

UDK 622.355:621.9.027

Izvorni znanstveni članak

Projekt »Strukturno-petrografska grada i tehničko-tehnološke značajke kamena« financiran od Ministarstva znanosti, tehnologije i informatike Republike Hrvatske

## UTJECAJ KONCENTRACIJE DIJAMANATA NA POTROŠNJU PERLI KOD PILJENJA ARHITEKTONSKOG KAMENA DIJAMANTNOM ŽIČNOM PILOM

Siniša DUNDA

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

**Ključne riječi:** Arhitektonski kamen, Eksploatacija, Dijamantna žična pila, Koncentracija dijamanta, Trajnost dijamantne žice.

Eksperimentalno je istraživao utjecaj koncentracije dijamanta na potrošnju dijamantnog sloja, odnosno na životni vijek dijamantne žice. Promjena koncentracije postignuta je promjenom koraka perli po m<sup>2</sup> dijamantne žice. Na temelju rezultata istraživanja utvrđena je optimalna koncentracija dijamanta koja daje najmanju cijenu potrošnje po m<sup>2</sup> ispiljenog kamena.

**Key-words:** Dimension stone, Quarrying, Diamond wire sawing plant, Diamond concentration, Diamond wire duration.

The influence of diamond concentration to the wear of diamond layer and to the life time of the diamond wire has experimentally tested. The changes of the diamond concentration were achieved by changing the beads' pace per m<sup>2</sup> of diamond wire. Upon the obtained results of the experiment, the optimal concentration of diamonds has been established, also considering the least cost per square meter of sawing.

### Uvod

Nekoliko godina nakon pojave dijamantne žične pile za eksploataciju arhitektonskog kamena, taj stroj koristi se u stotinjak kamenoloma na području Carrare (Trancu, 1980). Prednosti toga stroja u odnosu na klasičnu žičnu pilu (veći učinak zbog brzine piljenja, jednostavnost rukovanja, kvaliteta reza uz manji gubitak sirovine) pridonjele su tome, da se dijamantna žična pila ubrzo proširila po kamenolomima ne samo u Italiji nego po cijelom svijetu. Neprekidno usavršavanje stroja i reznog alata, učinili su dijamantnu žičnu pilu gotovo nezamjenjivim strojem u eksploataciji vapnenca, mramora i ostalih srodnih mekih i srednje tvrdih stijena.

Učinkovitost dijamantne žične pile pri eksploataciji arhitektonskog kamena ovisi o pravilnom izboru konstruktivnih i tehnoloških parametara stroja, dijamantne žice te uvjeta i načina eksploatacije u određenoj vrsti stijene. Poznavanje utjecaja pojedinih parametara na učinak rada i potrošnju reznog alata, te načina na koji pojedini čimbenici utječu jedni na druge i kako se njihov pojedinačni i međusobni utjecaj odražava na svekoliki proces eksploatacije, omogućava izbor optimalnih alata i optimalnog režima rada.

Dobri rezultati koji se postižu dijamantnom žičnom pilom (u odnosu na druge tehnologije dobivanja blokova arhitektonskog kamena) unatoč često nepravilnom izboru radnih parametara vjerojatno su razlogom, da se proučavanju tih faktora ne posvećuje dužna pažnja.

Istraživanje utjecaja pojedinih parametara na učinak rada i potrošnju dijamantnog alata treba pridonijeti izboru optimalnih alata i načina rada. Jedan od tih parametara je i koncentracija dijamanta.

### Polazna razmatranja

Koncentracija dijamanta predstavlja odnos količine dijamanta i veziva u jedinici obujma dijamantnog sloja. Zato koncentracija dijamanta određuje broj režućih elemenata na radnoj površini dijamantnih perli, pa uz ostale stalne čimbenike bitno utječe na potrošnju dijamantnog sloja, odnosno na efikasnost dijamantne žice u cjelini. Povećanjem koncentracije (kod nepromijenjene granulacije) povećat će se broj dijamantnih zrna, pa će razdioba svekolikih napreznja izazvati smanjenje napreznja po jednom zrnu i adekvatno smanjenje potrošnje dijamantnog sloja. Koncentracija je značajan parametar ne samo s tehničko-tehnološkog već i s ekonomskog stajališta, jer cijena dijamantne perle umnogome ovisi o količine dijamantnih zrna u njoj.

Zbog toga određivanje optimalne koncentracije dijamantne žice, za pojedinu vrstu stijene kod određenog režima rada, predstavlja jedno od važnijih pitanja rješavanja optimizacije piljenja kamena dijamantnom žičnom pilom.

