

NEUJEDNAČENOST PRIJENOSA GIBANJA DIJAMANTNE ŽIČNE PILE ZA EKSPLOATACIJU BLOKOVA ARHITEKTONSKOG KAMENA

Siniša DUNDA

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, YU-41000 Zagreb

Ključne riječi: arhitektonski kamen, dijamantna žična pila, prijenos gibanja, dinamička naprezanja.

U radu su provedena teorijska razmatranja prijenosa vučne sile s pogonskog kotača na dijamantnu žicu i pratećih pojava koje taj prijenos izaziva uslijed isprekidanosti promjera dijamantne žice. Matematički su obrađena kolebanja brzine i ubrzanja kao i dodatna dinamička naprezanja uzrokovana neravnomjernim gibanjem dijamantne žice. Na osnovi matematičke obrade i konkretnog računskog primjera izvedeni su zaključci o mogućnostima smanjenja tih dinamičkih naprezanja u radu dijamantne žične pile.

Key-words: dimension stone, diamond saw wire cutter, motion transmission, dynamic stresses.

This report is a theoretical discussion on the transmission of pulling force from the driving pulley to the diamond wire and the accompanied conditions caused by this transmission due to the interrupting diameter of diamond wire. The fluctuations of velocity and acceleration have been mathematically treated, as well as the additional dynamic stresses caused by uniform motion of diamond wire. On the basis of mathematical treatment and a concrete arithmetic case the conclusions have been made on the possibilities of decreasing these dynamic stresses in the operation of the diamond saw wire cutter.

Uvod

Velika primjena dijamantnih žičnih pila u eksploataciji arhitektonskog kamena uvjetovala je brzi razvoj različitih tipova i modela tih postrojenja. Brzina razvoja izbacila je iz upotrebe, kao zastarjele, mnoge od ovih strojeva za manje od jedne ili dvije godine nakon njihove pojave. Unatoč velikog broja proizvođača, tipova i modela, svi ovi strojevi se mogu svrstati, na osnovi svojih konstruktivnih karakteristika, u sedam osnovnih skupina (Bertolini, 1985). Faza ubrzanog razvoja još nije prošla. Konstruktori i proizvođači ovih strojeva i dalje usavršavaju postojeće i istražuju nove modele, tako da se stalno očekuju značajnije modifikacije i novi tipovi postrojenja.

Razvoj i primjenu dijamantnih žičnih pila prate i mnogobrojni publicirani prikazi u kojima se prezentiraju stečena dragocijena iskustva i prikupljeni rezultati rada. Međutim, taj razvoj ne prate odgovarajuća znanstveno teorijska razmatranja i istraživanja rada tih strojeva, kao ni matematički prikazi, odnosno proračuni koji bi olakšali bolje upoznavanje i izbor postrojenja. Stoga bi i ova teorijska razmatranja prijenosa gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu trebala upotpuniti postojeću prazninu u tom području.

Napinjanje na pogonskom kotaču

Princip rada kod svih modela dijamantne žične pile je identičan. Dijamantna žica se obavija oko površine koja će se piliti i zatvara u neprekinuti (»beskonačni«) tok preko pogonskog kotača stroja (sl. 1). Žicu pokreće pogonski kotač. Prijenos vučne sile s kotača na dijamantnu žicu postiže se trenjem,

jer žica nije pričvršćena za kotač, nego se po njemu pomiče uslijed trenja žice po kotaču.

Temeljni zakon trenja tankih savitljivih tijela postavili su L. Euler i Eytelwein još daleke 1765. g. (Arar, 1962). Oni su u teorijskom izvođenju formule pretpostavili potpuno savitljivu nit bez mase, krutosti i istezanja. Iako čelično uže nema tih svojstava, ipak je izvedena formula u praksi dobro poslužila za proračune prijenosa vučne sile trenjem s pogonskog kotača na savitljive vučne elemente kao što su na pr. čelično uže, remen, gumena traka i sl.

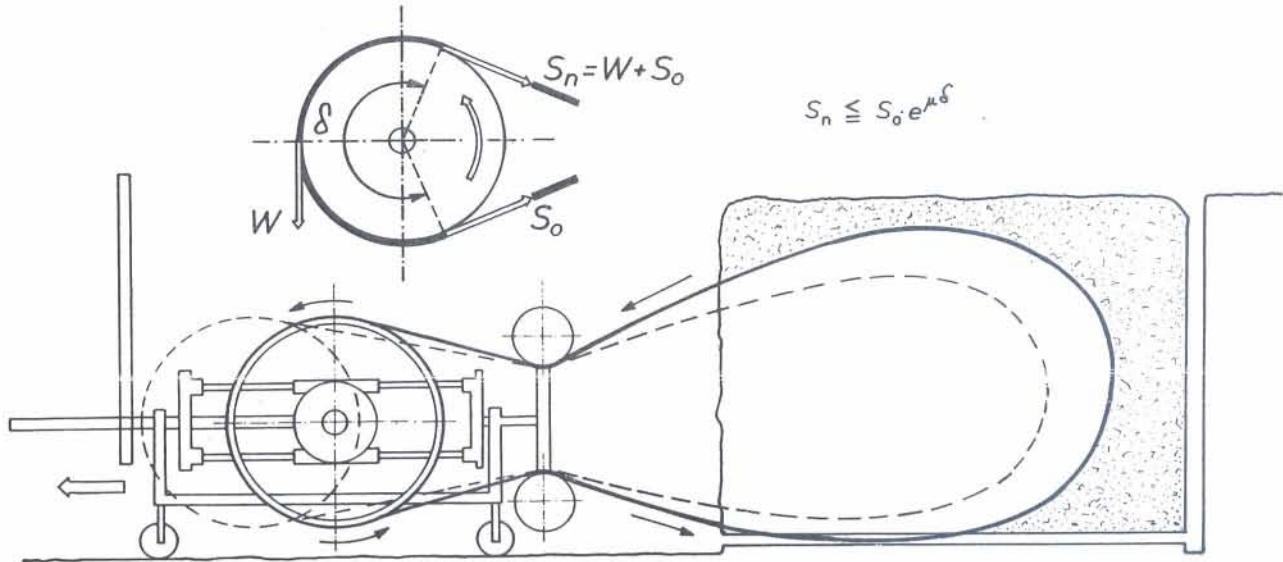
Dijamantna žična pila se razlikuje od ostalih vrsta postrojenja (transporter s beskonačnom trakom, žičara s neprekinutim užetom, liftovi i dr.) čiji se proračuni pogona baziraju na Eulerovu zakonu, jer se dijamantna žica ne obavija na oba kraja oko kotača (ili bubnja) već se ona obavija samo oko pogonskog kotača na jednom kraju, a trajektorija se na drugom kraju zatvara neposredno preko masiva stijene koja se pili tom žicom. Usprkos te razlike smatram da ovaj zakon vrijedi i kod proračuna ovog postrojenja jer dijamantnu žicu pokreće pogonski kotač pomoću trenja između njega i žice.

