

## СЪПРОТИВИТЕЛНИ СИЛИ И МОМЕНТИ ПРИ РЯЗАНЕ НА СКАЛНИ МАТЕРИАЛИ С ДИАМАНТЕНО ВЪЖЕ

**Борис Борисов<sup>1</sup>, Николай Петков<sup>2</sup>, Стефан Ангелов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Технически университет - София, 1000 София

<sup>2</sup> Технически университет - София, 1000 София, [nikipetkov\\_tu@abv.bg](mailto:nikipetkov_tu@abv.bg)

<sup>3</sup> Технически университет - София, 1000 София, [ashmodean\\_@abv.bg](mailto:ashmodean_@abv.bg)

**РЕЗЮМЕ.** Рязането с въжена режеща машина се осъществява при силно променящи се съпротивителни сили и моменти. Като резултат от възникналите динамични натоварвания се наблюдават чести късания на въжето или аварии в механичната част на машината. В доклада, въжестата режеща машина се разглежда като многомасова електромеханична система. Определени са статичните натоварвания и се предлагат решения за ограничаване на големината на динамичните натоварвания.

### RESISTIVE STRENGTHS AND TORQUES DURING THE PROCESS OF SAWING WITH DIAMOND WIRE SAWS

**Boris Borisov<sup>1</sup>, Nikolay Petkov<sup>2</sup>, Stefan Angelov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Technical University of Sofia, 1000 Sofia,

<sup>2</sup> Technical University of Sofia, 1000 Sofia, [nikipetkov\\_tu@abv.bg](mailto:nikipetkov_tu@abv.bg)

<sup>3</sup> Technical University of Sofia, 1000 Sofia, [ashmodean\\_@abv.bg](mailto:ashmodean_@abv.bg)

**ABSTRACT.** The sawing with diamond wire saws is performed in very harsh environment where highly variable resistive forces and torques are taking place. Frequent tearing of the rope and failures in the mechanical parts of the machine are observed due to the variation of the dynamic loads. In this paper the diamond wire saw machine is threaded as a multi-mass mechanical system. Determination of the static loads is offered and special attention is paid to the limitation of the dynamic loads.

### Въведение

Едно столетие разделя международния панаир в Париж през 1889 г., където за първи път е изложена машина за рязане на скални материали с гъвкав инструмент (въже) и 1983 г., в която фирмата "Diamant Boart" въведе втулки с многослойна структура на диамантените зърна, осигуряващи ефективност при рязането на твърди скални материали, наричани от нас често "гранити" (Ozcelik et al., 2006).

Както в този период, така и в годините след него основна задача за специалистите от тази област е работата насочена към подобряване техническите показатели на диамантеното въже, свързани с повишаване на:

-производителността  $Q$ , [ $m^2/h$ ]

-износоустойчивостта му, изразена чрез отрязаната площ от единица линейна дължина от него, [ $m^2/m$ ]

-якостните свойства на въжето, с цел намаляване на евентуалния брой на късванията му.

В резултат на тези усилия се достигна до техническо ниво, което определи в последното десетилетие режещите машини с диамантено въже, при добива и обработката на по-меки материали без алтернатива. Това се дължи главно на следните им по-важни предимства:

-с по-точните по размер и по-гладки разрези се добиват добре оформени блокове, удобни за допълнителните стандартни обработки, без значителни загуби на материал.

Това снижава силно и енергийните и транспортни разходи, -в сравнение с другите начини на рязане, при диамантеното въже практически няма ограничения по отношение на големината на реза, неговата начална форма и др. Възможно е разрезът да бъде хоризонтален, вертикален, или под някакъв ъгъл,

-по-добра мобилност на машините, благодарение на по-малките им габаритни размери и по-малката инсталирана мощност. За масово използваните машини, двигателят на задвижващата шайба е около 30 KW, което е съществено предимство, отчитайки проблемите с осигуряване на голяма захранваща електрическа мощност в кариерите.

Удобствата на рязането с диамантено въже умело се използват от създателите на каменообработващи машини. Свидетели сме на различни по предназначение, мощност и конструкции машини, с едно или повече едновременно режещи въжета.

