

ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСА РЯЗАНЕ НА СКАЛНИ МАТЕРИАЛИ С ДИАМАНТЕНИ ДИСКОВЕ

Борис Борисов, Стефан Ангелов, Николай Петков

Технически университет – София, факултет Автоматика, 1000 София, ashmodean_@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Обработката на скални материали включва процеси, консумиращи значителна електроенергия. Оптимизацията на работните режими за постигане на максимална производителност с конкурентно качество при намалена енергийна консумация е задача с определена актуалност. В доклада, на базата на анализ на аналитични зависимости от теорията на рязането, се предлага методология за избор на оптимални електромеханични параметри (скорости, сили, мощности) за режима на рязане. Методологията е приложима при използване на съвременни системи за електрозадвижване и управление на дискови режещи машини.

PROCESS OF ROCKY MATERIALS DIAMOND DISC SAWING OPTIMIZATION

Boris Borisov, Stefan Angelov, Nikolay Petkov

Technical University of Sofia, Faculty of Automatics, 1000 Sofia, ashmodean_@abv.bg

ABSTRACT. The treatment of rocky materials is a process that consumes significant quantity of electrical power. Working regime optimization for maximal productivity and high quality achievement in the condition of reduced energy consumption is a task of great importance and significance. This report offers methodology of choosing of optimal electromechanical parameters like speed, force and power that reflect the mode of sawing, based on the theoretical analysis of analytical saw relations. The methodology can be applied in contemporary electrical drive control systems that contain disc sawing machines.

Въведение

Интензивното развитие на микропроцесорната и силовата преобразователна техники позволиха през последното десетилетие да бъдат създадени на достъпна цена каменно-обработващи машини, удовлетворяващи по-пълно критерия за максимално произведена конкурентна продукция при минимум производствени разходи.

Оптимизацията на работните режими по този, или друг близък на него критерий е била задача винаги актуална, но трудно решима, особено за ранните етапи в развитието на управлението на тези машини, основно поради:

- незадоволителната точност на необходимото за целта математическо описание на физиката на процесите при каменообработката;
- ограниченият обем на експерименталните изследвания, насочени към повишаване точността на често идеализираните в теоретично отношение разглеждания.

Рязането с диамантени дискове е задължителна операция при обработката на скални материали. Неговите показатели за качество при разглеждането му като производствен процес за почти всички използвани технологии са определящи както за производителността, така и за цената на продукта. Прямо функционалните възможности на режещите машини, оптимизацията на режимите практически означава рязането на даден скален

материал да се осъществява със следните, предварително указани параметри:

- конструкция и размери на режещия диск, диаметър $D_d (2R_d)$ [мм], широчина на диамантения сегмент d_d [мм] (дебелина на слоя, когато е непрекъснат);
- дълбочина на рязането H_p [мм];
- периферна скорост на диска V_o :

$$V_o = \frac{\pi \cdot D_d \cdot n_d}{60} \text{ [м/сек]} \quad (1)$$

задавана чрез оборотите на диска - n_d [об/мин];

- скорост на хоризонталното подавателно движение V_x [м/мин].

С рязането се задават и линейните размери на скалните материали – дебелина, широчина, дължина. Постоянството в размерите на облицовъчните плочи е определящо за качеството им. Ето защо участващите при рязането спомагателни движения трябва да бъдат оразмерявани и управлявани, като позиционни системи със зададена точност при спиране.

В приложен аспект, интересът на дадена фирма обработваща скалооблицовъчни материали към оптимизацията на режимите на рязане, се свежда до получаване на

указания за облекчен (чрез диаграми, таблици и др.) избор на горепосочените параметри на диска и скоростите на движенията при дадена дебелина на рязането, за даден тип обработван материал. В съвременното производство за добив и обработка на скални материали не е възможно да бъдат получени добри финансови резултати, ако не се отчитат специфичните за процеса на обработка особености на скалния материал. За фирма, работеща в България, най-добре е горните параметри да касаят обработката на масово добиваните мрамори (Струмяни, Илинденци, Копревлен) и варовика от района Враца – Мездра. В търсенето на възможните отговори на поставените въпроси е и целта на предлагания по-долу анализ.