Prema tome, da bi pogonski kotač mogao pomoću trenja vući dijamantnu žicu mora postojati takav odnos između sila napinjanja nailazeće grane žice »S_n« na pogonski kotač prema odlazećoj grani »S₀« pri kojem neće doći do klizanja žice po kotaču (sl. 1). Formula tog odnosa, pri kutu obuhvata kotača žicom »δ« (u lučnoj mjeri) i koeficijentu trenja između žice i kotača »μ«, ima oblik:

$$S_n \leq S_0 e^{\mu\delta} \quad (1)$$

gdje je:

e = 2,718 ... baza prirodnih logaritama.



Slika 1 Odnos vučnih sila na pogonskom kotaču dijamantne žične pile
Figure 1 Relation among pulling forces on the driving pulley of the diamond saw wire cutter

Kad napinjanje u nailazećem dijelu žice naraste toliko, da postane jednako desnoj strani formule (1) dolazi do granice prijenosa trenjem i do klizanja žice preko kotača, pa će biti:

$$S_{n \max} = S_0 e^{\mu \delta} \quad (2)$$

Ako se od lijeve i desne strane odbije veličina » S_0 «, dobije se najveća obodna vučna sila » W_{\max} «, koju kotač može prenijeti, a koja je jednaka razlici najvećeg napinjanja nailazeće grane žice i napinjanja odlazeće grane žice:

$$W_{\max} = S_{n \max} - S_0 = S_0 (e^{\mu \delta} - 1) = S_{n \max} \frac{e^{\mu \delta} - 1}{e^{\mu \delta}} \quad (3)$$

odnosno iz toga proizlazi:

$$S_{n \max} = W_{\max} \frac{e^{\mu \delta}}{e^{\mu \delta} - 1} \quad (4)$$

Neujednačenost gibanja dijamantne žice – kolebanje brzine i ubrzanja

Uvodna razmatranja

Specifičnost dijamantne žične pile u odnosu na ostala slična postrojenja, kod kojih se prijenos vučne sile ostvaruje pomoću trenja, je i u tome što dijamantna žica kao vučni i rezni element nema ravnomjeran promjer po cijeloj svojoj dužini. Kod postrojenja kod kojih se gibanje prenosi beskonačnim čeličnim užetom ili beskonačnom gumenom trakom i uža i traka kao savitljivi elastični elementi obavijaju odnosno naliježu ravnomjerno na pogonski kotač ili pogonski bubanj. Kod dijamantne žice to nije slučaj, jer je promjer perli veći od promjera razdjeljivača i opruga. Stoga dijamantna žica naliježe na pogonski kotač isprekidano u pojedinim točkama. Znači da su samo perle u direktnom dodiru s pogonskim kotačem. Zato će i prijenos gibanja s pogonskog kotača na žicu biti isprekidan, mada on naoko izgleda potpuno kontinuiran.

Prema tome, kod ravnomjerne rotacije pogonskog kotača kružna brzina svake točke na kotaču će biti ravnomjerna. Međutim, uzdužna (pravolinijska) brzina žice neće biti ravnomjerna nego će se učestalo minimalno mijenjati ovisno od koraka perli.

