

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 4	str. 139–146	Zagreb, 1992.
----------------------------------	--------	--------------	---------------

UDK 622.35:622.232.4

Izvorni znanstveni članak

TEORIJSKE POSTAVKE DVOKOTURNOG POGONA DIJAMANTNE ŽIČNE PILE ZA EKSPLOATACIJU ARHITEKTONSKOG KAMENA

Siniša DUNDA

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

Ključne riječi: Arhitektonski kamen, Dijamantna žična pila, Dvokoturni pogon, Teorijska razmatranja

Razmatra se mogućnost i opravdanost izrade dijamantne žične pile s dva pogonska kotura. Razrađene su teorijske postavke takvog pogona. Računskim primjerom se dokazuju prednosti koje bi pridonio takav pogon pri eksploataciji arhitektonskog kamena dijamantnom žičnom pilom.

Key-words: Dimension stone, Diamond wire sawing plant, Tandem pulley drive, Theoretical discussion.

The paper discusses the possibility as well as the justification for construction of a diamond wire sawing plant driven by a tandem (pulley) drive. The theoretical proposition for the so operated plant has been herewith elaborated. Calculations are set as an example to prove the advantages which may be accomplished in excavation of dimension stone by so driven diamond wire sawing plant.

Uvod

Vučna sila na obodu pogonskog kotura dijamantne žične pile mora savladati sve otpore koji nastaju pri gibanju dijamantne žice, odnosno pri piljenju stijene tom žicom. Povećanjem površine piljenja povećava se dužina dijamantne žice, a time i sveukupni otpori, pa je za njihovo svladavanje potrebna velika vučna sila. Zato su optimalne površine piljenja dijamantnom žičnom pilom ograničene i znatno su manje od površina piljenja klasične-helikoidalne žične pile.

Već na samom početku primjene dijamantne žične pile ostvarene su dosta velike površine piljenja, koje u daljoj primjeni nisu premašivane. Tako je na kamenolomu Fior di Chiaro (Carrara) piljen rez površine 70 m², a na kamenolomu Madiella di Massa rez dug 11,5 m, visok 9,5 m, tj. ispiljena je površina od 109 m² (Trancu, 1980). Postizanje već tada ovih prilično velikih reznih površina je razumljivo, jer se u početku primjene ovog potpuno novog stroja željelo dokazati njegove tehničke mogućnosti, zaneamarujući donekle ekonomske efekte piljenja. Daljom primjenom nije se išlo na povećavanje ovih veličina, dapače one su smanjivane, jer se nastojalo doći do optimalnih površina reza za svaki kamenolom. Tako su se npr. na kamenolomima Carrare ustalile česte površine piljenja vertikalnih rezova od oko 50 m² (Pinzari, 1981). Na bračkim kamenolomima su najpovoljnije vertikalne površine piljenja također oko 50 m² (Sivac, Zečevo) do cca 75 m² (Glave).

Mekši kamen dozvoljava, naravno, veće površine piljenja. Tako su u bazenu travertina Acque Albule di Tivoli te površine oko 100 m² (npr. kamenolom Estraba-Barco Tivoli) do cca 130 m² (npr. kamenolom Striscia i Poggi). Velike površine reza, odnosno veći primarni blokovi, pružaju veće mogućnosti selekcioniranja kod dalje razrade na komercijalne blokove, pa je mala površina reza bio osnovni razlog otporima, koji su pružani uvođenju i primjeni dija-

mantne žične pile na ovim kamenolomima (Pinzari, 1981).

Razvoj postrojenja sa sve jačim motorima i brojnim unapređenjima, kao i razvoj reznog alata, znatno je doprinio povećanju učinka, smanjenju potrošnje alata, raznovrsnosti oblika reza, većoj sigurnosti itd., a samo neznatno povećanju površina piljenja.

Glavni nedostatak dijamantne žične pile je, dakle, ta relativno mala veličina reza, pa se kamenolomi sve više formiraju tako da budu maksimalno prilagođeni tehničkim karakteristikama, odnosno mogućnostima rada dijamantne žične pile.

Mala površina piljenja dijamantne žične pile s jedne strane i veliki učinak s druge strane (u usporedbi s klasičnom žičnom pilom), zahtijeva znatno češće premještanje stroja, odnosno više jalovog rada, a i više pripremljenih radova.

Zato, težnja korisnika dijamantnih žičnih pila ka što većim dimenzijama reza, tjera konstruktore i proizvođače tih strojeva na dalja istraživanja, kako bi se našle mogućnosti povećanja opterećenog dijela dijamantne žice, tj. povećanja površina piljenja. Ove teorijske postavke dvokoturnog pogona dijamantne žične pile su moj skromni doprinos nastojanjima u rješavanju tog problema.

Analiza mogućnosti poboljšanja prijenosa snage dijamantne žične pile

Da bi se ostvarile veće površine piljenja, ali i manje površine u nepovoljnom nehomogenom kamenu, tj. da bi se svladali veći otpori piljenju, potrebno je postići veću vučnu silu dijamantne žice.

Izvor vučne sile dijamantne žične pile je pogonski motor, koji svoju snagu predaje pomoću prijenosnog mehanizma na osovinu pogonskog kotura. Naravno da će se s povećanjem pogonske snage motora ostvariti, uz stalnu brzinu, veća vučna sila, jer je snaga jednaka umnošku sile i brzine. Znači, da zaista ne bi bio problem konstruirati dijamantnu žičnu pilu s

pogonskim motorom veće snage nego što ih imaju sadašnja postrojenja, koja bi onda ostvarivala i veće vučne sile. Međutim, problem je u tome, što ta velika vučna sila ne smije proizvesti prevelika napinjanja dijamantne žice. Maksimalno napinjanje ne smije ni u jednom momentu premašiti prekidnu čvrstoću dijamantne žice uz određeni koeficijent sigurnosti. Prema tome, nije problem kako postići veliku obodnu vučnu silu, nego kako ostvariti prijenos vučne sile s pogonskog kotura na dijamantnu žicu, a da se u toj žici dobiju što manja napinjanja.