По-малко убедителни са предимствата на тези машини при рязането на гранити. За постигане на еднаква производителност с мрамора, приложените сили при рязане на гранита трябва да бъдат почти на порядък по-

големи от тези при мрамора, като при това се консумира 5 пъти повече електроенергия (Cai and Mancini, 1988).

При работа със значителни по големина натоварвания на въжето се увеличава и броят на скъсванията му, което е основен недостатък на режещите с диамантено въже машини. Въпреки че води и до намаляване на производителността, основно проявление на този недостатък е немалкия риск да бъдат засегнати работещи лица от опасно движещото се с висока скорост скъсано въже, или изхвърлените при това диамантени втулки.

Независимо от тези успехи, от чисто приложен аспект на тази технология, в теоретично отношение стоят нерешени основни задачи като:

- математическо описание на процеса на рязане с диамантено въже и предлагане на изрази за определяне големините на участващите при рязането сили и моменти,
- оценка на динамиката на процеса на рязане и влиянието на динамичните моменти върху якостта (умората) на въжето и др.

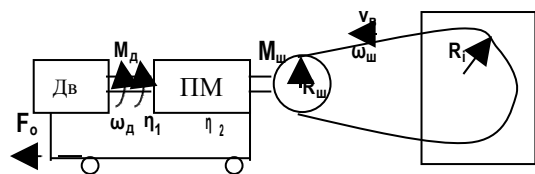
Ето защо в редица публикации, включително и в настоящата, авторите използват зависимости, изведени за механизми, сходни с физиката на процесите при диамантеното рязане, като гумено-лентови транспортьори, ремъчни предавки, лифтове и др.

В тази насока, да се даде дори и малък частичен отговор на нерешените, посочени по-горе твърде специфични въпроси, е и целта на направените по-долу в доклада разглеждания.

## Основни зависимости и съотношения

За кинематичната схема на режещата машина от фиг. 1 са валидни следните съотношения за мощностите:

$$M_d \omega_d \eta_\Sigma = M_\omega \omega_\omega = F_\omega R_\omega \omega_\omega = F_\omega v_\omega \quad (1)$$



Фиг.1.Кинематична схема на каменорезна машина с диамантено въже.

където:

$M_d$  – момента на вала на двигателя Дв в [N.m]

$\omega_d$  – ъглова скорост на двигателя в [rad/s]

$M_\omega$ , [N.m] е момента на задвижващата шайба, определен от приложената сила  $F_\omega$ , [N] и радиуса на шайбата  $R_\omega$ , [m]

$v_\omega = \omega_\omega \cdot R_\omega$  – периферна скорост на въжето в [m/s]

$\eta_\Sigma = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$  - общия коефициент на полезно действие (кпд) на предавателния механизъм ПИМ, между двигателя и въжето, определен от отделните кпд, (например  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$ )

на последователно свързаните в междинната предавка, механизми.

Периферната сила  $F_\omega$  е необходимата теглеща сила, приложена към шайбата и предадена на въжето за преодоляване на сумарните съпротивителни сили:

$$F_{c\Sigma} = F_p + \Delta F_{zar} = F_p + F_1 + F_2 \quad (2)$$

където:

$F_p$  – силата, свързана с процеса на рязане

$\Delta F_{zar}$  – сили на загуби

$F_1$  – сили на триене между въжето и камъка

$F_2$  – сили свързани с изхвърляне на отпадъчния материал от среза.

Коректно е да се отбележи, че при необходимост, силите на загуби, могат да се разбият на по-голям брой съставлящи. В случая те са окупнени до  $F_1$  и  $F_2$ .