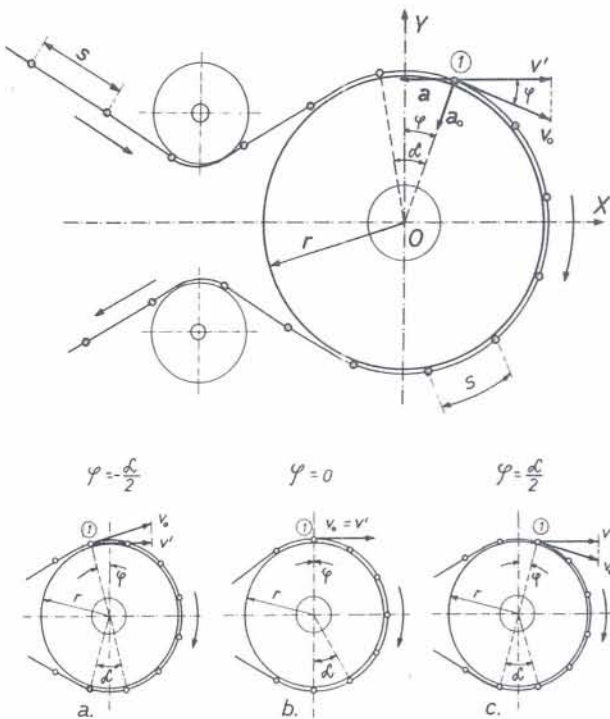
Takvo gibanje bi se, eventualno, moglo usporediti s gibanjem lanca na grabuljastim transporterima iako je prijenos gibanja kod grabuljara potpuno različit, a i postrojenja nisu usporediva ni namjenski, a ni po ostalim konstruktivnim karakteristikama, tehničkim svojstvima i načinu (uvjetima) rada. Naime, kod grabuljastog transportera se prijenos gibanja s lančanika (pogonske zvijezde) ne prenosi na beskonačni lanac pomoću trenja, već zahvatanjem karika lanca u zube zvijezde. U tom slučaju lanac kao vučni element ima kontinuiranu debljinu, a pogonska zvijezda (lančanik), za razliku od pogonskog kotača, ne zahvata lanac ravnomjerno nego u pojedinim točkama ovisno od broja zuba na lančaniku. Zato će i ovdje kod ravnomjerne brzine pogonske zvijezde, kružna brzina zuba biti ravnomjerna, dok će se pravolinijska brzina lanca izvjesno vremenski mijenjati.

Poznavanje gibanja lanca grabuljastog transportera navelo me je na analizu i računsku obradu gibanja dijamantne žice.

Teorijsko matematička obrada

Na slici 2 shematski je prikazan prijenos gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu. Prijenos gibanja s pogonskog kotača na žicu ostvaruje se preko perli u određenim vremenskim razmacima » t «. U tom vremenskom periodu pogonski kotač se okrene za odgovarajući kut » α «. Veličina kuta » α « (u radijanima) jednaka je omjeru duljine luka između dvije perle » s « (korak perli), kojeg na kotaču polumjera » r « omeđuju dvije zrake povučene iz središta, i duljine polumjera » r «:

$$\alpha = \frac{s}{r} \quad (5)$$



Slika 2 Shematski prikaz prijenosa gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu

Figure 2 Schematic presentation of motion transmission from the driving pulley to the diamond wire

Uzdužna brzina definirana je omjerom pređenog puta u određenom vremenu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (6)$$

Brzina u bilo kojem trenutku »t« definirana je izrazom:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (7)$$

Nailaskom dijamantne žice na pogonski kotač svaka perla započinja kružno gibanje na udaljenosti »r« od čvrstog središta vrtnje. Da bi perla opisala izvjesni kut »alpha« potrebno je vrijeme »t«, te je slijedom toga veličina kutne brzine »w«:

$$w = \frac{d\alpha}{dt} \quad (8)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz formula (5) i (6) dobije se:

$$w = \frac{dv}{dt} = \frac{ds}{r \cdot dt} = \frac{v}{r} \quad (9)$$

odnosno:

$$v = w \cdot r \quad (10)$$

Kod ravnomjerne rotacije pogonskog kotača, kružna brzina neke točke (perle) na kotaču je ravnomjerna, međutim, pravolinijska brzina žice »v'« nije ravnomjerna. Ona će biti jednaka projekciji brzine »v_0« na pravac kretanja žice (sl. 2):

$$v' = v_0 \cdot \cos\varphi \quad (11)$$

ili ako se u ovu formulu uvrsti formula (10) dobije se da je:

$$v' = w \cdot r \cdot \cos\varphi \quad (12)$$

gdje su:

φ ... kut između radiusa O1 i osi OY,
 w ... kutna brzina pogonskog kotača,
 r ... polumjer pogonskog kotača.

Kod $\varphi = 0$, brzina žice je maksimalna: $v' = v_0$ (sl. 2,b). Kod $\varphi = -\alpha/2$ i $\varphi = \alpha/2$, brzina žice će biti minimalna: $v' = w \cdot r \cdot \cos\alpha/2$ (sl. 2,a,c).

Prema tome, gibanje žice će imati pulzirajući karakter s periodom pulzacija »t«.

Kad se mijenja brzina nastaje ubrzanje. Znači da će neravnomjerno gibanje dijamantne žice pratiti adekvatna ubrzanja, koja će izazvati dodatna dinamička naprezanja dijamantne žice.

Ubrzanje »a« u bilo kojem trenutku definirano je izrazom:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

Prema tome, ubrzanje će u vremenskom periodu »t_0« biti:

$$a = \frac{dv}{dt_0} = \frac{w \cdot r \cdot d(\cos\varphi)}{dt_0} = -\frac{w \cdot r \sin\varphi d\varphi}{dt_0} \quad (14)$$

Pošto je

$$\frac{d\varphi}{dt_0} = w,$$

biti će:

$$a = -w^2 \cdot r \cdot \sin\varphi \quad (15)$$

Znači da će se ubrzanje dijamantne žice pri promjeni kuta od $-\alpha/2$ do $+\alpha/2$ mijenjati u predjelu od

$$a_1 = w^2 \cdot r \cdot \sin\alpha/2 \quad (16)$$

do

$$a_1 = -w^2 \cdot r \cdot \sin\alpha/2 \quad (17)$$

Kutna brzina se može izraziti kao:

$$w = 2\pi n \quad (18)$$

gdje je:

n ... broj okretaja pogonskog kotača.