Prijenos vučne sile s pogonskog kotura dijamantne žične pile na dijamantnu žicu postiže se trenjem (Dunda, 1991). Iz osnovnih relacija (1), (2), (3), (4) takvog prijenosa navedenih u spomenutoj literaturi, proizlazi da je veličina vučne sile W , koja se prenosi trenjem, funkcija napinjanja dijamantne žice S , koeficijenta trenja μ i kuta obuhvata δ , tj. $W = f(S, \mu, \delta)$ i povećava se porastom svake od tih veličina.

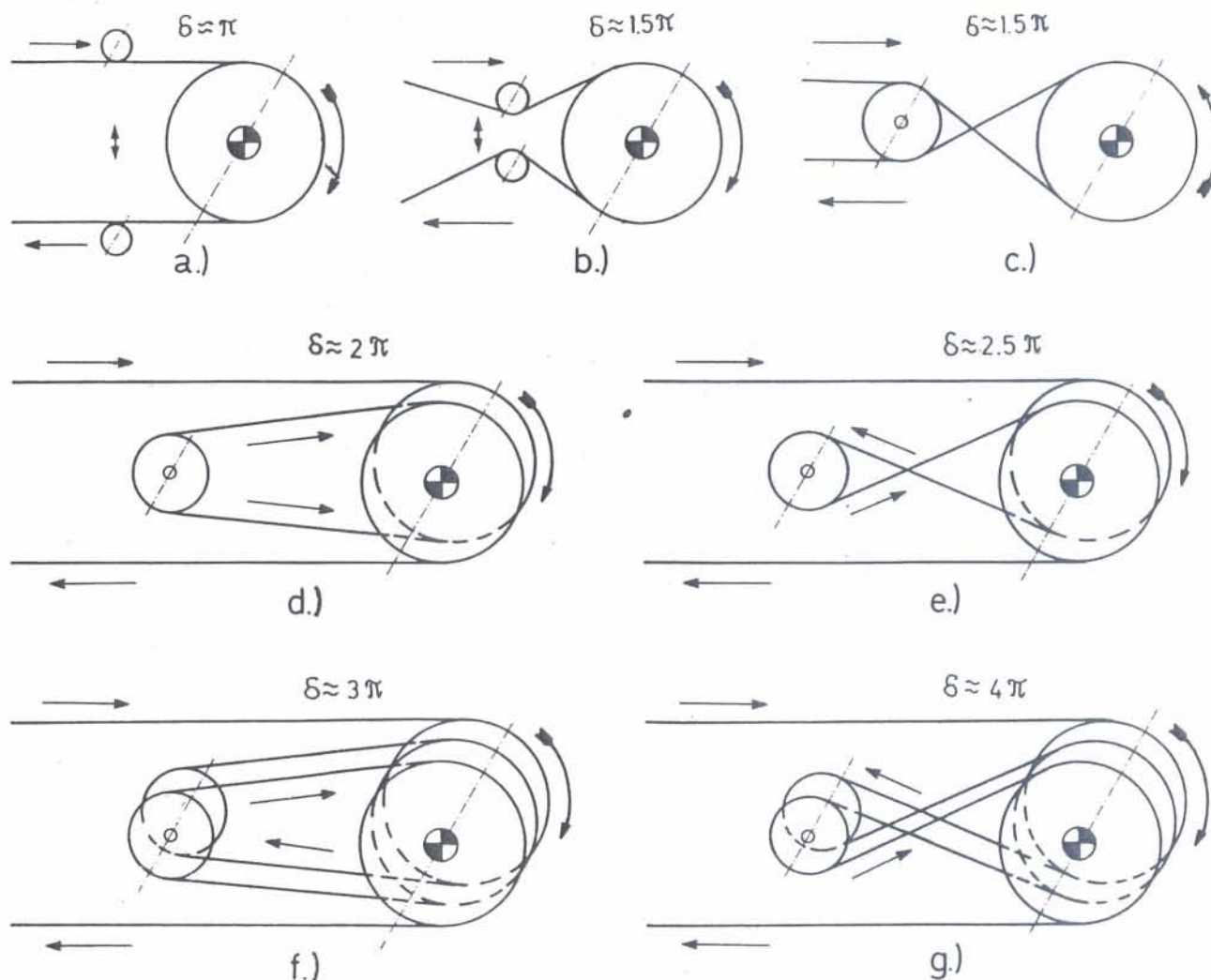
Napinjanje žice S je ograničeno njenom prekidnom čvrstoćom, pa je potrebno težiti povećanju koeficijenta trenja μ i obuhvatnog kuta δ , odnosno povećanju vučnog čimbenika $e^{\mu\delta}$.

Povećati koeficijent trenja, a time i vučnu sposobnost pogona može se primjenom visokofrikcionih

elastičnih obloga. Koeficijent trenja kod dijamantne žične pile je dosta velik, zato što je ovdje prisutno uz adhezijsko i histerezijsko trenje, jer se izbočena dijamantna zrnca utiskuju u frikcionu podlogu pogonskog kotura. Prodiranje dijamantnih zrnaca u oblogu pogonskog kotura sprečava proklizavanje žice, ali istovremeno uzrokuje njeno intenzivno habanje. Zato radi povećanja koeficijenta trenja treba po mogućnosti koristiti visokofrikcione obloge sa što većom otpornošću na habanje.

Povećanje obuhvatnog kuta, a time i vučnog čimbenika, postiže se kod dijamantnih žičnih pile navođenjem dijamantne žice preko vodećih (jalovih) koturova. Pomicanjem vodećih koturova u ravnini piljenja omogućena je promjena obuhvatnog kuta.

