

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МИКРОРЕЗАНИЯ МРАМОРА И ГРАНИТА

Lj. Tanovic, Popovic M., Mladenovic G.

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Production Engineering Department, Belgrade, Serbia

### SPECIFICS OF GRANITE-BASED STONE MICRO-CUTTING MECHANISM

*В данной работе показаны результаты исследования, проводящиеся на Машиностроительном факультете в г. Белграде в области микрорезания хрупких материалов. Здесь проанализировано взаимодействие между алмазным зерном и обрабатываемым мрамором и гранитом. Экспериментально установлено изменение нормальной составляющей силы резания в функции скорости резания и глубины проникновения при микрорезании на двух видах мрамора и гранита из местонахождений в Республике Сербии. На основании следов на граните и возникших трещин установлена критическая глубина проникновения зерна, при которой возникает хрупкое разрушение. Указанные исследования должны помочь оптимизации процесса шлифования и полировки, являющихся доминирующими технологиями окончательной обработки гранита.*

*Ключевые слова:* трещины, выкрашивание, сила резания, гранит, мрамор

#### Введение

Механизм формирования микрорельефов при шлифовании камня на основе мрамора и гранита – сложный процесс и зависит от механизма образования стружки, метода шлифования, количества и расположения абразивных зерн в режущем слое шлифовального круга, характеристик шлифовального круга, режима шлифования, способа правки шлифовального круга и пр.

Свойства структур горных пород зависят от условий возникновения и они определены текстурой и структуральными характеристиками. Структура определяется степенью кристаллизации и размером зерна, а также видом и взаимоотношением составных компонентов горных пород. Горные породы отличаются друг от друга размером зерна: крупнозернистые (размер зерна больше 5 мм), среднезернистые (зерно 1 – 5 мм) и мелкозернистые (зерно 0.5 – 1 мм). Текстура, совокупность характеристик определяют местонахождение и распределение составных частей горной породы одних в отношении с другими в занимающем им простространстве.

Специфичность технологии окончательной обработки требует хорошего знания всех свойств гранита и мрамора, начиная со структурно-текстурных (континуум, гомогенность, изотропность), физическо-механических (удельный вес, пористость, влажность, водопроницаемость, твердость, прочность, абразивность) до минерологическо-петрографических (размер зерна, вид и содержание цветных ингредиентов и пр.).

Известно, что интенсивность изнашивания инструмента, являющаяся последствием абразивности мрамора и гранита, связана с трением, т. е. скоростью резания и сопротивлением резанию.

#### Механизм образования стружки

Обработка шлифованием возникает за счет суммирования действий любой абразивной частицы, проявляясь посредством деформации и разрушения, но механизм микродеформаций и микрорезани в зоне обработки отличается в зависимости от параметров обработки и неоднородности обрабатываемого материала. Исследования в области взаимодействия между инструментом и материалом, происходящим из горной породы проводились в трех направлениях. Отождествление процесса вдавливания индентора с работой алмазного зерна в шлифовальном круге, затем выполнение процесса микрорезания выделенным алмазным зерном и в конце выполнением процесса шлифования.

В состав первой группы исследований вошли анализ влияния формы зорна (угол верха, радиус закругления) и способ вдавливания (статическое, динамическое) на развитие трещин.

Вторая группа исследователей выполняла процесс микрорезания выделенным алмазным зерном на различных хрупких материалах, литературные источники гипотезов об этапах образования стружки резко отличаются друг от друга, даже они противоречат друг другу [1]:

Herworth A. A и Thomson R., предполагают сходство между механизмом обработки (резанием) хрупких и пластических материалов, включая труднообрабатываемые сплавы титана и силициума.

Prins J. F., считает, что в процессе обработки в поверхностном слое преобладает хрупкое выделение материалов при одновременном возникновении упругих деформаций, выкрашивания отдельных зерн и также формирования микротрещин.