Broj okretaja pogonskog kotača se nadalje može izraziti kao:

$$n = \frac{v}{O} = \frac{v}{2r\pi} \quad (19)$$

gdje su:

v ... brzina dijamantne žice,
 O ... oplošje pogonskog kotača,
 r ... polumjer pogonskog kotača.

Ukoliko se oplošje pogonskog kotača izrazi preko koraka perli i broja perli koje mogu obuhvatiti to oplošje, dobije se:

$$O = 2r\pi = s \cdot z \quad (20)$$

gdje su:

s ... korak perli,
z ... broj perli po jedinici dužine.

Uvrštenjem tako izraženog oplošja u formulu (19) dobije se da je broj okretaja pogonskog kotača:

$$n = \frac{v}{s \cdot z} \quad (21)$$

Uvrštenjem formule (21) u formulu (18) izraz za kutnu brzinu poprima ovaj oblik:

$$w = 2\pi \frac{v}{s \cdot z} \quad (22)$$

Kut α je jednak omjeru koraka perli i radijusa pogonskog kotača pa je:

$$\sin \alpha = \frac{s}{r} \quad \text{ili} \quad \sin \alpha / 2 = \frac{s}{2r} \quad (23)$$

Konačnim uvrštavanjem formula (22) i (23) u formule (16) i (17) izrazi za ubrzanja poprimaju ove oblike:

$$a_1 = w^2 \cdot r \cdot \sin \alpha / 2 = (2\pi)^2 \frac{v^2}{(s \cdot z)^2} \cdot r \cdot \frac{s}{2r} = 2\pi^2 \frac{v^2 \cdot s}{(z \cdot s)^2} \quad (24)$$

$$a_2 = -w^2 \cdot r \cdot \sin \alpha / 2 = - (2\pi)^2 \frac{v^2}{(s \cdot z)^2} \cdot r \cdot \frac{s}{2r} = -2\pi^2 \frac{v^2 \cdot s}{(z \cdot s)^2} \quad (25)$$

Iz formula za ubrzanje izraženim na ovaj način vidi se, da će maksimalna ubrzanja biti upravo proporcionalna kvadratu promjene brzine žice i upravo proporcionalna koraku perli, a obrnuto proporcionalna kvadratu umnoška broja perli na oplošju pogonskog kotača s korakom perli. Promjena umnoška broja perli na oplošju pogonskog kotača s korakom perli, odgovara proporcionalnoj promjeni polumjera pogonskog kotača. Zato se može reći, da će maksimalno ubrzanje žice biti obrnuto proporcionalno kvadratu polumjera pogonskog kotača.

Prema tome, ukoliko se poveća (*smanji*) brzina dijamentne žice za X puta, uz nepromijenjeni korak perli i nepromijenjeni polumjer pogonskog kotača, maksimalno ubrzanje će se povećati (*smanjiti*) za X² puta.

Povećanjem (*smanjenjem*) koraka perli za X puta, uz nepromijenjenu brzinu dijamentne žice i nepromijenjeni polumjer pogonskog kotača, maksimalno ubrzanje će se također povećati (*smanjiti*) za X puta.

Povećanjem (*smanjenjem*) polumjera pogonskog kotača za X puta, uz nepromijenjenu brzinu dijamentne žice i nepromijenjeni korak perli, maksimalno ubrzanje će se smanjiti (*povećati*) za X² puta.

Računski primjer

Da bi se uočio red veličina vremenskih promjena brzine i ubrzanja dijamentne žične pile, napravio sam, prema prethodno iznijetim formulama, proračun tog gibanja za konkretno postrojenje s podacima koji se nerijetko susreću u praksi.

Podaci dijamentne žične pile:

- polumjer pogonskog kotača, $r = 0,4$ m
- prosječna radna brzina žice, $v = 25$ m/s
- broj okretaja pogonskog kotača, $n = 9,91$ s⁻¹ (573 min⁻¹)
- korak perli dijamentne žice, $s = 32$ mm = 0,032 m.

Kutna brzina pogonskog kotača:

$$w = 2\pi n = 2\pi \cdot 9,91 = 62,3$$
 s⁻¹

Broj perli koje mogu obuhvatiti pogonski kotač:

$$s \cdot z = 2r\pi, \quad z = \frac{2r\pi}{s} = \frac{2 \cdot 0,4 \cdot \pi}{0,032} = 78,54$$

Kut kojeg zatvaraju dvije perle na pogonskom kotaču:

$$\alpha = \frac{s}{r} = \frac{0,032}{0,4} = 0,08 \text{ rad,}$$

odnosno izraženo u stupnjevima

$$\alpha = 180 \frac{\alpha r}{\pi} = 180 \frac{0,08}{\pi} = 4,584 \div 4,6^\circ (4^\circ 36'')$$

$$\alpha / 2 \div 2,3^\circ$$

Vrijeme jednog okretaja pogonskog kotača:

$$T = \frac{1}{n} = \frac{1}{9,91} = 0,100908 \text{ s,}$$

Potrebno vrijeme za okret veličine α :

$$t_0 = \frac{T}{z} = \frac{0,100908}{78,54} = 0,00128 \text{ s}$$

Maksimalno ubrzanje žice (16):

$$a_{\max} = w^2 \cdot r \cdot \sin \alpha / 2 = 62,3^2 \cdot 0,4 \cdot \sin 2,3^\circ = 62,31 \text{ m/s}^2$$

Ukoliko se maksimalno ubrzanje izračuna po formuli (24) dobije se:

$$a_{\max} = 2\pi^2 \frac{v^2 \cdot s}{(z \cdot s)^2} = 2\pi^2 \frac{25^2 \cdot 0,032}{(78,54 \cdot 0,032)^2} = 62,5 \text{ m/s}^2$$

Minimalna razlika u rezultatu nastala je zbog toga jer je vrijednost prosječne radne brzine u kataloškim podacima zaokružena na cijelu vrijednost ($v = 25$ m/s).