Osim ovakvog načina povećanja kuta obuhvata, to povećanje bi se moglo postići na neki od načina prikazanih na sl. 1. Obuhvatni kut mogao bi se povećati uporabom pogonskog kotura s jednim utorom (a,b,c) ili s više utora (e,f,g,h) po kojima se dijamantna žica navodi u obliku »0« ili u obliku »8«: Sheme a) i b) prikazuju navođenje dijamantne žice na pogonski kotur u obliku »0« kakvo se danas primjenjuje. Shema c) prikazuje također mogućnost navođenja dijamantne žice na kotur s jednim utorom,



Sl. 1 – Moguće sheme navođenja dijamantne žice na pogonski kotur

Fig. 1 – Schemes of possible modes of how to lead diamond wire onto a pulley drive

ali ovdje u obliku »8«. Sigurno da je povoljnije vođenje u obliku »0«, jer bi vođenje u obliku »8« skraćivalo trajnost žice, radi promjena smjera savijanja. Ove tri sheme su konstrukcijski najjednostavnije. Nedostatak im je znatno napinjanje nailazeće grane dijamantne žice na pogonski kotur u odnosu prema obodnoj sili.

Eventualnom izradom pogonskog kotura s dva utora (sheme d i e) znatno bi se povećao obuhvatni kut, ali bi takav kotur imao slijedeće nedostatke: kompliciraniju konstrukciju i veći broj savijanja dijamantne žice preko jalovih kotura, znatne sile pritiskanja na ležaje osovine te mogućnost prevelikog napinjanja ili olabavljenja u dijelu žice između koturova. Posljednja pojava može biti posljedica nejednakomjernog trošenja obloge kotura ili netočnosti pri zaokruženju oboda kotura. Uslijed toga bi se s jednog utora odmotavala veća ili manja dužina dijamantne žice nego što se može namotati na slijedeći utor, a posljedica toga bila bi promjena napinjanja u dijelu žice između koturova. Pri jako povećanom napinjanju moglo bi doći, osim do pucanja žice, i do savijanja osovine ili oštećenja ležaja. Pri oslabljenom napinjanju uz sklizanje žice moglo bi doći do naglih trzaja u radnom dijelu žice, što može izazvati neravnine u rezu i oštećenja žice i stijene. Zato bi se u tom slučaju trebalo ugraditi između koturova diferencijal koji automatski održava stalno napinjanje u dijelu žice između pogonskog i jalovih koturova. To bi dodatno kompliciralo konstrukciju uz dodatni gubitak u prijenosu obodne sile.

Zbog svega navedenog mislim da ovakve eventualne konstrukcije dijamantne žične pile ne bi bile podesne za predviđenu im namjenu i da ovaj način povećanja vučnog čimbenika nije svrsishodan.

Nedostaci navedeni za koture s dva utora vrijede pogotovo kod kotura s tri (sheme f i g) i više utora. Takva teška i glomazna postrojenja mogla bi se eventualno primjeniti za neki stacionarni pogon, a ne za lake mobilne dijamantne žične pile, koje moraju imati kontinuirani lagani radni posmak.

Dvokoturni pogon dijamantne žične pile

Uvodna razmatranja

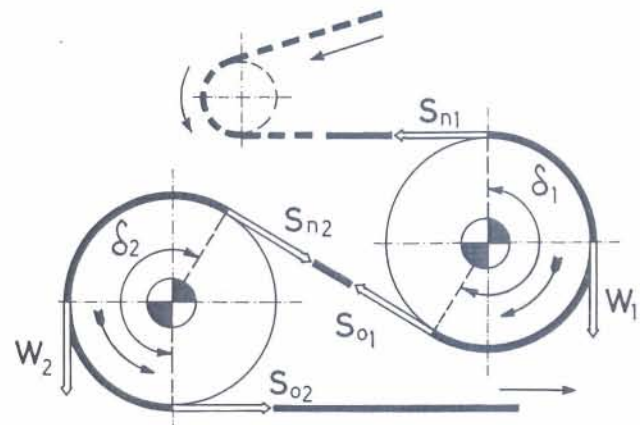
Dijamantne žične pile kakve se danas proizvode imaju jedan pogonski kotur. Kao što se vidi iz prethodnih izlaganja, prijenos vučne sile kod dvokoturnog pogona je ograničen vrijednošću vučnog čimbenika. Kod velikih površina piljenja, ali i kod relativno malih površina u geološki složenijim ležištima, ovakvi pogoni ne mogu zadovoljiti, pa se u tim slučajevima još uvijek primjenjuje klasična žična pila, unatoč njenim mnogobrojnim nedostacima u odnosu na dijamantnu žičnu pilu. Konstrukcijska rješenja poboljšanja prijenosa vučne sile na pogonskom koturu izložena u prethodnoj glavi, ne pružaju dovoljno izgleda za uspješnu realizaciju.

Problem prijenosa vučne sile, odnosno povećanja vučnog čimbenika postoji i kod drugih postrojenja i uređaja kod kojih se vučna sila prenosi trenjem. Spomenimo samo transportere s beskonačnom trakom, gdje kod dugačkih transportera, zatim transportera srednjih dužina s velikim opterećenjima i

transportera relativno malih dužina koji vuku teret naviše, nije zadovoljavao jednobubnjasti pogon. Tu su, da bi se poboljšao prijenos vučne sile, nadena razna konstrukcijska rješenja kao što su npr. pritiski valjci, pritiskne trake i baterije elastičnih valjaka. Ovakva i slična rješenja, kod dijamantne žične pile, nisu moguća obzirom na konstrukciju, karakter i namjenu pile. Međutim, mislim da bi se eventualnim rješenjem dvokoturnog pogona dijamantne žične pile, analogno dvobubnjastom i višebubnjastom pogonu kod transportera s beskonačnom trakom, navedeni problem mogao otkloniti.

Teorija dvokoturnog pogona dijamantne žične pile

Prijenos vučne sile na dijamantnoj žičnoj pili s dva pogonska kotura osniva se na principima pile s jednim pogonskim koturom. Shematski prikaz raspodjele sila na dva pogonska kotura prikazan je na sl. 2.



Sl. 2 – Odnos vučnih sila kod dvokoturnog pogona dijamantne žične pile

Fig. 2 – Relation of pulling forces of a tandem drive at diamond wire sawing plant

Vučne sile W_1 prvog i W_2 drugog pogonskog kotura, koje ovi trebaju razvijati određene se polazeći od uvjeta da je:

$$W_u = W_1 + W_2 \quad (1)$$

gdje je:

W_u – ukupna vučna sila.