Za velike potrošače proizvođači dijamantnih alata ispituju utjecaj konstruktivnih parametara dijamantne žice na njen učinak. Na osnovu ocjene tih parametara proizvode dijamantne perle određene koncentracije, granulacije i marke dijamanta, te vrste veziva namijenjene za točno određenu vrstu stijene.

Manji potrošači, u koje spadaju i hrvatska poduzeća, ne mogu si priuštiti tu privilegiju već nabavljaju perle ili žicu prema ocjeni o sličnosti stijena. Drugim riječima, kupuju »univerzalne« perle koje »zadovoljavaju« široki dijapazon karakteristika stijenske mase. Naravno da takav odabir perli često ne daje tražene i odgovarajuće rezultate.

Zbog nedostatka perli različitih koncentracija onemogućeno je ispitivanje utjecaja koncentracije dija-

manata na potrošnju dijamanatne žice uzimanjem žica s perlama različite koncentracije.

Međutim, promjenom koraka perli može se postići promjena koncentracije dijamanata po metru dužine dijamanatne žice. Promjenom razmaka između perli (korak perli) povećava se ili smanjuje broj perli po jedinici dužine dijamanatne žice, a time ujedno i koncentracija dijamanata izražena po m' dijamanatne žice.

Kako se dijamanatna žica najčešće montira na kamenolomima, primjenom razdjelnih opruga različite dužine moguće je formirati žicu s različitim korakom perli. Tako formiranim žicama omogućeno je eksperimentalno ispitivanje utjecaja koncentracije dijamanata na efikasnost piljenja u određenoj vrsti stijene.

Da bi se ustanovilo koliko promjena koncentracije dijamanata po m' žice utječe na potrošnju dijamanatnog sloja time i na životni vijek dijamanatne žice, provedena su eksperimentalna istraživanja ovisnosti potrošnje dijamanatnih perli o promjeni koraka perli na dijamanatnoj žici.

### Eksperimentalni dio

#### Formiranje žice

Za formiranje dijamanatne žice na raspolaganju su bili sljedeći elementi:

- Čelično nehrđajuće uže konstrukcije 7 (1 + 6 + 12) = 133 žice, vanjskog promjera  $\varnothing = 5$  mm.
- Sintetizirane dijamanatne perle cilindričnog oblika ukupne dužine 8,5 mm s vanjskim promjerom 10

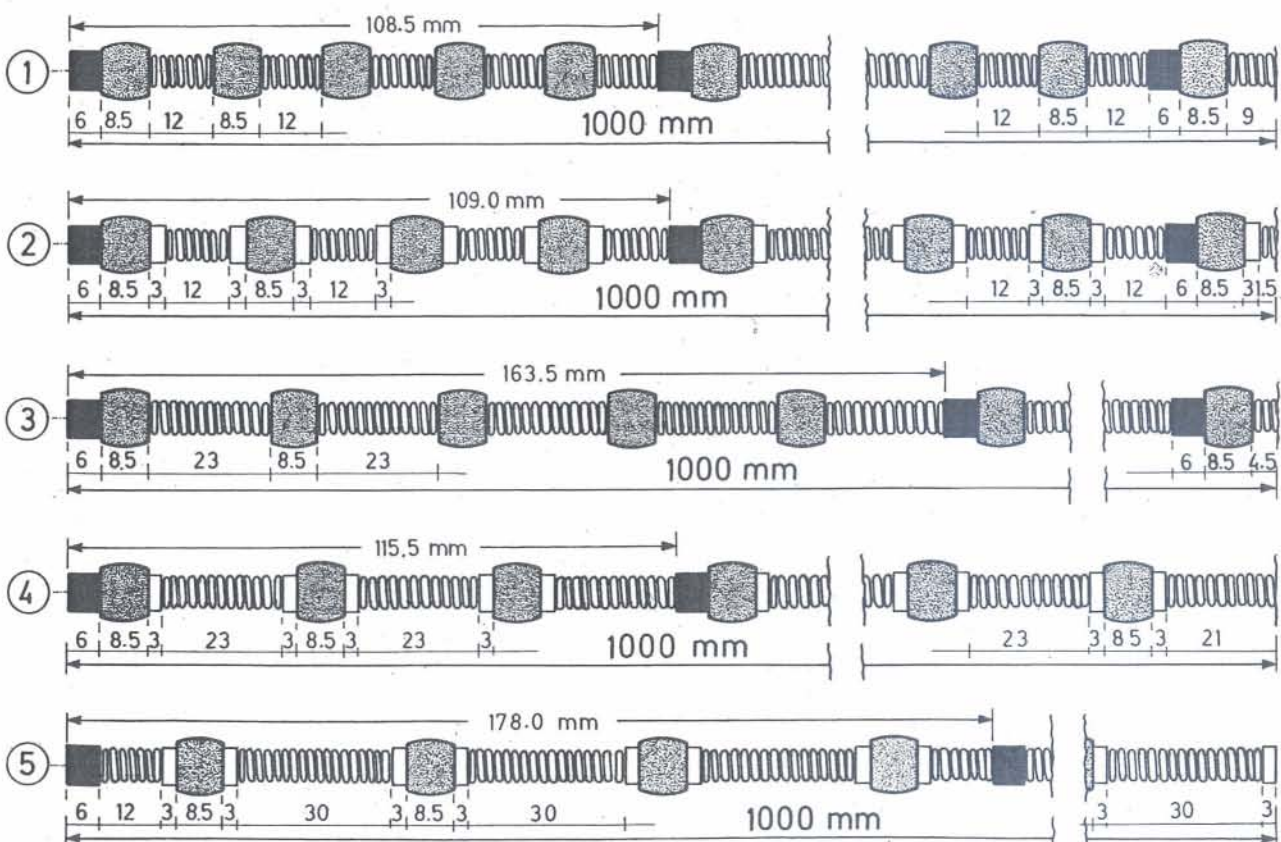
mm, unutarnjeg promjera 5 mm. Dužina dijamanatnog sloja perle iznosi 6 mm, debljina dijamanatnog sloja 1,5 mm. Marka dijamanata SDA (De Beers), granulacija dijamanata 45/50 mesha (USA standard ASTM), koncentracija dijamanata 35%.