Dobivena veličina predstavlja maksimalno ubrzanje, koje se mijenja od nule do ove maksimalne vrijednosti ovisno od promjene brzine po vremenu.

Promjena brzine i ubrzanja po vremenu, ovisno od položaja perle na pogonskom kotaču, najbolje će se uočiti kada se te ovisnosti prikažu na dijagramu.

Dijagram promjene brzine i ubrzanja dijamentne žice

Da bi se konstruirao vremenski dijagram promjena brzine i ubrzanja dijamentne žice, potrebno je znati ovisnost između kuta » φ « kojeg perla prijede na pogonskom kotaču u određenom vremenu » t «.

Kako je $\varphi = w \cdot t$ biti će:

$$t = \frac{\varphi r}{w} = \frac{\varphi^\circ \cdot \pi / 180}{w} = \frac{\varphi \cdot \pi / 180}{62,3} = 0,00028 \cdot \varphi [\text{s}]$$

Brzina žice:

$$v' = v \cdot \cos\varphi = w \cdot r \cdot \cos\varphi = 62,3 \cdot 0,4 \cos\varphi = 24,92 \cos\varphi \text{ [m/s]}$$

Ubrzanje žice će se pri promjeni kuta φ od $-\alpha/2$ do $+\alpha/2$ mijenjati u rasponu od:

$$a = r w^2 \sin\alpha/2 \text{ do } a = -r w^2 \sin\alpha/2$$

$$a = r w^2 \sin\varphi = 0,4 \cdot 62,3^2 \sin\varphi = 1552,5 \sin\varphi \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Tablica 1 Podaci za konstrukciju vremenskog dijagrama promjena brzine i ubrzanja

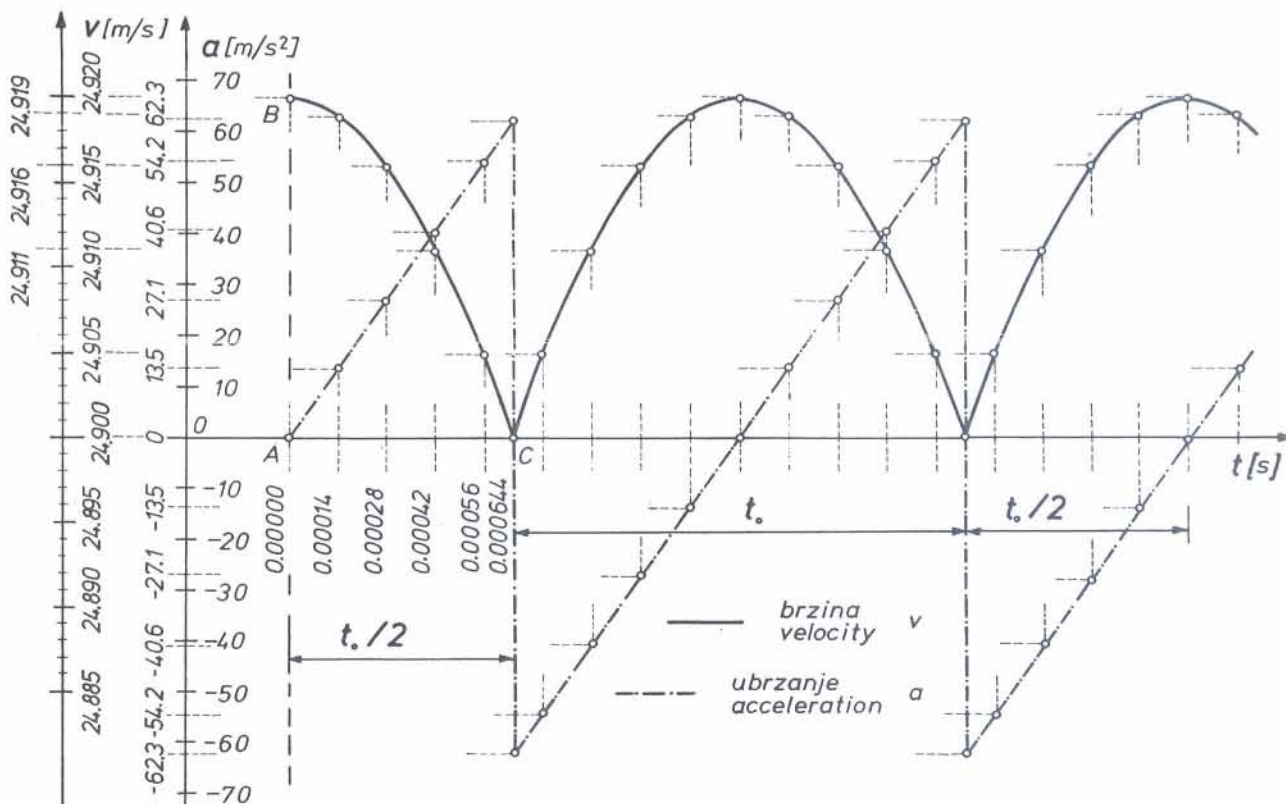
Table 1 Data for the construction of time diagram of the changes of velocity and acceleration