Prema sl. 2 određene se, analogno pogonu s jednim koturom, vučne sile W_1 i W_2 :

$$S_{n1} = S_{o1} \cdot e^{\mu \delta_1} \quad (2)$$

gdje su:

S_{n1} – natezanje nailazeće grane žice na prvom pogonskom koturu,

S_{o1} – natezanje odlazeće grane žice s prvog pogonskog kotura,

μ – koeficijent trenja između žice i obloge prvog pogonskog kotura,

δ_1 – obuhvatni kut žice na prvom pogonskom koturu,

$e^{\mu \delta_1}$ – vučni čimbenik prvog pogonskog kotura.

Obodna vučna sila na prvom pogonskom koturu bit će:

$$W_1 = S_{n1} - S_{o1} \quad (3)$$

Uvrštenjem formule (2) u formulu (3) izraz za obodnu vučnu silu na prvom pogonskom koturu poprima slijedeći oblik:

$$W_1 = S_{01}(e^{\mu\delta_1} - 1) \quad (4)$$

Ako se iz formule (2) izračuna S_{01} i uvrsti u formulu (3), izraziti će se obodna vučna sila na prvom pogonskom koturu s formulom:

$$W_1 = S_{n1} \frac{e^{\mu\delta_1} - 1}{e^{\mu\delta_1}} \quad (5)$$

Ukoliko je poznata obodna vučna sila na prvom pogonskom koturu W_1 , odredi se iz formule (5) natezanje u nailazećoj grani dijamantne žice na prvi pogonski kotur:

$$S_{n1} = W_1 \frac{e^{\mu\delta_1}}{e^{\mu\delta_1} - 1} \quad (6)$$

a iz formule (4) natezanje u odlazećoj grani dijamantne žice s prvog pogonskog kotura:

$$S_{01} = W_1 \frac{1}{e^{\mu\delta_1} - 1} \quad (7)$$

Ista razmatranja vrijede i za drugi pogonski kotur pa je odnos natezanja u nailazećoj grani žice S_{n2} na drugi pogonski kotur naspram odlazećoj grani žice S_{02} s tog kotura, jednak:

$$S_{01} = S_{02} \cdot e^{\mu\delta_2} \quad (8)$$

gdje su:

μ_2 – koeficijent trenja na drugom pogonskom koturu,

δ_2 – obuhvatni kut oko drugog pogonskog kotura,

$e^{\mu\delta_2}$ – vučni čimbenik drugog pogonskog kotura.

Analogne formule, formulama (3), (4), (5), (6) i (7) s prvog pogonskog kotura su slijedeće formule za drugi pogonski kotur:

$$W_2 = S_{n2} - S_{02} \quad (9)$$

$$W_2 = S_{02}(e^{\mu\delta_2} - 1) \quad (10)$$

$$W_2 = S_{n2} \frac{e^{\mu\delta_2} - 1}{e^{\mu\delta_2}} \quad (11)$$

$$S_{n2} = W_2 \frac{e^{\mu\delta_2}}{e^{\mu\delta_2} - 1} \quad (12)$$

$$S_{02} = W_2 \frac{1}{e^{\mu\delta_2} - 1} \quad (13)$$

Kako su pogonski koturovi raspoređeni jedan do drugoga (sl. 2) može se zanemariti dodatna sila otpora na kratkom dijelu dijamantne žice između pogonskih koturova, tj. može se uzeti da je:

$$S_{01} = S_{n2} \quad (14)$$

pa formula (12) poprima slijedeći oblik:

$$S_{01} = W_2 \frac{e^{\mu\delta_2}}{e^{\mu\delta_2} - 1} \quad (15)$$

Izjednačavanjem formule (7) i formule (15) dobije se međusobni odnos vučnih sila prvog i drugog pogonskog kotura:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{e^{\mu\delta_2}(e^{\mu\delta_1} - 1)}{e^{\mu\delta_2} - 1} \quad (16)$$

Iz ovog odnosa se vidi da će kod bilo kojih veličina $e^{\mu\delta_1} = e^{\mu\delta_2} = e^{\mu\delta}$, ovaj odnos uvijek biti veći od jedinice. Ovo znači da, kod dijamantne žične pile s dva pogonska kotura, vučne sile oba kotura ne mogu biti jednake. Na prvom pogonskom koturu (gledano u smjeru hoda dijamantne žice) uvijek se realizira veća vučna sila nego na drugom.

Zbog jednostavnijeg prikazivanja označavati će se odnos vučnih sila s k_w i pod njim će se podrazumijevati koeficijent raspodjele vučnih sila:

$$k_w = \frac{e^{\mu\delta_2}(e^{\mu\delta_1} - 1)}{e^{\mu\delta_2} - 1} \quad (17)$$

Iz izraza (16) je jasno da se raspored vučnih sila može regulirati različitim odnosima vučnih čimbenika. Taj izraz povezuje vučne sile i vučne čimbenike, pa se raspored veličina vučnih sila može regulirati promjenom veličina vučnih čimbenika, odnosno regulacijom obuhvatnih kutova na pogonskim koturovima.

Prema tome koeficijent rasporeda vučnih sila se pojavljuje kao osnovni parametar dijamantne žične pile s pogonom na dva kotura, jer od njega ovisi raspored vučnih čimbenika pogonskih koturova.

Raspodjela snaga

Pravilan izbor vučnih čimbenika pogonskih koturova tijesno je povezan s rasporedom vučnih sila, a da bi se osigurala realizacija tih vučnih sila, za svaki je pogonski kotur neophodno odabrati pogon odgovarajuće snage.

Pogonske snage koturova neophodne za stvaranje vučnih sila W_1 i W_2 nalaze se za svaki pogonski kotur po formulama:

$$N_1 = W_1 \cdot v_1, \quad N_2 = W_2 \cdot v_2 \quad (18)$$

gdje su:

v_1, v_2 – brzine žice kod prvog i drugog pogonskog kotura.