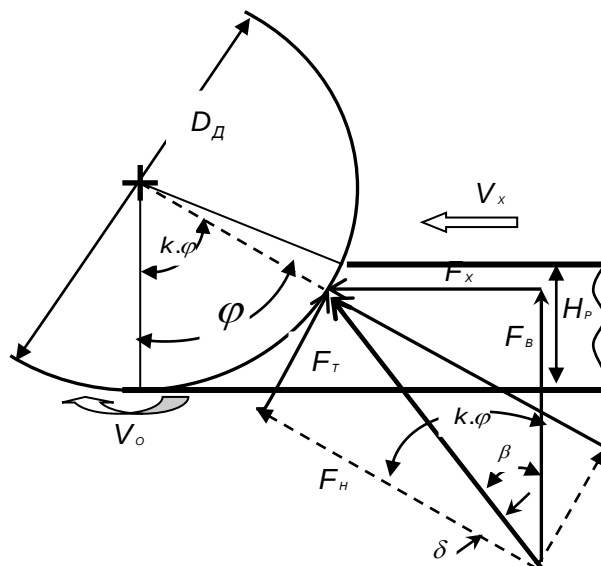
В страни, водещи за каменообработката, (Butter, 1974; Mamalis et al, 1979; Александров, 1979) се появиха и първите резултати от изследователската дейност, с цел оптимизация на режима “дисково рязане” (Yu, 2003; Konstanty, 2002; Denkena et al, 2003; Александров и Мечник, 1997). У нас авторите на публикациите за тази област основно са преподаватели в МГУ “Св. Иван Рилски”, гр. София или техни възпитаници (Мърхов, 1993, 2003; Цветков и Грозева, 2002; и др.). Държавно-финансирано научно-изследователско звено, непрекъснато работещо по проблемите на каменообработката у нас не е имало както в близкото минало, така и в периода след смяна на собствеността. Това е причина за сравнително ограничения брой публикации и научно-приложни разработки у нас. С това се обяснява и чувството на глад в терминологично отношение. Няма добре наложени се понятия, например известната на всеки от тази сфера “фаша” се среща като “лента, ивица” и др. По подобен начин стои и въпроса с английското понятие “slab”, с буквалния превод у нас “слаб”, назовавана в някои източници “голяма плоча” и др.

Авторите на доклада се спират на този въпрос, защото тези понятия са основни при дисковото рязане. При разрязването на слаба се получават фаши, а при тяхното нарязване се получават плочи. Като приемат тези наложени се терминологично понятия, авторите считат за нецелесъобразна работата по подмяната им.

Относно избора на параметрите на диска

На фиг. 1 са показани участващите сили в процеса на рязане: F_T – тангенциална, F_H – нормална, F_X – хоризонтална, F_B – вертикална.

На фиг. 2 е дадено използваното от много автори (Yu, 2003; Konstanty, 2002; Denkena et al, 2003; Xu et al, 2002; Li et al, 2002) идеализирано представяне на обема отнет материал при рязането от едно диамантено зърно. По аналогия с металообработката е прието, че отнетия материал е непрекъсната стружка с максимална дебелина h_{c_max} .

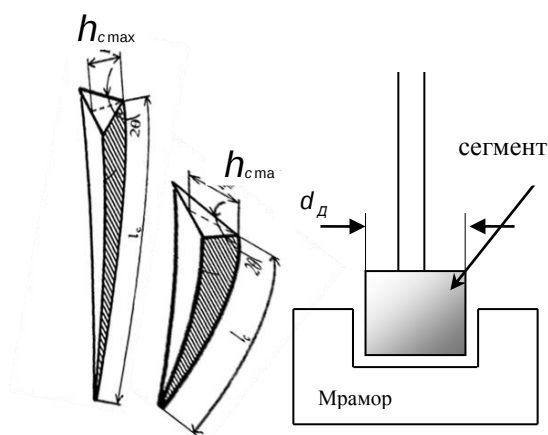


Фиг. 1. Диаграма на силите действащи в процеса на рязане.

Постоянен е стремежа на фирмите производители да подобряват качеството на диамантените дискове и да намаляват цената им. При еднакви други показатели важни за оптимизацията на режима на рязане са параметрите на диска, предмет на избор при покупката му: диаметър D_d и ширина на диамантения сегмент d_d .