φ [°]	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,3
t_0 [s]	0	0,00014	0,00028	0,00042	0,00056	0,000644
v' [m/s]	24,920	24,919	24,916	24,911	24,905	24,900
a [m/s ²]	0	13,5	27,1	40,6	54,2	62,3

U tablici 1 izračunate su vrijednosti »v« i »a« za $\varphi = 0^\circ; 0,5^\circ; 1^\circ; 1,5^\circ; 2^\circ; 2,3^\circ$. Na slici 3 je pomoću ovih vrijednosti nacrtan dijagram promjene brzine i ubrzanja dijamantne žice za radne podatke iz računskog primjera.

Na osnovi dijagrama na slici 3 može se izračunati stvarna prosječna brzina dijamantne žice, integriranjem površine »F« (omeđene točkama A, B i C) ispod krivulje brzine (kosinoida) u vremenskom intervalu » $t_0/2$ «:

$$v_{sr.} = \frac{F}{t_0/2} = \frac{\int_0^{t_0/2} v' dt}{t_0/2} \text{ [m/s]}$$



Slika 3. Vremenski dijagram promjena brzine i ubrzanja dijamantne žice

Figure 3 Time diagram of the changes of velocity and acceleration of the diamond wire

U konkretnom primjeru to iznosi:

$$t_0/2 = 0,000644 \text{ (tab. 1), i}$$

$$v' = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n \cos\varphi = 2 \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot 9,91 \cdot \cos\varphi = 24,907 \cdot \cos\varphi$$

$$v_{sr.} = \frac{\int_0^{t_0/2} 24,907 \cdot \cos\varphi dt}{0,000644} = \frac{24,907}{0,000644} \int_0^{t_0/2} \cos\varphi dt =$$

$$= \frac{24,907}{0,000644} \cdot \frac{1}{w} \sin w \frac{t_0}{2} =$$

$$= \frac{24,907}{0,000644} \cdot \frac{1}{62,3} \cdot \sin 2,3^\circ = 24,914 \text{ m/s.}$$

Iz računskog primjera i dijagrama promjene brzine se vidi, da se brzina dijamantne žice mijenja, uslijed isprekidanog prijenosa gibanja s pogonskog kotača, u zaista minimalnim i potpuno zanemarivim granicama. Takve promjene nemaju nikakvog utjecaja na određivanje i izražavanje stvarne prosječne brzine, pa je dovoljno usvojiti, u bilo kakvim praktičnim proračunima, zaokruženu srednju (radnu) brzinu dijamantne žice prema kataloškim podacima.

Problem je, međutim, što te zanemarive promjene brzine izazivaju pojavu ubrzanja, odnosno dodatnih dinamičkih naprezanja dijamantne žice.

Dinamička naprezanja uzrokovana neravnomjernim prijenosom gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu

Neravnomjerno kretanje dijamantne žice uzrokuje dodatna dinamička naprezanja, koja ovise o pro-

mjeni veličine ubrzanja i o masi pokretnih dijelova koji sudjeluju u tom neravnomjernom kretanju.

Period neravnomjernosti kretanja žice »t_o« jednak je vremenu zakretanja pogonskog kotača za centralni kut »α«, čiji luk odgovara duljini koraka perli.

U momentu kada perla nailazi na pogonski kotač ubrzanje raste od -a_{max} do +a_{max}, tj. za 2 a_{max} (dijagram ubrzanja na slici 3).

U tom momentu je dinamička sila, nastala uslijed neravnomjernog prijenosa gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu, jednaka:

$$S''_{din} = 2 \cdot m \cdot a_{max} \text{ [N]} \quad (26)$$

gdje je:

m ... ukupna masa dijamantne žice.

Uslijed toga što se S_{din} javlja neočekivano, može se uzeti da ona proizvodi udvojena naprezanja, pa je:

$$S'_{din} = 2 S''_{din} = 4 \cdot m \cdot a_{max} \text{ [N]} \quad (27)$$

Neposredno prije kontakta perle s pogonskim kotačem, ubrzanje žice je negativno i jednako -a_{max}, a odnosna sila inercije je usmjerena suprotno kretanju, što smanjuje opća naprezanja u žici, pa se može uzeti da je konačno:

$$S_{din} = 3 \cdot m \cdot a_{max} \text{ [N]} \quad (28)$$

Za konkretni proračunski primjer dinamička sila nastala uslijed neravnomjernog zahvatanja žice na pogonski kotač iznosi:

$$S_{din} = 3 \cdot m \cdot a_{max} = 3 \cdot 6 \cdot 62,7 \doteq 1130 \text{ N}$$

gdje je:

$$m = q \cdot l = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ kg}$$

q = 0,3 kg/m' ... masa dijamantne žice po metru dužnom,

l = 20 m (na pr.) ... ukupna dužina dijamantne žice (jedna sekcija za rez duljine 6 do 8 m).