Thiel N.W. указывает, что только в некоторых случаях возникает резка и изнашивание зерна хрупкого материала, при правильно управляемом процессе обработки преобладает только изнашивание зерна.

Salje E., и Mohlen H., дают сравнительный показ образования стружки при обработке металлов и керамики в качестве хрупкого материала. По их мнению по характеру изнашивания алмазного зерна и связи можно предположить, что при обработке керамики происходит больше измельчения и «царапания» поверхности, чем снятия стружки в классическом смысле. Такой механизм образования стружки обусловлен хрупкостью материала.

Imanaka O., Fujino S., Mineta S., сравнивали образование стружки у хрупких и пластических материалов и утвердили, что при обработке хрупкого материала происходит образование тонко дисперсионной стружки различной формы.

Mishnaevsky [2], выполнял реальный процесс разрушения хрупких материалов и наблюдал различные физические механизмы, участвующие в разрушении материалов (деформации, выкрашивание, трещины, измельчение). Он считает, что не возникают конические трещины Герца, ни кольцеобразные трещины, а наоборот возникают отдельные трещины в направлении вектора силы резания.

Chiaia [3], дает систематический анализ существующих подходов проблемам, связанным с процессом резания хрупких и квази-хрупких материалов. Показано, что различные механизмы взаимодействий под инструментами в процессе проникновения в основном можно подвести к пластическим деформациям и хрупкому разрушению.

Третья группа исследователей выполняла реальные процессы резания и шлифования хрупких материалов и при этом они проводили анализ механизма формирования трещин и хрупкое разрушение материала. Они измеряли силы, силу резания и изнашивание инструмента при обработке керамики и гранита, чтобы дать рекомендацию для эффективной абразивной обработки [4-7].

#### Схема микрорезания и измерительные приборы

Процесс микрорезания выполнялся следующим способом:

Алмазное зерно конической формы, угла  $120^\circ$  при вершине и радиуса закругления 0,1 мм жестко прикреплено к алюминиевому держателю и оно проводит прямолинейное движение, выполняя при этом процесс микрорезания, в том числе строгание, как показано на рис. 1. Нажимной прибор, расположенный на динамометре, они ставили образцы мрамора и гранита. При выполнении эксперимента использован следующий измерительный прибор: двухкомпонентный динамометр Kistler 9257B, аквизиционная карточка cDAQ 9174 (National Instruments), микроскоп Leitz wetzlar с видео камерой марки Sony.

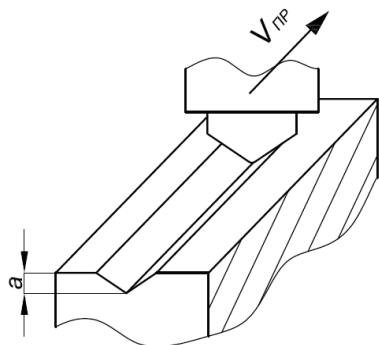


Рис.1. Схема микрорезания: аксиальное движение алмазное зерно (V пр)

#### Экспериментальные результаты

Процесс микрорезания выполнялся с двумя видами мрамора «Венчац белый» (ВБ) и «Голубой ток» (ПТ) и двумя видами гранита «Йошаница» (ГЙ) мелкозернистой структуры и «Буковик» (ГБ), среднезернистой структуры, физическо-механические свойства которых были испытаны и показаны в таблице 1.

Таблица 1

#### Физическо-механические свойства мрамора и гранита

СВОЙСТВА	МРАМОР		ГРАНИТ	
	«Венчац белый» (ВБ)	«Голубой ток» (ПТ)	«Йосаница» (ГБ)	«Буковик» (ГЙ)
Удельный вес, КН/ м <sup>3</sup>	26.3 ± 0.1	26.65 ± 0.15	29.70 ± 0.3	25.6 ± 0.1
Микротвердость, НК75/НК25	2.1	1.90	3.1	2.6
Прочность на сжатие, МПа	64.40 ± 0.4	75.04 ± 0.4	185 ± 20	102 ± 8
Прочность на растяжение, МПа	8.30 ± 0.6	8.30 ± 0.3	16.6 ± 1	15.0 ± 2
Кохезия, МПа	12.88	14.10	31.8	22.0
Коэффициент абразивности, %	26 – 28	29 – 30.5	21.5 – 23.0	23.5 – 24.5

Значения вышеуказанных свойств определены в виде средних значений большего количества измерений, в зависимости от петрографической природы гранита и мрамора. На основании измерений микротвердости замечено, что у наблюдаемых материалов нет однородной твердости.