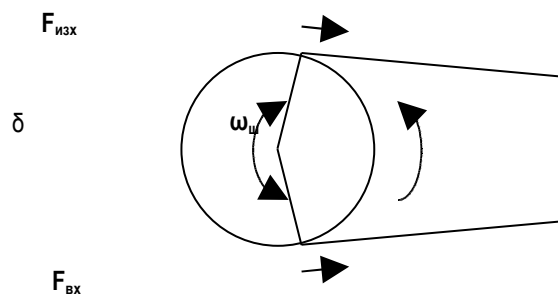
За наличието на необходимата задвижваща сила  $F_\omega$ , не трябва да има приплъзване (буксуване) между въжето и задвижващата го шайба. В тази връзка тук с достатъчна точност може да се използва уравнението на Ойлер:

$$F_{изх} \leq F_{вх} e^{\mu\delta} \quad (3)$$

даващо необходимото съотношение между силите на опън на входящия  $F_{вх}$  и изходящия  $F_{изх}$  (по отношение на разрязвания блок) клон на въжето, като тяхната разлика е:

$$F_{изх} - F_{вх} = F_\omega \quad (4)$$

Тук  $\mu$  е коефициент на триене въже-шайба, а  $\delta$  е ъгъла на обхващане (фиг. 2) (Dunda, 1996):



Фиг.2.Задвижване на задвижващата шайба.

## Режими на рязане

### Статични режими

Рязането с диамантено въже принадлежи към диамантено-абразивното рязане, чиято физика на процеса се свежда до две действия. Проникване на диамантените зърна (на втулките) в скалата и придвижването им в нея, разрушавайки структурата ѝ. Това се постига благодарение на еластичността на въжето и действието на

силите на опън в него, породени от приложената сила  $F_o$ , към движещата се платформа на машината (фиг. 1).

В периферията на задвижващата шайба, определена от ъгъла на обхващане  $\delta$ , действуват сили на натиск (от нормалната съставка на силата) с които се осигурява достатъчна стойност на коефициента на триене  $\mu$  на предавката шайба-въже, а като резултат на всичко това и възможност за предаване на теглеща сила и механична мощност на въжето.

От друга страна в линията на среза също действуват сили на натиск между въжето и скалата (от нормалната съставка на силата) които трябва да бъдат достатъчни по големина за проникване на диамантите в разрязвания материал.

При увеличаване на  $F_o$  се постига проникване на по-голям брой диаманти, на по-голяма дълбочина в скалата. Това определя по-голяма стойност на силата  $F_p$  (разгледана като сумарна тангенциална сила). Това ще доведе до увеличаване на силата  $F_{c\tau}$ , а от там и на големината на опъна  $F_{изх}$ , и до намаляване на опъна във входящия клон  $F_{вх}$ . Ако тези текущи стойности на  $F_{изх}$  и  $F_{вх}$  удовлетворяват условието на Ойлер, то предавката шайба-въже не приплъзва. При по-нататъшно увеличаване на  $F_{c\tau}$ ,  $F_{изх}$  може да достигне стойности, които съответно с намалените стойности на  $F_{вх}$ , да не удовлетворяват условието на Ойлер и практически в резултат от това претоварване ще се получи приплъзване на предавката.

Това поставя с особена острота въпроса с правилния избор на големината на зададената сила  $F_o$ .

В началото при започване на даден разрез, въжето контактува с най-изпъкналите части от скалния материал в линията на реза. Силата  $F_{c\tau}$  е със силно променлив характер. Явяват се динамични сили  $F_{дин}$  от разликата:

$$F_{дин} = F_{ш} - F_{c\tau} \quad (5)$$

При маса на въжето  $m_b = \text{const.}$ :

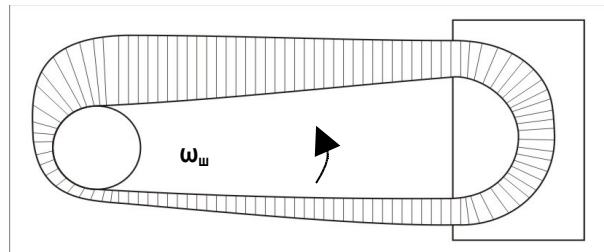
$$F_{дин} = m_b \cdot \frac{dv_b}{dt} \quad (6)$$

Измененията на скоростта  $v_b$  са причина за наблюдаване на нежелани колебания в двата клона на въжето. За този етап от зарязването е необходимо бавно и плавно увеличаване на силата  $F_o$ .