Оправдано е желанието на работещите в този отрасъл да режат по-дебел скален материал с по-малък диаметър на диска D_d .

Освен по-ниската покупна стойност на диска и на режещата машина като цяло се намаляват инерционните моменти и сили, което предполага по-добро балансиране на диска и по-малко “биене” при работата му. Обикновено дисковете с по-малък диаметър имат и по-малка ширина на диамантените сегменти (фиг. 2).



Фиг. 2. Илюстрация на идеализирана стружка сваляна от един диамант и канала срязан в материала от сегментите на диска.

В (Han et al, 2007) експериментално е доказано, че при равни други условия (дебелина на рязането, производителност и др.) при рязане с два пъти по-тънък диск се постига 30% намаление на консумираната електроенергия. Установено е и значително намаление на отношението на тангенциалните сили при рязане с дебел $F_{ТДД}$ и тънък диск $F_{ТТД}$ ($F_{ТДД} = 1.3F_{ТТД}$). Съобщава се също и за намаляване на съотношението на нормалните сили.

Консумираната от двигателя мощност P_d при преодоляване на тангенциалната сила F_T е:

$$P_d = M_d \omega = R_d \cdot F_T \cdot \omega = F_T \cdot V_o \quad [W] \quad (2)$$

където: M_d и ω са съответно момента и ъгловата скорост на двигателя.

Като резултантна съпротивителната сила

$$F_T = F_P + F_{ТРД} + F_{ТРМ} + F_{ИЗХ} \quad [N] \quad (3)$$

където F_P – силата, свързана с разрушаване на скалния материал (същинското рязане);

$F_{ТРД}$ – сила на триене на диамантите с материала;

$F_{ТРМ}$ – сила на триене между работната повърхност и отнетия (разрушения) материал;

$F_{ИЗХ}$ – силата, необходима за изхвърляне на отпадъчния материал извън среза.

В $F_{ТРМ}$ и $F_{ИЗХ}$ се включват и силите, необходими за раздробяване на отпадъчния материал до структурата на познатия ни шлам. Въпреки, че големината на F_P зависи от редица фактори (вид на материала, производителност и др.) съгласно (Александров и др, 1984) тя не превишава 1/5 от F_T . За намаляване на $F_{ТРМ}$ и $F_{ИЗХ}$ е желателно да се реже с по-малка контактна повърхност между диска и материала, при $H_P = const$ означава по-малък диаметър D_d .

Подобен е ефекта и при рязане с къси стружки. При равни обеми на идеализираната стружка от фиг.2 е по-добре да се работи с по-дебели, но къси стружки т.е. увеличено h_{c_max} при намалена дължина L_c .

$$L_c = \varphi \cdot R_d \approx \sqrt{D_d \cdot H_P} \quad [mm] \quad (4)$$

където: φ е ъгъла на контакт между диска и рязания материал (Александров, 1979):

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{2H_P}{D_d}\right) \quad (5)$$

Съгласно (Xu and Li, 2003) приложната точка на резултантната сила F_P се намира на ъгъл:

$$k\varphi = \delta + \beta = \arctg \frac{F_T}{F_H} + \arctg \frac{F_X}{F_B} \quad (6)$$

Големината на ъглите δ и β изразени съответно с F_T/F_H и F_X/F_B се получават като тригонометрични зависимости от фиг.1.

При зададена производителност

$$Q = V_x \cdot H_P \quad [m^2 / мин] \quad (7)$$

и по-малък диаметър на режещия диск (по-малко L_c) ъгълът φ нараства, което е предпоставка за по-големи стойности на $k\varphi$ и при $k = const$. За предпочитаните по-големи стойности на отношението F_T/F_H (Denkena et al, 2003; Xu and Li, 2003) съответно и δ нараства, което определя като желателно по-големи стойности на $k\varphi$.

Интерес представлява експерименталното потвърждение на това очакване при обработка на различни по свойства материали.

Относно избора на скоростите V_x и V_o

Проникването на диамантените зърна в обработваемия материал, от подавателното движение (скорост V_x) и разрушаването на материала от въртенето на диска (скорост V_o) са двете взаимносвързани действия при диамантено абразивното рязане. Дълбочината на проникване, т.е. дебелината на отнемания материал h_{c_max} , може да се разглежда като индикатор на натоварването, което изпитва диаманта при рязането.