Znači da je kod ovakvog pogona, osim opće snage, potrebno odrediti na koji način je ona raspoređena na pogonskim koturovima. Radi toga, da bi se u lijevom dijelu izraza (16) dobili odnosi snaga potrebno je umjesto vučnih sila uvrstiti njihove veličine iz formule (18) pa se dobije:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{e^{\mu\delta_1}(e^{\mu\delta_1} - 1)}{e^{\mu\delta_2} - 1} \quad (19)$$

Kao što se vidi iz ovog izraza, odnos snaga se razlikuje od odnosa vučnih sila za veličinu odnosa obodnih brzina na pogonskim koturovima. Ako se dijamantna žica promatra kao nerastežuci element, tj. uzme da ima beskonačni modul elastičnosti, njena bi brzina bila jednaka po cijeloj konturi neovisno o natezanju. Izrazi (16) i (19) bi u tom slučaju bili

identični, te bi odnos snaga na pogonskim koturovima odgovarao odnosu vučnih sila i odredio bi se po izrazu:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{\mu_2 \delta_2} (e^{\mu_1 \delta_1} - 1)}{e^{\mu_2 \delta_2} - 1} \quad (20)$$

Ukoliko modul elastičnosti dijamantne žice nije dovoljno velik pojaviti će se između točaka s različitim natezanjima elastične deformacije. Kod toga bi se brzina žice donekle mijenjala ovisno od njenog natezanja. U točki nailaska na pogonski kotur žica je podvrgnuta većem napinjanju nego u točki odlaska s tog kotura pa je i brzina nailaska veća od brzine odlaska. Na dijelu između pogonskih koturova žica se ponovo minimalno produžava, a brzina pri tom povećava. Općenito, brzine žice u točkama nailaska na prvi i drugi kotur nisu jednake, pa su prema tome i obodne brzine na koturovima također različite. Kako su te promjene brzine povezane s elastičnom deformacijom dijamantne žice ε , potrebno je naći vezu između nje i parametara koji se nalaze u izrazu (19).

Deformacija dijamantne žice predstavlja relativnu promjenu njene duljine na promatranom dijelu između točaka 1 i 2 (sl. 2), pa je prema tome:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \quad (21)$$

gdje su:

l_1 i l_2 – duljine odrezaka žice, koji prolaze kroz točke 1 i 2 za isto srednje vrijeme.

Odavde je:

$$l_2 = l_1 (1 - \varepsilon) \quad (22)$$

Može se također napisati i odnos

$$\frac{l_1}{v_1} = \frac{l_2}{v_2} \quad (23)$$

pa je

$$v_2 = v_1 (1 - \varepsilon) \quad (24)$$

Uvrštenjem odnosa v_2/v_1 u izraz za odnos snaga, dobije se konačno formula raspodjele snaga na pogonskim koturovima:

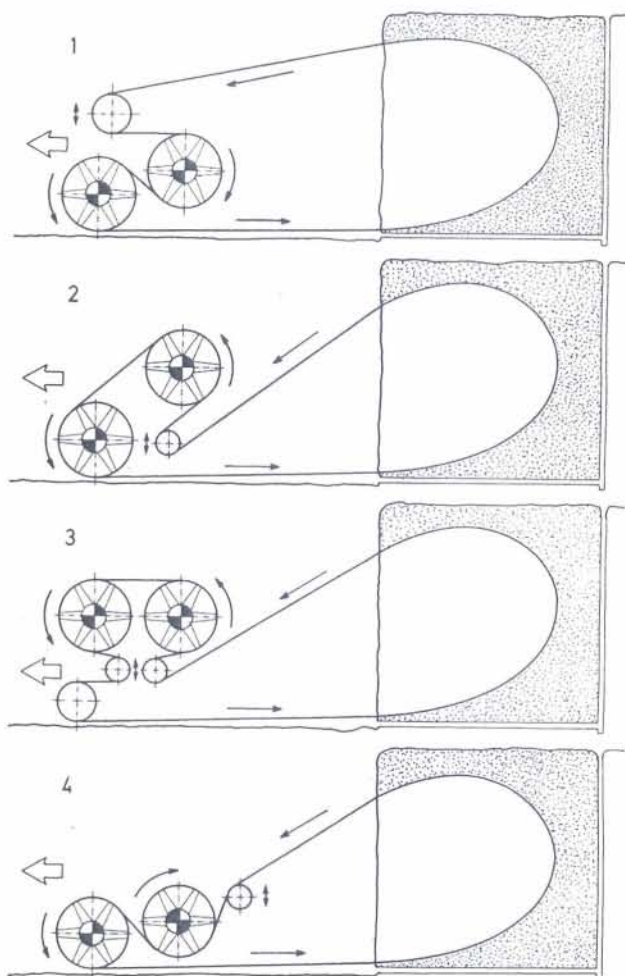
$$k_n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{\mu_2 \delta_2} (e^{\mu_1 \delta_1} - 1)}{(1 - \varepsilon) (e^{\mu_2 \delta_2} - 1)} \quad (25)$$

Usporedbom ove formule s formulom (16) vidi se da je u slučaju kad se ne može zanemariti deformacija dijamantne žice, koeficijent raspodjele snaga k_n veći nego koeficijent raspodjele vučnih sila. Što je modul elastičnosti dijamantne žice veći, veličine koeficijenta raspodjele vučne sile k_w i snage k_n postaju ujednačeniji.

Ukoliko dođe do realizacije dijamantne žične pile s pogonom na dva kotura, trebat će prilikom utvrđivanja i biranja pojedinih sklopova i elemenata utvrditi i modul elastičnosti dijamantne žice, kako bi se ustanovile veličine razlika između koeficijenta k_w i k_n da se osigura pravilan raspored i smještaj pogonskih motora. Naravno da će konstruktor takvog stroja morati provesti detaljne analize ostalih konstrukcijskih elemenata i njihovih utjecaja na pra-

vilnost pogona. Kod toga će moći koristiti bogata iskustva na projektiranju i konstruiranju višekratnih pogona, kao što su npr. višebubnjasti pogoni transportera s beskonačnom trakom.