В процеса на рязане, контактните точки между въжето и скалния материал бавно прерастват в част от прекъсната крива, които се съединяват в даден момент от рязането в непрекъсната. Траекторията на тази крива се променя като началната ѝ форма зависи от тази на скалния материал. Ако в тази траектория има участъци, които биха могли да се апроксимират като части от окръжност, с радиус  $R_i$

(фиг. 1), то нормалната съставка на силите (по  $R_i$ ) е обратнопропорционална на големината на радиуса. В тези участъци въжето упражнява по-голям натиск върху скалата, рязането там е по-интензивно, което води до увеличаване на радиуса и към по-равномерно разпределение на силите по траекторията на реза. Последната се превръща в част от окръжност с непрекъснато намаляващ радиус (Liu et al., 2004).

Ако в този режим на рязане се зададе подходяща сила  $F_o$  може да се осигури режим на интензивно рязане (т.е. по-голяма стойност на  $F_{c\tau}$ ) и което е по-важно, с по-малки колебания в стойността ѝ. Тук е възможно да бъдат наблюдавани макар и с малка продължителност установени режими  $F_{ш} = F_{c\tau}$ . На фиг. 3 е показана диаграмата на силите във въжето, за установен режим на работа. Напреженията са най-малки във входящия клон, и се увеличават по протежението на въжето към изходящия клон.



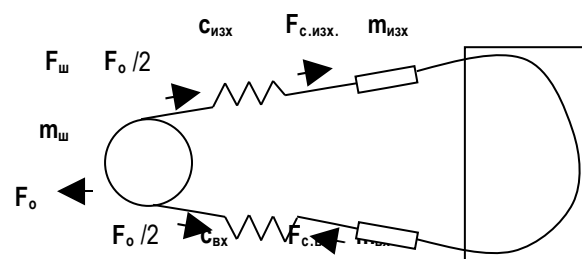
Фиг.3. Диаграма на силите в статичен режим.

Фигурата дава представа да бъдат определени областите, където е най-вероятно да се скъса въжето. В (Dunda and Kujundzic, 2001; Huang and Xu, 2006) са направени изследвания и е показано, че най-често въжето се къса:

- в точката на съединяване на краищата му,
- в напречните сечения на въжето, намиращи се на границата с втулките,
- в напречните сечения на въжето по средата между две втулки.

### Динамични режими

Машините за рязане на скални материали с диамантено въже представляват механични системи с разпределени по дължината на въжето параметри: маса на въжето, еластичност на въжето. Наличието на еластичен работен орган предопределя възникването на колебания. За описание на работата на машината в динамичен режим разпределените параметри се заменят с еквивалентни съсредоточени такива: маси, еластичности и сили (фиг. 4).

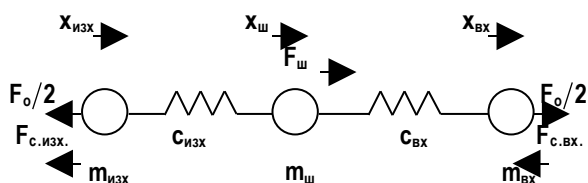


Фиг.4. Еквивалентна схема на каменорезната машина със съсредоточени параметри

На фигурата са показани следните означения:

- $m_{изх}$  и  $m_{вх}$  - маси, съответно на изходящия и входящия клонове на въжето, [kg]
- $c_{изх}$  и  $c_{вх}$  - коефициенти на твърдост на изходящия и входящия клон, [N/m]
- $F_{с.изх.}$  и  $F_{с.вх.}$  - резултантни съпротивителни сили, [N]
- $m_{ш}$  - приведена към постъпателното движение на въжето маса на електрозадвигването [kg.]