В процеса на рязане редица фактори променят големината на h_{c_max} . Поддържането на $h_{c_max} = const$ е практически нереализуемо, но е желателно измененията в големината му да бъдат в определени граници.

При дадена дълбочина на рязане $H_P = const$ за увеличаване на производителността Q е необходимо да се зададе по-висока скорост на подаване на материала V_x . При това нарастват и F_T и F_H (Xu and Li, 2003; Xu et al, 2002;). Увеличава се дебелината на идеализираната стружка h_{c_max} .

При стойности по-малки от тези от желания диапазон, нормалната сила F_H е недостатъчна за преодоляване на еластичните сили на материала, от тук не следва и разрушаването на структурата му, т.е. няма рязане. Това е процес на триене с голяма стойност на $F_{ТРД}$, свързан със значителна консумация на електроенергия, при който се заоблят режещите ръбове на диамантените зърна, а от там като цяло и режещата способност на инструмента се намалява. Характерни за този режим са големите

стойности на F_T и F_H и малкото им отношение F_T/F_H (Xu and Li, 2003).

При стойности на h_{c_max} по-големи от изпъкването на диаманта се осъществява директен контакт между обработваемия материал и свързката (материалът, свързващ диамантите), а това води до увеличаване на F_{TPM} и до интензивното ѝ износване. Рязането с големи стойности на h_{c_max} е процес, при който диамантените зърна са силно натоварени (голяма стойност на F_T), а това съчетано с намалената задържаща способност на бързо износащата се свързка, предизвиква тяхното изкъртване. Това е режим с голям разход на инструмент. Дискът бързо се изхабява поради факта, че новоразкритите диаманти не могат да компенсират бързо загубените от големите натоварвания режещи диаманти. Показателят "Разход на инструмент" - $C_{и}[m^2/mm]$, използван в литературата (Yu, 2003; Li et al, 2002; Liao and Luo, 1992; Luo, 1996) е реципрочен на показателя "Износоустойчивост", като се определя от отрязаната площ за единица радиално износване на диска.

Сведена до състоянието на диамантеното зърно, разглежданата в доклада оптимизация означава осигуряване на висока режеща способност при минимално износване на зърната, съчетано с минимум на консумираната енергия. В литературата (Li et al, 2002; Liao and Luo, 1992; Luo, 1995, 1996) този режим се нарича "Free cutting". Това е ефективен режим на рязане, освободен от присъствието на неоправдано големи сили. При него натоварването на захабените режещи ръбове по диамантените зърна е такова, че те се чупят като създават нови остри. Този процес на обновяване на режещите ръбове е с микро характер и води до бавно износване на диамантите. Степента на износване на свързката отговаря на тази на износването на диамантите. Те се разкриват умерено в процеса на рязане, което ги предпазва от прибързано счупване, т.е. намалява се разхода на инструмент $C_{и}$. Това е режим с неголеми F_T и F_H и голяма стойност на отношението F_T/F_H . Стойностите на h_{c_max} се поддържат в границите на желанения диапазон, гарантирайки при това максимална производителност.

За получаването на режима е необходимо да се извърши подходящ избор на редица параметри, като скоростта на подаване V_x , периферната скорост V_o , дълбочината на рязане H_p , типа на диска с технически данни за големината на концентрацията на диаманта, твърдостта на свързката, диаметъра на диска, ширина на сегмента.

Взаимно обвързани в процеса на рязане, всички тези параметри са включени в израза за големината на h_{c_max} (Yu, 2003; Konstanty, 2002):

$$h_{c_max} = \sqrt{\frac{3.V_x}{V_o.\lambda.\tan\theta.K_d}} \sqrt{\frac{H_p}{D_d}} = \sqrt{\frac{3.Q}{V_o.\lambda.\tan\theta.K_d.L_c}} \quad [\mu m] \quad (8)$$

където: 2θ е ъгъла при върха на диаманта, формиращ и ъгъла в основата на стружката, съгласно фиг. 2,

K_d е брой на работещите диаманти в процеса на рязане и

λ е отношението между дължините на сегментите и каналите на диска.