- Čelični zaštitni (razdjelni) prstenovi vanjskog promjera 8 i unutarnjeg 5 mm, širine 3,0 mm.
- Blokirni osigurači (naglavci) dužine 6 mm.
- Tri tipa razdjelnih opruga  $\varnothing 8$  mm i to opruge dužine u nenapregnutom stanju: 12, 23 i 30 mm.
- Spojnice s »muško-ženskim« navojem tip 9700751-9700752.

#### Formirani tipovi dijamanatne žice

Od navedenih raspoloživih elemenata formirano je pet tipova dijamanatne žice prema sl. 1. Od toga dva tipa dijamanatnih žica (1 i 3) pripadaju grupi »normalnih« žica koje su formirane od: čeličnog užeta, dijamanatnih perli, razdjelnih opruga i blokirnih osigurača. Druga tri tipa (2, 4 i 5) pripadaju grupi »specijalnih« dijamanatnih žica, koje u svom sastavu osim navedenih elemenata imaju i zaštitne prstenove. Kod svih tipova korištene su za spajanje žice iste spojnice s muško-ženskim navojem. Također su nepromjenjivi elementi po dimenzijama i karakteristikama: čelično uže, dijamanatne perle, blokirni osigurači i zaštitni prstenovi.

**Prvi tip** žice formiran je tako da nakon blokirnog osigurača dolazi dijamanatna perla, pa razdjelna opruga (dužine u nenapregnutom stanju 12 mm) i nakon pet tako postavljenih elemenata ponovno blokirni osigurač. Korak perli između dva blokirna



Sl. 1 Tipovi dijamanatne žice odabrani za eksperimentalna istraživanja utjecaja koncentracije dijamanata na potrošnju perli  
Fig. 1 Types of diamond wires selected for experiments on how the concentration of diamonds effects the wearing of beads

prstena, na dužini 102,5 mm kod ovako formirane žice, iznosi 20,5 mm. Na mjestu učvršćenja blokirnog osigurača taj je korak povećan za dužinu osigurača 6 mm.

Jedan metar dužni ovog tipa žice sadrži:

- čelično uže  $\varnothing$  5 mm,
- dijamantne perle dužine 8,5 mm, promjera 10 mm - 46 komada,
- razdjelne opruge vanjskog promjera 8 mm, dužine 12 mm - 45,75 komada,
- blokirni osigurač promjera 8 mm, dužine 6 mm - 10 komada

Kod **drugog tipa** žice poslije blokirnog prstena dolazi dijamantna perla, zatim zaštitni prsten, pa razdjelna opruga od 12 mm dužine, te ponovno zaštitni prsten. Nakon četiri ovako nanizana elementa postavlja se nanovo blokirni osigurač s time da uz njega ne dolazi zaštitni prsten. Korak perli kod ovog tipa žice je 26,5 mm, a na mjestima uz blokirne osigurače 29,5 mm.