Na sl. 3 prikazane su neke od mogućih dispozicija pogonskih koturova dvokoturnog pogona dijamantne žične pile.



Sl. 3 – Neke od mogućih shema dispozicije dvokoturnog pogona dijamantne žične pile

Fig. 3 – Schemes of some tandem drive dispositions possible at diamond wire sawing plant

Postupak proračuna

Osnovna zadaća proračuna pogona na dva kotura bilo bi određivanje rasporeda vučnih sila, minimalnih i maksimalnih natezanja, ukupnog vučnog čimbenika, ukupne vučne sile te snaga na koturovima.

Vučne sile pogona W_1 i W_2 mogu se odrediti prema maksimalnom i minimalnom natezanju dijamantne žice po formulama (5) i (10), ili prema ukupnoj vučnoj sili pile W_u i koeficijenta raspodjele vučnih sila k_w po formulama:

$$W_1 = \frac{k_w \cdot W_u}{k_w + 1} \quad (26)$$

$$W_2 = \frac{W_u}{k_w + 1} \quad (27)$$

Ukoliko su poznati koeficijenti trenja i obuhvatni kutovi prvog i drugog pogonskog kotura, ukupni vučni čimbenik pogona će biti:

$$e^{\mu\delta} = e^{(\mu_1\delta_1 + \mu_2\delta_2)} \quad (28)$$

Maksimalna i minimalna natezanja dijamentne žice izražena pomoću ukupnog vučnog čimbenika i ukupne vučne sile odrediti će se po formulama:

$$S_{n1} = W_u \frac{e^{\mu\delta}}{e^{\mu\delta} - 1} \quad (29)$$

$$S_{o2} = W_u \frac{1}{e^{\mu\delta} - 1} \quad (30)$$

Obrnuti proračun, određivanje ukupne vučne sile ukoliko su poznata minimalna i/ili maksimalna natezanja dijamentne žice i ukupni vučni čimbenik odredit će se po formulama:

$$W_u = S_{n1} - S_{o2} \quad (31)$$

$$W_u = S_{o2} (e^{\mu\delta} - 1) \quad (32)$$

$$W_u = S_{n1} \frac{e^{\mu\delta} - 1}{e^{\mu\delta}} \quad (33)$$

Veličine vučnih čimbenika prvog $e^{\mu_1\delta_1}$ i drugog $e^{\mu_2\delta_2}$ pogonskog kotura u funkciji ukupnog vučnog čimbenika, koji karakterizira opće opterećenje, a također i u ovisnosti od koeficijenta raspodjele vučnih sila dobit će se preobrazbom izraza (17). Preobrazbom tog izraza dobiju se formule:

$$e^{\mu_1\delta_1} = \frac{(k_w + 1) e^{\mu\delta}}{k_w + e^{\mu\delta}} \quad (34)$$

$$e^{\mu_2\delta_2} = \frac{k_w + e^{\mu\delta}}{k_w + 1} \quad (35)$$

gdje je:

$e^{\mu\delta}$ – ukupni vučni čimbenik.

Snaga pogona prvog pogonskog kotura nalazi se po vučnoj sili W_1 i nominalnoj brzini dijamentne žice, kojoj odgovara linearna brzina na obodu kotura, po formuli (18).

Snaga drugog pogona nalazi se po istoj formuli uzimajući umjesto W_1 vučnu silu W_2 ili, ukoliko modul elastičnosti dijamentne žice nije dovoljno velik, po koeficijentu rasporeda snaga:

$$k_n = \frac{k_w}{1 - \epsilon} \quad (36)$$

$$N_2 = \frac{N_1}{k_n} \quad (37)$$

Računski primjer

Da bi izlaganje o korisnosti izrade dijamentne žične pile s dvokoturnim pogonom bilo što jasnije upotpuniti ću ga s jednim računskim primjerom.

Kompletan proračun je opsežna materija, pa se u ovom primjeru neće raditi cijeli proračun, već će

se samo proračunati i usporediti vrijednosti iz kojih će biti jasno uočljive prednosti koje bi trebao osigurati dvokoturni pogon u odnosu na postojeće jednokoturne pogone dijamentne žične pile.

Jednokoturni pogon

Osnovni tehnički podaci pile:

- Model i tip pile Alpha 840
- Proizvođač Benetti Macchine (Italija)
- Snaga glavnog pogonskog motora 36 kW
- Broj okretaja pogonskog kotura 975 min⁻¹
(16,25 s⁻¹)
- Promjer pogonskog kotura 800 mm
- Obodna brzina dijamentne žice 40 m/s

Obodna vučna sila

$$W_u = \frac{N \cdot \eta}{v} = \frac{36000 \cdot 0,95}{40} = 855 \approx 850 \text{ N}$$

gdje su:

- $N = 36000 \text{ W}$ – pogonska snaga motora,
- $\eta = 0,95$ – koeficijent korisnog djelovanja prijenosa između motora i pogonskog kotura,

$v = 40 \text{ m/s}$ – obodna brzina žice.

Napinjanje u odlazećoj grani žice

$$S_o = W_u \frac{1}{e^{\mu\delta} - 1} = 850 \frac{1}{3 - 1} = 425 \text{ N}$$

gdje su:

- $W_u = 850 \text{ N}$ – obodna vučna sila,
- $\mu = 0,3$ (npr.) – koeficijent trenja između žice i pogonskog kotura,
- $\delta = 210^\circ$ (npr.) – obuhvatni kut žice na pogonskom koturu,

$e^{\mu\delta} = 2,71828^{0,3 \cdot 3,665} = 3,0$ – vučni čimbenik.