Iz ovog proračuna proizlazi, da je vrijednost dinamičke sile, nastale uslijed neravnomjernog prijenosa gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu, dosta velika i da čak doseže vrijednost vučne sile nastale od statičkog opterećenja kod pogona s motorom nazivne snage od 29,5 kW uz brzinu žice od 25 m/s, koja za taj slučaj iznosi 1130 N.

$$S_{st} = \frac{N \cdot \eta}{v} = \frac{29500 \cdot 0,95}{25} = 1121 \doteq 1130 \text{ N}$$

gdje su:

N = 29500 W ... snaga motora,

v = 25 m/s ... radna brzina žice,

η = 0,95 ... koeficijent korisnog učinka prijenosa između motora i pogonskog kotača.

Iako se navedena prinudna dinamička naprezanja u praksi često smanjuju uslijed protufaznog djelovanja vlastitih kolebanja dijamantne žice (pojava rezonanci), korisno je smanjiti na najmanju moguću mjeru dinamička naprezanja nastala uslijed neravnomjernog prijenosa gibanja na dijamantnu žicu.

Zaključna razmatranja

Kod određene dužine dijamantne žice, tj. kod određene mase koja sudjeluje u neravnomjernom kretanju, smanjenje dinamičkih naprezanja može se postići smanjenjem maksimalnog ubrzanja, odnosno:

- smanjenjem brzine dijamantne žice,
- smanjenjem koraka perli,
- povećanjem promjera pogonskog kotača.

a.) Smanjenjem brzine dijamantne žice za X puta, smanjilo bi se maksimalno ubrzanje čak za X² puta.

Međutim, to rješenje nije dobro, jer bi se njime bitno narušila osnovna prednost dijamantne žične pile u odnosu na klasičnu žičnu pilu, a to je njen veliki učinak piljenja. Pila bi izgubila osnovnu karakteristiku, brzinu žice, uz pomoć koje i postiže velike učinke, zbog čega je, uostalom, i doživjela tako široku primjenu i nagli razvoj. Naime, kod klasične helikoidalne žične pile nije se mogla brzina žice povećati iznad 10 m/s, jer bi to dovelo do neiskorištenja slobodne abrazivne smjese, tj. do njenog prebrzog iznošenja van reza, a da se njome nije pret hodno razorila stijena. Vezani abraziv (dijamantna zrnca) na perlama dijamantne žične pile omogućava, naprotiv velike brzine žice (do 45 m/s) čime se ostvaruju i veliki učinci piljenja (m²/h).

b.) Smanjenjem koraka perli, tj. razmaka između perli za X puta, smanjuje se maksimalno ubrzanje također za X puta.

Ovim rješenjem mogu se postići samo minimalna smanjenja ubrzanja, jer je korak perli mala veličina, a i mogućnosti smanjenja tog razmaka između perli su minimalne. Smanjenjem koraka perli, odnosno povećanjem broja perli po metru dužnom žice, povećava se bitno i cijena žice, što bi s ekonomske strane bilo potpuno neracionalno. S druge strane se time smanjuje savitljivost žice, čime bi nastale nove neugodnosti u pogonu, a povećali bi se i sveukupni otpori u rezu. Nadalje, veći broj perli po m' žice, povećao bi izvjesno i masu žice čime bi se poništavalo smanjenje razmatranih naprezanja uslijed ubrzanja, jer su ta naprezanja produkt mase i ubrzanja.

c.) Najrealniju mogućnost smanjenja ubrzanja žice, uslijed neravnomjernog prijenosa gibanja, pruža povećanje promjera pogonskog kotača.

Povećanjem polumjera pogonskog kotača (uz održanje stalne brzine žice) za X puta, smanjiti će se maksimalno ubrzanje za X² puta.

Zbog toga treba nastojati povećati promjer pogonskog kotača uvijek kada i koliko god to omogućavaju konstruktivni zahtjevi postrojenja. Kod toga treba voditi računa o tome da će se s povećanjem promjera pogonskog kotača povećati i brzina žice, ukoliko se ne smanji broj okretaja pogonske osovine, jer je:

$$v = n \cdot \pi \cdot D \text{ [m/s]} \quad (29)$$

gdje su:

v ... brzina žice, m/s

n ... broj okretaja pogonskog kotača (osovine), s⁻¹

D ... promjer pogonskog kotača, m.

U tom slučaju bi se poništilo smanjenje ubrzanja postignuto povećanjem promjera pogonskog kotača, jer bi istovremeno proporcionalno povećanje brzine

izazvalo odgovarajuće povećanje ubrzanja. Prema tome, da bi se moglo smanjiti ubrzanje povećanjem promjera pogonskog kotača potrebno je istovremeno smanjiti njegov broj okretaja, kako bi se održala stalna brzina žice. Zato se ne mogu smanjiti ubrzanje žice, povećanjem promjera pogonskog kotača, na strojevima s određenim stupnjem prijenosa, tj. na strojevima koji nemaju mogućnost podešavanja brzine žice u određenim rasponima. Kod strojeva kod kojih se može, na bilo koji način, podešavati brzina žice može se održati nepromijenjena brzina žice kod povećanja promjera pogonskog kotača adekvatnim smanjenjem momenta i broja okretaja na osovini pogonskog kotača, a time i smanjiti dodatna dinamička naprezanja.

Podesivost brzine kod današnjih suvremenih modela žičnih pila postiže se uglavnom na dva načina. Kod većine strojeva se to postiže hidrauličnim pogonom kod kojeg se glavni tok za pokretanje pogonskog kotača sastoji od električne aksijalne stapne sisaljke s promjenjivim reverzibilnim prijenosom rotacije s mogućnošću kontinuiranog podešavanja broja okretaja (od nule do maksimuma) hidrauličnog motora (s radijalno raspoređenim stapovima) koji je direktno povezan s pogonskim kotačem. Drugi način, kod novijih izvedbi, je taj da su pogonski kotač i glavni trofazni elektromotor direktno uzubljeni, ali se snaga elektromotora može podešavati u određenom rasponu, čime se i brzina žice mijenja u određenom rasponu.