Динамичния модел на каменорезната машина е показан на фиг.5 (Ключев и Терехов,1980):



Фиг.5.Схема на каменорезната машина, като тримасова система

Движението на системата се описва със системата уравнения:

$$\begin{aligned} F_{ш} - c_{вх} (x_{ш} - x_{вх}) - c_{изх} (x_{ш} - x_{изх}) &= m_{ш} \ddot{x}_{ш} \\ c_{вх} (x_{ш} - x_{вх}) - (F_{с.вх.} - F_{о}/2) &= m_{вх} \ddot{x}_{вх} \\ c_{изх} (x_{ш} - x_{изх}) - (F_{с.изх.} + F_{о}/2) &= m_{изх} \ddot{x}_{изх} \end{aligned} \quad (7)$$

, където:

- $x_{ш}$ ,  $x_{вх}$ ,  $x_{изх}$  - пътищата, които изминават масите  $m_{ш}$ ,  $m_{вх}$ ,  $m_{изх}$  (m)
- $\ddot{x}_{ш}$ ,  $\ddot{x}_{вх}$ ,  $\ddot{x}_{изх}$  - ускорения на масите  $m_{ш}$ ,  $m_{вх}$ ,  $m_{изх}$ , (  $m/s^2$ )

Тъй като за участващите сили не съществуват аналитични зависимости, за тяхното определяне, при анализа на системата, те ще бъдат определяни експериментално. Това е бъдеща работа на авторите и резултатите от анализа ще бъдат предмет на друга публикация.

## Изводи

Направените разглеждания по отношение на въжените режещи машини, позволяват да бъдат направени следните препоръки, касаещи етапа на тяхното проектиране:

1.По отношение на двигателя, задвижващ шайбата е целесъобразно използването на честотопреобразуватели. За тези мощности в последните години сме свидетели на поевтиняването им, което вече ги прави по-достъпни за използване. С честотопреобразувателите ще се осигури:

- възможност за регулиране на скоростта и избор на желана периферна скорост на въжето,
- плавност на процесите на пускане и ускоряване на двигателя, което е съществено важно при заповане на даден разрез,
- ограничаване на големината на момента, развиван от двигателя, с което ще се ограничат и динамичните натоварвания в системата шайба-въже,
- намаляване на топлинните загуби в двигателя, както и икономия на електроенергия.

2. За задвижването на механизма, задаващ опъването ( $F_{о}$ ), е препоръчително да се използват системи със свойства източник на момент. Такава е системата, при която асинхронния двигател се управлява, чрез промяна на големината на напрежението на статора. Подобно решение се използва в задвижването на въжените режещи машини с диамантено въже на фирма „Pelegriini”.

Най-пълно удовлетворяване на тези изисквания, свързани с  $F_{о}$ , се постигат при използване на векторно управление на асинхронни двигатели (например системата DTC – direct torque control).

3. При отчитане на динамичните натоварвания в кинематичната верига на режещата машина, биха се получили резултати по-близки до реално протичащите процеси, тъй като установения режим на работа не е основен режим. От гледна точка на управлението, по време на работата, машината се държи непрекъснато в преходен режим. Анализът на поведението на системата би позволил да се формулират и други препоръки, с оглед ограничаване на динамичните натоварвания.

## Литература

- Ключев, В.И., Терехов, В.М.,1980 Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. – М. „Энергия”, 360 с.
- Cai, O., Mancini R. 1988. Diamond wire for cutting hard rock. - *Industrial Diamond review*, 212-214.
- Dunda S. 1996. Theoretical development of the estimate of diamond wire sawing plant. – *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*, 103-109.
- Dunda, S., Kujundzic, T. 2001. Tensile strength of steel ropes of diamond wire saws. - *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*, 57-61.
- Huang, G. Q., Xu, X. P. 2006. Analysis of the breakage of diamond wire saws in sawing of stone. – *Key Engineering Materials*, 123-126.
- Liu, B. C., Zhang, Z. P., Sun, Y. H. 2004. Sawing trajectory and mechanism of diamond wire saw. - *Key Engineering Materials*, 395-400.
- Ozcelik, Y., Bayram, F., Yasitli, N. E. 2006. The development of a model diamond wire cutting machine. – *Industrial Diamond Review*, 26-33.

Препоръчана за публикуване от Редакционен съвет