Napinjanje u nailazećoj grani žice

$$S_n = W_u \frac{e^{\mu\delta}}{e^{\mu\delta} - 1} = 850 \frac{3}{3 - 1} = 1275 \text{ N}$$

Kontrola

$$W_u = S_n - S_o = 1275 - 425 = 850 \text{ N}$$

Dvokoturni pogon

Usvojeni podaci iz prethodnog proračuna:

- $W_u = 850 \text{ N}$ – ukupna obodna vučna sila,
- $e^{\mu_1\delta_1} = 3,0$ – vučni čimbenik prvog pogonskog kotura.

Za drugi pogonski kotur uzimaju se vrijednosti:
 $\mu_2 = \mu_1 = 0,3$ (npr.) – koeficijent trenja između dijamentne žice i drugog pogonskog kotura,

$\delta_2 = 240^\circ$ (npr.) – obuhvatni kut žice na drugom pogonskom koturu,

$e^{\mu_2\delta_2} = 2,71828^{0,3 \cdot 4,189} = 3,51$ – vučni čimbenik drugog pogonskog kotura.

Koeficijent raspodjele vučnih sila

$$k_w = \frac{e^{\mu_2\delta_2} (e^{\mu_1\delta_1} - 1)}{e^{\mu_2\delta_2} - 1} = \frac{3,51 (3 - 1)}{3,51 - 1} = 2,8 \quad (17)$$

Obodna vučna sila na prvom pogonskom koturu

$$W_1 = \frac{k_w \cdot W_u}{k_w + 1} = \frac{2,8 \cdot 850}{2,8 + 1} = 626 \text{ N} \quad (26)$$

Obodna vučna sila na drugom pogonskom koturu

$$W_2 = \frac{W_u}{k_w + 1} = \frac{850}{2,8 + 1} = 224 \text{ N} \quad (27)$$

Kontrola

$$W_u = W_1 + W_2 = 626 + 224 = 850 \text{ N} \quad (1)$$

Napinjanje u odlazećoj grani žice (sl. 2)

$$S_{o2} = W_2 \frac{1}{e^{\mu 2\delta_2} - 1} = 224 \frac{1}{3,51 - 1} = 89 \text{ N} \quad (13)$$

Napinjanje u nailazećoj grani žice

$$S_{n1} = W_1 \frac{e^{\mu 1\delta_1}}{e^{\mu 1\delta_1} - 1} = 626 \frac{3,0}{3,0 - 1} = 939 \text{ N} \quad (6)$$

Kontrola

$$W_u = S_{n1} - S_{o2} = 939 - 89 = 850 \text{ N} \quad (31)$$

Iste vrijednosti bi se naravno dobile da se proračun radio preko ukupnog vučnog čimbenika, po formuli (28), (29) i (30).

Iz proračuna se vidi da su, kod iste snage pogonskog motora i iste vučne sile, dobivena daleko manja napinjanja dijamantne žice kod dvokoturnog nego jednokoturnog pogona. U ovom primjeru je maksimalno napinjanje nailazeće grane žice kod dvokoturnog pogona manje za 1,4 puta nego kod jednokoturnog pogona, a minimalno napinjanje odlazeće grane žice je manje čak za 4,8 puta.

Znači da, za određenu dijamantnu žicu koja može izdržati određena naprezanja, dvokoturni pogon može imati znatno jači motor koji će kod iste brzine dijamantne žice ostvariti veću vučnu silu s kojom će se onda moći svladati veći otpori piljenja, tj. moći će se povećati površina reza. Ako se pak ostane kod istih dimenzija reza moći će se povećati brzina žice i/ili učinak piljenja.

Ova prednost će biti još uočljivija ako se isti proračun izvede obrnutim redoslijedom. Usvoje se za dvokoturni pogon ista napinjanja dijamantne žice koja je imao jednokoturni pogon, pa se preračuna snaga pogona i vučna sila koju će ostvariti dvokoturni pogon kod iste brzine.

Usvojene veličine

$S_o = 425 \text{ N}$ – napinjanje u odlazećoj grani dijamantne žice,

$S_n = 1275 \text{ N}$ – napinjanje u nailazećoj grani dijamantne žice.

Obodna vučna sila na prvom pogonskom koturu

$$W_1 = S_{n1} \frac{e^{\mu 1\delta_1} - 1}{e^{\mu 1\delta_1}} = 1275 \frac{3 - 1}{3} = 850 \text{ N} \quad (5)$$

Obodna vučna sila na drugom pogonskom koturu

$$W_2 = S_{o2} (e^{\mu 2\delta_2} - 1) = 425 (3,51 - 1) = 1067 \text{ N} \quad (10)$$

Ukupna obodna vučna sila

$$W_u = W_1 + W_2 = 850 + 1067 = 1917 \text{ N} \quad (1)$$

Potrebna snaga motora

$$N = \frac{W_u \cdot v}{\eta} = \frac{1917 \cdot 40}{0,95} = 80716 \text{ W} \approx 80 \text{ kW}$$

Vidi se da bi dvokoturni pogon kod ove pile mogao imati 2,2 puta jači motor, koji bi ostvarivao isto toliko veću vučnu silu, a da napinjanja dijamantne žice ostanu nepromijenjena. Tom većom vučnom silom mogu se svladati povećani otpori piljenja, što omogućava adekvatno povećanje površine reza ili povećanje brzine piljenja.

Zaključak

Na osnovu iznijetih teorijskih razmatranja, analiza i konačno računskog primjera, jasno je da bi dvokoturni pogon i kod dijamantne žične pile imao određene prednosti u odnosu na jednokoturni pogon. Povećanjem vučnih sposobnosti pile mogli bi se svladati veći otpori piljenja, što bi omogućilo adekvatno povećanje dimenzija reza i/ili povećanje učinka piljenja.