Jedan metar dužni ovog tipa žice sastoji se od:

- čelično uže  $\varnothing$  5 mm,
- dijamantne perle 8,5 mm dužine, promjera 10 mm - 37 komada,
- razdjelne opruge  $\varnothing$  8 mm, 12 mm dužine - 36,125 komada
- zaštitni prsten promjera 8 mm, dužine 6 mm - 64 komada,
- blokirni osigurač  $\varnothing$  8 mm, dužine 6 mm - 10 komada.

**Treći tip** žice formiran je na isti način kao i prvi tip s tom razlikom da razdjelne opruge imaju dužinu 23 mm umjesto 12 mm kakve su korištene kod prvog tipa. Korak perli kod ovog tipa iznosi dakle  $23+8,5=31,5$  mm. Na mjestima učvršćenja blokirnog osigurača (nakon 5 perli) korak je duži za dužinu osigurača (6 mm). Jedan metar čeličnog užeta ovog tipa dijamantne žice sadrži slijedeći broj elemenata: 31 perlu, 30,196 razdjelnih opruga dužine od 23 mm i 7 blokirnih osigurača.

**Četvrti tip** žice složen je na isti način kao i drugi tip, s tim da je (osim što su korištene razdjelne opruge dužine 23 mm umjesto opruga od 12 mm) blokirni osigurač učvršćivan poslije svake tri perle, a ne poslije svakih pet perli, kao što je imao drugi tip žice. Na jedan m' čeličnog užeta ovog sustava slaganja dolazi sljedeći broj elemenata: 26 dijamantnih perli, 25,91 razdjelnih opruga od 23 mm dužine, 43 zaštitna prstena i 9 blokirnih osigurača.

**Peti tip** dijamantne žice spada također u »specijalni« kod kojega se koriste zaštitni prstenovi, s time da je kod ovog modela uzimana i kombinacija opruga različitih dužina. U ovom slučaju opruge dužine 12 i 30 mm. Žica je formirana na taj način da je nakon blokirnog osigurača postavljena opruga dužine 12 mm, zatim zaštitni prsten, perla i nanovo zaštitni prsten. Slijedeća opruga ima dužinu 30 mm, pa onda dolazi perla sa zaštitnim prstenovima, opruga 30 mm itd... Nakon četiri perle sa zaštitnim prstenovima ponovo se stavlja opruga dužine 12 mm, a opruge između perli imaju dužinu 30 mm. Korak perli kod ove žice iznosi 44,5 mm. Ovom kombinacijom postignuto je da korak bude isti po cijeloj dužini dijamantne žice. On se ne mijenja ni na mjestima učvršćenja

blokirnih osigurača, jer na tom mjestu dolazi blokirni osigurač od 6 mm plus dvije opruge po 12 mm (24 mm), jedna perla 8,5 mm i dva razdjelna prstena po 3 mm (6 mm) što sve zajedno iznosi 44,5 mm i odgovara koraku perli na bilo kojem mjestu žice (perla 8,5 mm + opruga 30 mm + dva zaštitna prstena  $2 \times 3$  mm = 44,5 mm).

Jedan m' užeta tog tipa dijamantne žice sadrži: 22 perle, 11 razdjelnih opruga od 12 mm, 17 razdjelnih opruga od 30 mm dužine, 45 zaštitnih prstenova i 6 blokirnih osigurača.

S navedenim raspoloživim elementima za formiranje dijamantne žice moglo se naravno kombinirati i napraviti cijeli niz različitih tipova dijamantnih žica. Međutim, kako je predviđeno da se ispitivanja utjecaja koncentracije dijamantata na potrošnju dijamantne žice izvode u proizvodnim uvjetima, nastojalo se što manje remetiti redovnu proizvodnju. Zato za te pokuse nisu formirani tipovi žica za koje se na osnovu iskustva pretpostavljalo da će pokazati loše rezultate, bitno utjecati na učinak i prouzročiti negativne ekonomske efekte. Odabranih pet tipova žice obuhvaća zaista široki raspon razlika, tako da se broj perli po metru žice kreće od 22 (peti tip) do 46 (prvi tip), pa je to garancija (uz iskustva zaposlenih na tom području) da je to dovoljan broj tipova unutar kojih će se pokazati optimalni rezultati.