При обработке мрамора и гранита обнаружен хрупкий излом и пластическая деформация. Хрупкое разрушение указывает на два механизма создания трещин: проникающие, влияющие на уменьшение прочности и боковые / радиальные, участвующие в образовании стружки, рис.2. При микрорезании мрамора ясно замечаются два поля, которые можно разграничить глубиной проникновения зерна (предельная глубина проникновения), разделяющая поле пластической деформации, сопровождающее возникновением трещин от поля наличия разрушения обрабатываемого материала. Предельная глубина проникновения может служить одним из критериев оптимизации процесса шлифования.

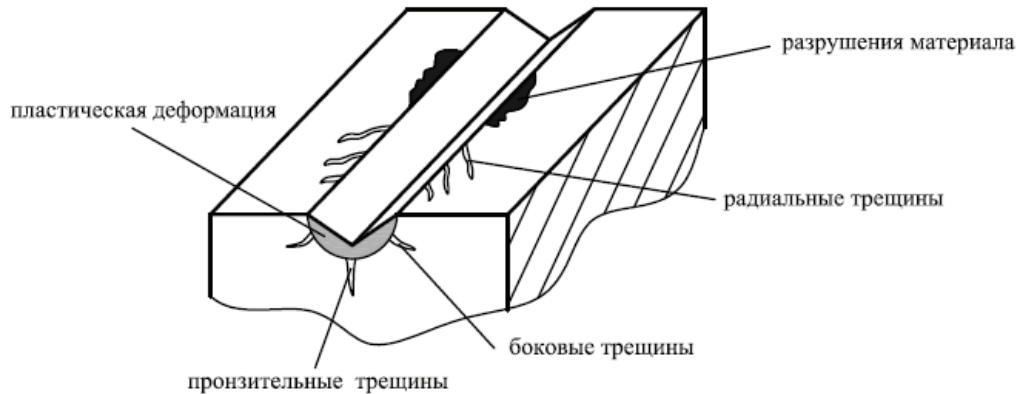


Рис. 2. Иллюстрация образования стружки у мрамора и гранита

На рис.3 показаны диаграммы изменения нормальной составляющей силы сопротивления резанию в функции глубины проникновения зерна при скоростях  $V_{np} = 1-2-4-5$  м/мин, при обработке мрамора. На основании полученных зависимостей, можно сделать вывод, что при повышении скорости проникновения зерна повышается сопротивление резанию у обоих видов мрамора и что значения сил приблизительно одинаковые. Это можно пояснить приблизительно одинаковыми физическо-механическими свойствами. У обоих видов мрамора увеличением скорости резания в промежутке 1-4 м/мин повышается сила  $R_n$  до 3 раза.