Jednokoturni pogon, kakav danas imaju sve dijamantne žične pile koje se nalaze na tržištu, ima sa stanovišta eksploatacije stroja, nesumnjive prednosti nad predloženim dvokoturnim pogonom. On je konstrukcijski jednostavniji i osigurava manji broj pregiba dijamantne žice, nego što bi imao dvokoturni pogon. Zato je njegova primjena svrsishodna gdje je god to moguće. U nekim slučajevima, kada su neophodne velike površine reza, jednokoturni pogoni ne zadovoljavaju po vučnim sposobnostima. U tim slučajevima bi se mogle koristiti pile s dvokoturnim pogonom ukoliko bi došlo do njihove realizacije. Tada na velikom broju kamenoloma ne bi trebalo prilagođavati metode eksploatacije mogućnostima dijamantne žične pile. Povećao bi se broj varijanti otvaranja, rastvaranja i razvoja kamenoloma, kao i metoda eksploatacije sa svim prednostima koje ima pridobivanje primarnih blokova velikih dimenzija.

Konačnu ocjenu o svrsishodnosti i primjenjivosti konstrukcijskog rješenja, na bazi iznesenih idejnih razmatranja i teorijskih postavki, trebaju donijeti strojarski inženjeri (konstruktori strojeva) nakon detaljnog sagledavanja svih konstrukcijskih elemenata, parametara i ekonomskih efekata takvog postrojenja.

Da bi se dobila što veća površina reza, probana je primjena dijamantne žične pile na način kako se koristi klasična (helikoidalna) žična pila. Umjesto karakterističnog zatvaranja konture dijamantne žice u omču – petlju («a cappio» talijanski, «looping» engleski), primijenjena je metoda piljenja obrnutog slijeda («catenaria rovescia» tal., «reversed chain» engl.). Kod te metode koriste se potisni stupovi, tako da se dijamantna žica potiskuje s površine pomoću potisnog kotura koji se prisilno vodi (spušta) po stupu kroz bušotinu. Rezultat takvog načina rada bio je 40% manji učinak, a broj oštećenja (prekida) žice više nego udvostručen (B i a s c o, 1985).

Primljeno: 14. II. 1992.

Prihvaćeno: 9. VI. 1992.

LITERATURA

- Biasco, G. (1985): Applicazione degli impianti a filo diamantato nel taglio dei materiali lapidei, *ACIMM per il Marmo*, 2, 43-55, Milano.
- Dunda, S. (1991): Neujednačenost prijenosa gibanja dijamantne žične pile za eksploataciju blokova arhitektonskog kamena. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, Vol. 3, 77-84, Zagreb.
- Pinzari, M. (1981): A che punto siamo con l'utilizzazione del filo diamantato nella coltivazione delle cave, *Marmo macchine*, 42, 92-113, Milano.
- Trancu, T. C. (1980): La »Bicicletta« che taglia grandi blocchi di marmo da 6000 tonnellate. Informazioni sui diamanti segazione della pietra T 45 - De Beers Industrial Diamond Division, p. 4, Milano.
- Treščec, I. (1983): Teorija, proračun i primjena transportera s gumenom trakom. *Zavod za produktivnost*, 392 p., Zagreb.

Theoretical Propositions for a Tandem Pulley Drive in Diamond Wire Sawing Plant Used for Dimension Stone Excavation

S. Dunda

The pulling force which occurs at the periphery of a pulley drive of the diamond wire sawing plant must overcome the resistance caused by the diamond wire motion, and sawing a stone with the wire respectively. If a surface to be sawed is larger, the diamond wire is longer. Consequently, the total resistance is greater demanding a greater pulling force to overcome it. Therefore, the optimal surfaces which can be sawed with diamond wire sawing plant are limited or relatively small, what can be considered as weaker side of the plant.

A bigger pulling force can be accomplished by bigger engine power with a constant speed. Yet, the pulling force must not cause too great strain on the diamond wire. The maximum strain must not at any moment overgo the critical breaking point of the diamond wire by certain safety ration. Accordingly, it is not a problem how to accomplish a big pulling force at the pulley periphery but how to transmit it from the periphery to the diamond wire so as not to affect its strain.

Presently manufactured diamond wire sawing plants are constructed with a single pulley drive. The analysis how to improve the transmission of the pulling force in the single pulley driven diamond wire sawing plants has produced unsatisfactory results regarding its driving capabilities. It has also been established that the possibility to simply increase the friction coefficient and/or arc of contact, and consequently the pulling factor, is poor due to the diamond wire sawing plant construction, its features and purpose. However, this problem can be resolved by constructing a tandem (pulley) drive to be applied to diamond wire sawing plant, as it can be observed at belt conveyers driven by a tandem drum and multiple driving drums.

The increase of pulling capabilities of a diamond wire sawing plant has been approached theoretically and is herewith illustrated by mathematical expressions from 1 to 37, where all essential characteristics and differences between so driven plant and single pulley driven plant are pointed out.

Within this paper there is a calculation speaking in favour of the diamond wire sawing plant driven by a tandem drive. If the values obtained by it are compared with, the advantages of a tandem drive are obvious relative to the single pulley drive presently in use for driving the said plants. By the same engine power and pulling force the strains on the wire are considerably smaller. The calculation in the reverse order, if the same wire strain values are applied for both modes of driving the diamond wire sawing plant, shows that the tandem drive, in this very case, can endure 2.2 stronger engine. Such engine can produce many times increased pulling force and yet the strain on the wire remains unchanged. So increased pulling force can overcome also increased sawing resistance what enables an adequate enlargement of the surface to be sawed and/or sawing speed.

A single pulley drive has its certain advantages considering the engine exploitation when compared with the proposed tandem drive for diamond wire sawing plant. The construction is simpler and the number of necessary bends on the diamond wire is reduced. Therefore, it is recommendable to use it wherever possible. Still, in cases where pulling force capacity is not sufficient, the tandem drive application to diamond wire sawing plant would be desirable, if it ever comes to realization. A number of quarries wouldn't then be bound to adjust their development and excavation methods to the abilities of diamond wire sawing plant as it is now the case. The quarry openings and split ups would be extended in a variety and development, not to mention the advantages of the excavation method for the recovery of the primarily sliced stones of large dimensions.

The final opinion regarding the appropriateness and applicability of the construction mode herewith proposed by the theoretical considerations should be yet stated by mechanical engineers (machinery constructors) after they have thoroughly considered the total construction elements, parameters, and economy efficiency of such plants.