Тази зависимост е база за разглежданата оптимизация на режима на рязане, при обработка на конкретен материал. Съвременните системи за задвижване и управление на режещите машини могат да гарантират поддържане с достатъчна точност на желаните стойности на V_x и V_o , необходими за осигуряване на желаните стойности на h_{c_max} , (режим Free cutting), съгласно (Li et al, 2002; Liao and Luo, 1992).

Веднага трябва да се отбележи, че извън теоретичните разглеждания за практическото въвеждане на режима е необходимо да бъдат направени достатъчно по обем и продължителност експериментални изследвания, касаещи обработката на конкретния материал, или група материали с близки свойства.

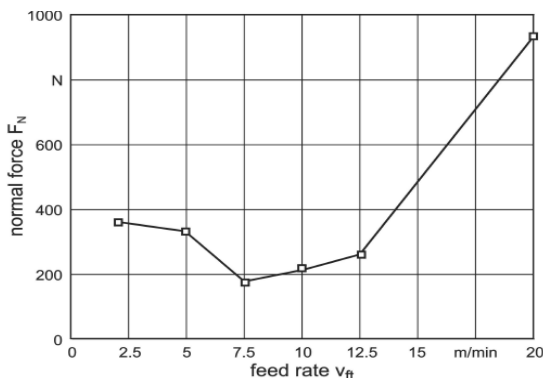
Основно изследванията се свеждат до:

1. Определяне характера на изменение на силите F_T и F_H , при промяна на скоростта V_x и различни $V_o = const$ за различни по тип и характеристики режещи дискове при $Q = const$.
2. Експериментално снемане на семейство зависимости, касаещи консумираната електроенергия за единица разрязана площ и $V_x = var$ ($V_o = const$), и обратно, при различни дебелини на рязането H_p .
3. Експериментални изследвания на степента на влияние, върху качеството на режима на рязане, за очакваните изменения в стойностите на избираемите при оптимизацията параметри.

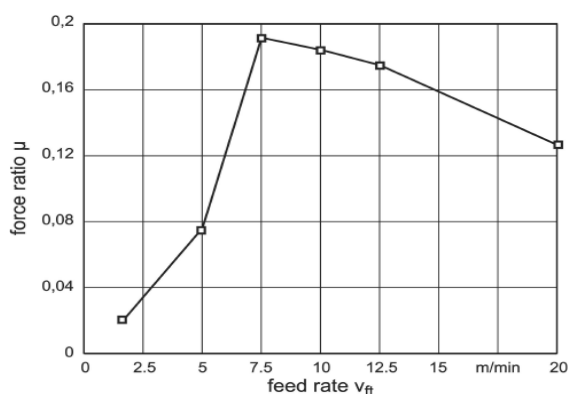
В публикации в последните години все по-често се дават резултати от подобни експериментални изследвания, насочени именно към подобряване качеството на режима на рязане.

В (Denkena et al, 2003) е дадена зависимостта на F_H и отношението F_T/F_H при различни стойности на скоростта V_x . Установен е минимум на F_H и максимум на отношението F_T/F_H при определена стойност на V_x . (фиг. 3,4) При оптимизация на режимите (режима Free

Cutting) е характерна намалената стойност на F_H и максимум на отношението F_T/F_H . В тази връзка е и правилно посочена съответната скорост на V_x като оптимална за проведения експеримент.



Фиг. 3. Влияние на скоростта на подаване V_x (feed rate V_{ft}) върху нормалната сила F_N (normal force F_N) при обработката на гранит тип: Imperial Red.



Фиг. 4. Отношение на F_T/F_N (force ratio) в зависимост от скоростта на подаване V_x (feed rate V_{ft}) при обработката на гранит тип: Imperial Red.

В (Li et al, 2002) експериментално се изследва зависимостта за разход на инструмент $C_{in} = f(V_x)$ при $Q = const$ и $V_o = const$.

Определена е стойността на h_{c_max} , при която рязането на посочения материал е с минимум разход на инструмент.

Изследвания по отношение на изнosoустойчивостта на различни по тип дискове при продължителна работа се дават в (Liao and Luo, 1992, 1993; Luo, 1995, 1996). Доказано е че продължителността на работа е силно съкратена за дискове, неподходящо избрани по тип, спрямо качествата на обработваемия материал.