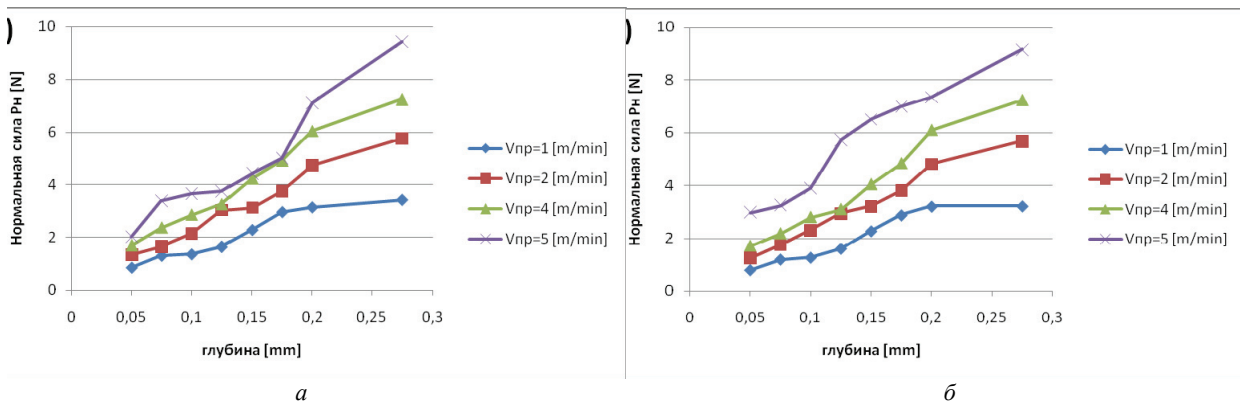


Рис. 3. Изменение сопротивления резанию при микрорезании мрамора: ВБ (а); ПТ(б)

Нелинейность изменения  $R_n$  является следствием неоднородности (негармоничности) мрамора. Также увеличением глубины проникновения зерна увеличивается сила резания, с замечанием, что на местах, где существует падение, это является следствием мягкой фазы в мраморе или уменьшенной реальной глубины проникновения, возникшей следствием наличия микроуглублений, оставшихся от предыдущей обработки. Наличие пластических деформаций при микрорезке мрамора ВБ выражено меньше, чем у мрамора ПТ, что относится к наличию радиальных трещин. При глубине проникновения режущего зерна  $a=0.05$  мм в мраморе ВБ измерены радиальные трещины в длине 0.35-0.38 мм.

При обработке мрамора ПТ, уже при глубине проникновения зерна 0.02 мм происходит выкрашивание вдоль следа зерна, что не происходило при обработке мрамора ВБ, у которого это явление наблюдается при глубине 0.025 мм [8].

На рис. 4 показано изменение силы в функции глубины резания при обработке гранита. На основании полученных зависимостей можно сделать вывод, что повышением скорости проникновения глубины увеличивается сопротивление резанию у обоих видов гранита, с тем, что он бывает больше при обработке гранита ГЙ, чем у гранита ГБ. Это является следствием большей твердости и прочности. Рост скорости

резання с 1 до 4 м/мин приводит у гранита ГЙ к росту силы  $R_n$  на около 50 %, а у гранита ГБ за около 30 %, что можно пояснить большим растрачиванием значения твердости.

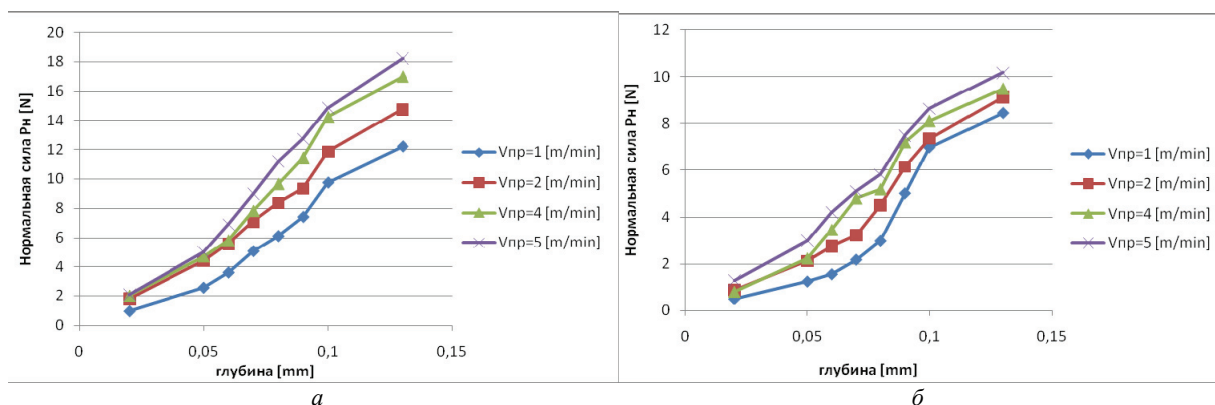


Рис.4. Изменение сопротивления резанию при микрорезании гранита: ГЙ (а); ГБ(б)

