – четыре прохода*

В мраморе (рис. 8) на первом проходе создается предразрушенный слой, который удаляется на втором проходе при меньшем тангенциальном усилии. После удаления разрушенного слоя прочность материала повышается до первоначальной и процесс повторяется циклически.

При царапании габбро после первого прохода происходит упрочнение деформируемого объёма, для разрушения которого на втором проходе необходимо приложить большее усилие. Однако создаваемая при втором проходе зона предразрушения существенно увеличивается и удаляется на третьем и четвертом проходах при меньшей нагрузке (рис. 9).

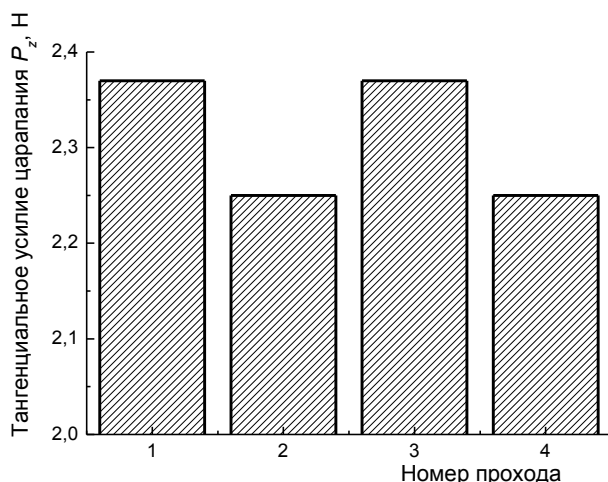


Рис. 8. Тангенциальное усилие царапания мрамора при нагрузке 3 Н при разном количестве проходов по следу царапания

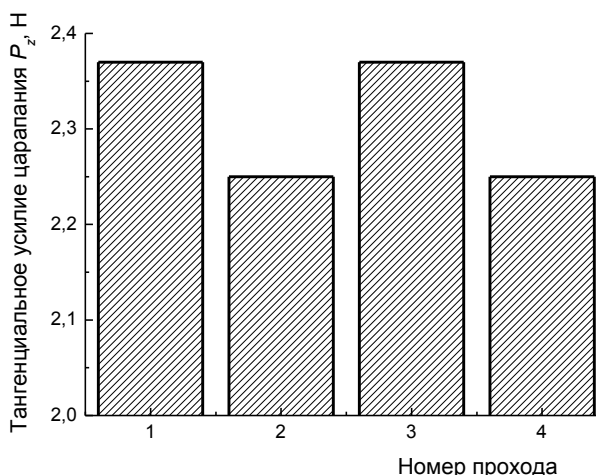


Рис. 9. Тангенциальное усилие царапания габбро при нагрузке 4 Н при различном количестве проходов по следу царапания

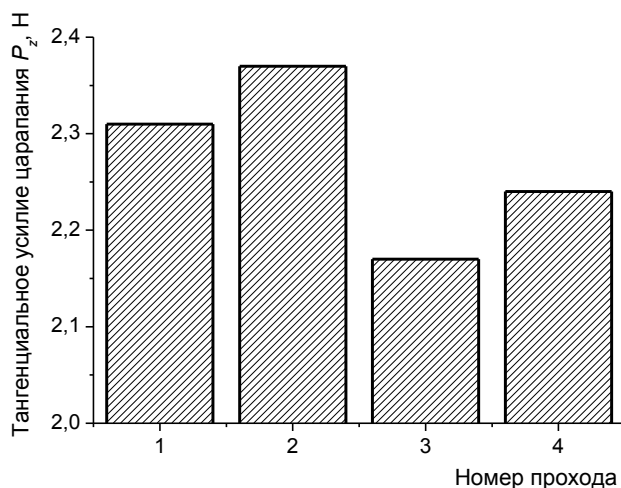


Рис. 10. Тангенциальное усилие царапания гранита при нагрузке 6 Н при различном количестве проходов по следу царапания

На граните обширная зона предразрушения образуется только после двух проходов. На третьем проходе эта зона удаляется и прочность породы восстанавливается почти до первоначальной.

В целом необходимо отметить, что при повторных проходах наблюдается циклическое изменение уровня нагрузок, необходимое для разрушения горной породы. При этом средняя ширина царапины для всех горных пород существенно увеличивается (табл. 2).

Изложенное еще раз подтверждает тот факт, что алмазные зерна на рабочем торце коронки работают при значительных циклических нагрузках, способных приводить к накоплению усталостных явлений и скалыванию вершин зерен.

Таблица 2. Средняя ширина царапины при различном количестве проходов

№ п/п	Образец	Нагрузка, Н	Средняя ширина царапины, мкм, при проходах	
			одном	четырех
1	Мрамор	3	312	437
2	Габбро	4	150	262
3	Гранит	6	270	314

### Выводы

Установлено, что горные породы с различными физико-механическими свойствами и минералогическим составом по-разному реагируют на повторное прохождение индентора по одному и тому же следу деформирования. Предразрушенный слой образуется циклически с различным периодом для разных горных пород.

При минимальном усилии на инденторе царапина имеет прерывистую форму со следами разрушения без ярко выраженного направления.

Дальнейшее повышение усилия на индентор приводит к тому, что след царапания пересекается четко выраженной системой трещин, причем горная порода разрушается мелкими блоками, границы которых идут по трещинам.

С увеличением нагрузки царапина приобретает специфическую форму, представляющую собой последовательность каплеобразных участков. Это свидетельствует о том, что разрушение горной породы перед индентором происходит скачкообразно. При достижении порогового тангенциального усилия отделяется сразу достаточно большой объем породы, размеры которого выходят за пределы контура канавки.

Экспериментально подтверждено предположение о том, что образующийся при разрушении горной породы единичным алмазом дефектный слой способствует циклическому снижению силовых характеристик процесса её разрушения.

*Наведено результати склерометрування гірських порід з різними пружно-пластичними характеристиками і мінералогічним складом алмазним індентором, що свідчать про те, що при його повторному проходженні одним і тим самим слідом деформування утворення мікротріщин і зміна їх параметрів відбувається циклічно з різним періодом та зусиллям різання.*

**Ключові слова:** алмаз, склерометрування, гірська порода, мікротріщина.

*The results of sclerometer the rocks with different elastic-plastic characteristics and mineralogical composition of the diamond indenter, showing that when it re-passing on the same track deformation of microcracks and change their parameters are cyclically with different periods and cutting force.*

**Key words:** diamond, sclerometer, rock, hair crack.

### Литература

1. Алмазосберегающая технология бурения / Г. А. Блинов, В. И. Васильев, М. Г. Глазов, и др. – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
2. Дубинин П. И. Повышение производительности круглого шлифования изделий из природного камня на основе обоснования энергосберегающих режимов хрупкого разрушения // Автореф. дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». – М.: МГТУ, 2010. – 26 с.
3. Арцимович Г. В. Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. – Новосибирск: Наука, 1985. – 265 с.
4. Спивак А. И., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1986. – 208 с.

Поступила 21.05.13