Zaključak

Isprekidanost promjera dijamantne žice uzrokuje neravnomjeran prijenos gibanja s pogonskog kotača na žicu. Uslijed neujednačenosti prijenosa gibanja mijenja se brzina dijamantne žice u minimalnim i

potpuno zanemarivim granicama. Problem je, međutim, što te minimalne promjene brzine izazivaju pojavu ubrzanja, odnosno dodatnih prilično velikih dinamičkih naprezanja dijamantne žice.

Maksimalna ubrzanja su upravo proporcionalna kvadratu promjene brzine žice i upravo proporcionalna koraku perli, a obrnuto proporcionalna kvadratu polumjera pogonskog kotača.

Najrealniju mogućnost smanjenja ubrzanja žice, a time i dodatnih dinamičkih naprezanja, pruža povećanje promjera pogonskog kotača uz istovremeno održanje stalne brzine žice. Zbog toga treba nastojati povećati promjer pogonskog kotača uvijek kad i koliko god to omogućavaju konstruktivni zahtjevi postrojenja.

Primljeno: 10. I. 1991.

Prihvaćeno: 25. VI. 1991.

LITERATURA

- ACIMM. (1984): Il taglio delle rocce per la produzione di blocchi nelle pietre ornamentali - Il filo diamantato. *Acimm per il Marmo*, 2, 65-79, Milano
- Arar, I. (1962): Transportna sredstva u rudarstvu. Tehnička knjiga, 463 str., Zagreb
- Bertolini, R. (1985): Le tagliatrici a filo diamantato per la cava: evoluzione e classificazione. *Acimm per il Marmo*, 3, 37-57, Milano

Ununiformity of Motion Transmission of a Diamond Saw Wire Cutter for the Exploitation of Dimension Stone Blocks

S. Dunda

The characteristic of a diamond saw wire cutter related to other similar plants where the transmission of pulling force is realized by friction is, that diamond wire as pulling and cutting element has not a uniform diameter along its whole length. The diameter of beads is longer than that of the spacer and springs, so that the diamond wire leans on the driving pulley interruptedly in particular points. Therefore the motion transmission from the driving pulley to the wire be interrupted (Fig. 2).

By uniform rotation of a driving pulley circular velocity of some point (bead) on the pulley is uniform. However, longitudinal (rectilinear) velocity of wire is not uniform. Frequently it will be minimally changed depending on the bead steps and it will equal the projection of the velocity v_0 , to the direction of wire movement – the formulas (11) and (12).

Ununiform motion of the diamond wire is followed by adequate accelerations – formulas (16), (17), (24) and (25). Maximal accelerations are just proportional to the square of the wire velocity change and just proportional to the beads' step, and inversely proportional to the square of the driving pulley radius.

Acceleration causes additional dynamic stresses of the diamond wire. Intensity of these dynamic stresses depends on the change of acceleration extent and on the mass of movable parts taking part in ununiform motion – formula (28).

Consequently, due to interruptive transmission of motion from the driving pulley, the velocity of diamond wire changes within really minimal and entirely neglecting limits (Fig. 3). The problem is, however, in the fact that these neglecting velocity changes cause the acceleration, i.e. additional rather intensive stresses of the diamond wire which need to be decreased to the least possible extent.

At certain length of the diamond wire, the decrease of dynamic stresses can be attained, decreasing the maximal acceleration, i.e.

- a) decreasing the velocity of diamond wire,
 - b) decreasing the steps of diamond beads,
 - c) increasing the diameter of driving pulley.
- a) Decreasing the velocity of diamond wire X times, the maximal acceleration would be decreased X^2 times.

However, this solution is not right, because it will essentially disturb the basic advantage of the diamond saw wire cutter in comparison with the helicoidal wire plant, which is its great sawing effect. The cutter would lose the principle characteristics – the wire velocity due to which it achieves great effects.

b) Decreasing the steps of diamond beads X times, the maximal acceleration is decreased X times as well.

By this solution only minimal decreases of acceleration can be achieved, because the step of beads is a small extent, and the possibilities of decreasing this intervals between beads are minimal. Decreasing the steps of beads or increasing the number of beads per m' , the wire price increases too, which is not rational from the economical point of view. On the other side, the wire flexibility would decrease in such a way, which would cause new problems in the drive. Further, a greater number of beads per wire m' would slightly increase the wire mass, by which the decrease of the discussed stresses would be cancelled due to accelerations, because these stresses are a product of mass and acceleration.

c) The most real possibility of decreasing the wire acceleration due to ununiform transmission of motion is provided by the increase of driving pulley diameter.

Increasing the driving pulley diameter (keeping the wire velocity stable) X times, the maximal acceleration will decrease X^2 times.

Therefore it need to be aimed at increasing the driving pulley diameter as much as the construction requirements of the machine allow this. To enable the acceleration decrease by increasing the driving pulley diameter, it is necessary to decrease simultaneously its number of revolution in order to keep the wire velocity stable – formula (29). In other words, this can be achieved only with the machines which have the possibility of adjusting the wire velocity. They can keep the wire velocity unchanged when increasing the driving pulley diameter by adequate decrease of the moment and the number of revolutions on the axle of driving pulley, and therewith decrease additional dynamic stresses.