У гранита ГБ есть твердость меньше чем у гранита ГЙ и при микрорезании, при одинаковых глубинах проникновения радиальные трещины меньше выражены у гранита ГБ. Анализом следов на граните замечается более выраженное выкрашивание у гранита ГБ, являющегося последствием более крупной структуры и большего вырывания зерна.

Измерением установлена критическая глубина проникновения зерна у гранита ГЙ, составляющая 0.020мм ( $V_s=7.85$  м/с) и она уменьшается на 0.015мм с увеличением скорости на 15.7 м/с. При одинаковых условиях проникновения и выполнения процесса у гранита ГБ предельная глубина проникновения – чуть больше и она составляет с 0.022мм ( $V_s= 7.85$  м/с) до 0.018 мм ( $V_s=15.7$  м/с) [9,10] .

#### Выводы

Развитие и применение новых алмазных приборов при обработке мрамора и гранита подразумевает познание процессов, создающихся при взаимодействии абразивное зерно – материал, происходящий из горной породы.

На выбор режима резания и характеристик инструмента очень большое влияние показывают физическо-механические свойства материала, происходящего из горной породы, прежде всего абразивность (сопротивление изнашиванию), напрямую влияющая на изнашивание инструмента. Сравнивая следы микрорезания на мраморе и граните, замечено, что мелкозернистые варианты структур более благоприятны к обработке, так как и наличие частичного и полного выкрашивания зерна меньше выражено в отношении к крупнозернистым структурам.

На повышенных температурах мрамор терпит модификации, химические преобразования и сторание отдельных минералов. Особенно необходимо учитывать влияние влажности на уменьшение прочности мрамора. Проведенные исследования обеспечили установление предельной глубины проникновения зерна, а тем самым и резание при обработке мрамора и гранита, а также и компоненты сопротивления резанию в функции скорости и глубины проникновения зерна. Развитие радиальных трещин говорит о необходимости ротации обрабатываемой детали в горизонтальной плоскости, чтобы могло обеспечить их скрещение, а тем самым и образование стуржки в виде блоков меньших размеров, что приводит к увеличению качества обрабатываемой поверхности вышеуказанных видов мрамора. Сравнением сил при микрорезании, можно сделать вывод, что при одинаковых глубинах и скоростях резания сила резания 40 - 80 % больше у ГЙ чем у ГБ, что можно пояснить большей твердостью, прочностью и плотностью.

*Анотація.* В даній роботі показані результати дослідження, що були проведені на Машинобудівному факультеті в м. Белграді в області мікрорізання крихких матеріалів. Проаналізована взаємодія між алмазним зерном і мрамором та гранітом, що обробляються. Експериментально встановлена зміна нормальної складової сили різання у функції швидкості різання і глибини проникнення при мікрорізанні на двох видах мрамору та граніту з родовищ в Республіці Сербії. На основі залишків на граніті і тріщин, що виникли, встановлена критична глибина проникнення зерна, при якій виникає крихке руйнування. Наведені дослідження мають допомогти оптимізації процесу шліфування і полірування, які є домінуючими технологіями завершальної обробки граніту.

*Ключові слова:* тріщини, викривування, сила різання, граніт, мрамур.

*Abstract.* The paper shows the results of investigations performed in the brittle materials micro-cutting at the Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade University. The interactions between a single diamond grain and the machined marble and granite are analyzed. The change in the normal cutting force as a function of cutting speed and grain penetration depth was experimentally

established in micro-cutting of two types of stone, marble and granite, originating from Serbia. Based on the grain traces on granite and the generated cracks, the critical grain penetration depth for the formation of brittle fracturing was established. The investigations mentioned should assist in the optimization of the grinding and polishing processes as technologies dominant in the granite finishing.