Посочените по-горе експериментални резултати, разгледани като самостоятелни научни съобщения касаят отделни страни на процеса на оптимизация на рязането. Тяхното обединение на базата на физическите представи за процеса, потвърждава интуитивно очаквани връзки и зависимости, необходими за оптимизацията, които чисто теоретично не могат да бъдат изведени, заради

неточностите на математическото описание на процеса. Това формира и убеждението, че при достатъчен обем експериментални изследвания, проведени в методична последователност, е възможно да се постигне оптимизацията на режима по разглеждания критерий.

Изводи

В заключение, относно получените в работата резултати могат да се направят следните изводи:

1. На база анализ на известни зависимости от теорията на диамантено - абразивното рязане и множеството проучени публикувани резултати, е показана възможността за оптимизация на режима на рязане, изискваща наличието на определени експериментално снети резултати, отчитащи и свойствата на обработваемия материал.

2. Показано е, че ако при рязането на определен вид материал се поддържа в определени, експериментално потвърдени граници, стойността на дебелината на отнемания материал от диамантеното зърно, то това е достатъчно условие за оптималност на процеса. Избираеми параметри са скоростта на подаване на материала, периферната скорост на определения тип диск, както и параметрите му диаметър, ширина на сегмента и концентрация на диамантите.

Благодарности

Работата по статията е частично финансирана по проект № 08209pd-8 на Технически университет – София.

Литература

- Александров, В. А. 1979. *Обработка на природного камня алмазным дисковым инструментом*. Киев, Научовая думка, 167 с.
- Александров, В. А., Алексеенко, Н. А., Мечник, В. А. 1984. Исследование силовых и энергитических параметров резки граните алмазными дисковыми пилами. *Сверхтвердые материалы*, т.6, 35-39.
- Александров, В. А., Мечник, В. А. 1997. Определение коэффициента износа алмазного отрезного круга в процессе его работы. *Сверхтвердые материалы*, т.6, 35-39.
- Мърхов, Н. 2003. *Обработка на декоративни скални материали*. Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София, 344с.
- Цветков, М. И Грозева, К. 2002. Относно някои технологични характеристики на диамантените дискове за рязане на скални материали.- *Год. МГУ „Св.Ив.Рилски“*, т.44-45, св. III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, София, 49-51
- Buttner, A. 1974. Diamond tools and stone. *IDR*, 45, May, 89 - 93
- Denkena, B., Tonshoff, H.K., Friemuth, T. and Glatzel, T. 2003. Development of advanced tools for Economic and Ecological Grinding of Granite. *KEM*, vol. 250, 21-32

- Han, Q.L., Y. Li, X.P. Xu. 2007. A Comparative Study of Stone Sawing with Thin and Normal Blades. *KEM*, Vol. 329 687-691
- Konstanty, J. 2002. Theoretical analysis of stone sawing with diamonds. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, 146-154.
- Li, Y., H. Huang, J. Y. Shen, X. P. Xu, Y. S. Gao. 2002. Cost-effective machining of granite by reducing tribological interactions. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, 389-394.
- Liao, Y.S., Luo, S.Y. 1992. Wear characteristics of sintered diamond composite during circular sawing. *WEAR*, Vol.157 325-337.
- Luo, S. Y., Y. S. Liao. 1993. Study of the behaviour of diamond saw-blades in stone processing. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 51, 296-308.
- Luo, S. Y. 1995. Investigation of the worn surfaces of diamond sawblades in sawing granite. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 70, 1-8.
- Luo, S. Y. 1996 Characteristics of diamond sawblade wear in sawing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol.36, 661-672
- Mamalis, A. G., Schulze, R., Tonshoff, H. K. 1979. The slotting of blocks of hard rock with a diamond segmented circular sawblade. *IDR*, October, 356-365.
- Xu, X. P., Y. Li, W. Y. Zeng, L. B. Li. 2002. Quantitative analysis of the loads acting on the abrasive grits in the diamond sawing of granites. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, 50-55.
- Xu, X.P., Y. Li. 2003. The Effects of Swarf in the Diamond Sawing of Granite. *KEM*, Vol.250, 187-193.
- Yu, Y.Q., X.P. Xu. 2003. Improvement on the Performance of Diamond Segments for Rock Sawing, Part 1: Effects of Segment Components. *KEM*, vol. 250, 46-53.

Препоръчана за публикуване от Редакционен съвет