*Keywords:* cracks, fracture, cutting force, granite, marble.

1. *Inasaki I.*, 1987, Grinding of Hard and Brittle Materials, Annals of the CIRP: 463-471.
2. *Mishnaevsky, L.L.*, 1994, Investigation of the cutting of brittle materials. Int. J. Mach. Tools Manuf., **34**: 499–505.
3. *Chiaia, B.*, Fracture Mechanisms Induced in a Brittle Material by a Hard Cutting Indenter, International Journal of Solids and Structures, 38/44-45: 7747-7768.
4. *Bates R.L.*, 2002, Industrial Minerals and Rocks, 4<sup>th</sup> Ed., Editor Stanley Leford, AIME, New York: 3-7, 65-96; 157-174.
5. *Ferrero A.M., Marini P.*, 2001, Experimental Studies on the Mechanical Behaviour of two Thermal Cracked Marbles, Rock Mech. Rock Eng. 34/1: 57-66.
6. *Wong L.H.*, 1982, Micromechanics of faulting in westerly granite, Int J Rock mech Min Sci Geomesh, 19: 49-64.
7. *Nara Y., Koike K., Yoneda T., Kaneko K.*, 2006, Relation between subcritical crack growth and crack paths in granite, Int. J. Rock Mech Min Sci., 43/8: 1256- 1261.
8. *Tanovic Lj., Bojanic P., Puzovic R., Klimenko S.*, 2009 „Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Marble Grinding“, *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 131 / 6, 064507-(1-5)
9. *Tanovic Lj., Bojanic P., Puzovic R., Milutinovic M.*, 2011, „Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Granite Grinding“, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 133 / 2, 024501-(1-5) .
10. *Танович Л., Боянич П., Попович М., Младенович Г.*, 2011, Специфичности микрорезания камня на основе гранита, XII Международная научно-Практическая конференция “Прогрессивная техника и технология”, Севастополь, Вестник машиностроения, вол.63: 99-103

#### REFERENCES

1. *Inasaki I.*, 1987, Grinding of Hard and Brittle Materials, Annals of the CIRP: 463-471.
2. *Mishnaevsky, L.L.*, 1994, Investigation of the cutting of brittle materials. Int. J. Mach. Tools Manuf., **34**: 499–505.
3. *Chiaia, B.*, Fracture Mechanisms Induced in a Brittle Material by a Hard Cutting Indenter, International Journal of Solids and Structures, 38, 44-45: 7747-7768.
4. *Bates R.L.*, 2002, Industrial Minerals and Rocks, 4<sup>th</sup> Ed., Editor Stanley Leford, AIME, New York: 3-7, 65-96; 157-174.
5. *Ferrero A.M., Marini P.*, 2001, Experimental Studies on the Mechanical Behaviour of two Thermal Cracked Marbles, Rock Mech. Rock Eng. 34, 1: 57-66.
6. *Wong L.H.*, 1982, Micromechanics of faulting in westerly granite, Int J Rock mech Min Sci Geomesh, 19: 49-64.
7. *Nara Y., Koike K., Yoneda T., Kaneko K.*, 2006, Relation between subcritical crack growth and crack paths in granite, Int. J. Rock Mech Min Sci., 43, 8: 1256- 1261.
8. *Tanovic Lj., Bojanic P., Puzovic R., Klimenko S.*, 2009 „Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Marble Grinding“, *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 131, 6, 064507-(1-5)
9. *Tanovic Lj., Bojanic P., Puzovic R., Milutinovic M.*, 2011 „Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Granite Grinding“, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 133, 2, 024501-(1-5) .
10. *Tanovic Lj., Bojanic P., Puzovic R., Mladenovich G.*, XII Mezhdunarodnaja nauchno-Prakticheskaja konferencija, 2011, no 63, pp. 99-103