#### Koncentracija dijamantata po dužnom metru žice

Kod svih pet tipova dijamantne žice korištene su iste dijamantne perle s koncentracijom dijamantata 35%, granulacije 45/50 mesha, marke SDA. Granulaciji dijamantata 45/50 mesha (prema američkom standardu ASTM) odgovara granulacija dijamantata 455/300  $\mu$ m prema standardu ISO R 565 (Dunda 1985, 1991). Nadalje, za dijamante marke SDA (De Beers) granulacije 355/300  $\mu$ m (ISO R 565), računajući s prosječnom gustoćom dijamantata  $\rho_d = 3,515$  g/cm<sup>3</sup>, dobije se uz srednji promjer zrna, da jedan karat sadrži prosječno oko 3080 zrna dijamantata (Dunda, 1985).

Pod koncentracijom 35% podrazumijeva se količina od 1,54 karata dijamantata po kubičnom centimetru dijamantnog sloja. Znači da 1 cm<sup>3</sup> dijamantnog sloja ima 1,54 kt dijamantata ili 0,308 g/cm<sup>3</sup>, odnosno volumni sadržaj dijamantata u ukupnom volumenu dijamantnog sloja iznosi 8,75% (Dunda, 1985, 1991).

Volumen dijamantnog sloja na perli dužine 8,5 mm, vanjskog promjera 10 mm iznosi 0,24 cm<sup>3</sup>, pa količina dijamantata na jednoj perli iznosi:

$$0,24 \text{ cm}^3 \cdot 1,54 \text{ kt/cm}^3 = \\ = 0,37 \text{ kt/perli} \cdot 0,2 = 0,074 \text{ g/perli.}$$

Broj dijamantnih zrna na jednoj perli će biti:

$$0,37 \text{ kt} \cdot 3080 \text{ zrna/kt} = 1139,6 = 1140 \text{ zrna po perli}$$

Iako je količina dijamantata na svakoj perli jednaka, koncentracija dijamantata po m' na različitim tipovima žice bit će različita, jer je različit broj perli po metru žice. Različiti broj perli po m' dijamantne žice utječe na vrijednost pojedinog tipa žice. Prora-

Tablica 1 Koncentracija dijamanata po m' dijamentne žice  
 Table 1 Diamond concentration per m' of diamond wire

Tip žice Type of diamond wire	Broj perli Number of beads kom./m' piece/m'	Koncentracija dijamanata Diamond concentration		Broj dijamentnih zrna Number of diamond grains kom./m' piece/m'	Vrijednost perli Beads value ITL/m'	Indeks Index
		kt/m'	g/m'			
1	2	3	4	5	6	7
5	22	8,14	1,628	25080	108900	100,0
4	26	9,62	1,924	29640	128700	118,2
3	31	11,47	2,294	35340	153450	140,9
2	37	13,69	2,738	42180	183150	168,2
1	46	17,02	3,404	52440	227700	209,1

čunate koncentracije dijamanata po m' žice za odba-  
 nanih pet tipova dijamentne žice prikazane su u  
 tablici 1. U tablici je navedena i vrijednost perli po  
 m' pojedinog tipa žice računajući s cijenom perle,  
 prethodno navedenih karakteristika, od 4950 ITL  
 (1989 g.).

Povećanjem broja perli (od 22 perle po m' na žici  
 tip 5 do 46 perli po m' na žici tip 1) povećava se  
 proporcionalno koncentracija dijamanata. Znači pro-  
 porcionalno se povećava broj reznih elemenata, pa  
 je za očekivati da će se, uz nepromijenjene ostale  
 čimbenike, smanjiti potrošnja dijamentnog sloja,  
 odnosno povećati trajnost (životni vijek) dijamentne  
 žice.

#### Vrsta kamena

Utjecaj koncentracije dijamanata na trajnost alata  
 eksperimentalno je ispitivan piljenjem vapnenca tip  
 »Romanovac« na kamenolomu Romanovac podu-  
 zeća Kamen, Obrovac 1988. g. Vapnenci su brečaste  
 građe, crvenkasto sive boje, masivni, često ispresje-  
 cani pukotinama i prslinama koje tvore nepravilnu  
 mrežu. Širina pukotina i prslina varira od mikroskopskih  
 do maksimalno 2–4 mm (D u n d a, 1988). Prsline  
 i pukotine zacijeljene su sparikalцитом bijele boje i  
 limonitno-hematitnom supstancijom crvene boje.  
 Relativne je tvrdoće po Mohsu oko 3. Mikroskopski  
 preparat pokazuje mikrobrečastu strukturu nastalu  
 intenzivnim lomljenjem i zacijeljivanjem primarnog  
 mikritskog vapnenca. Obzirom na međusobni odnos  
 pukotinskih sustava, te internu brečastu teksturu  
 pojedinih fragmenata, zaključuje se da je bilo neko-  
 liko ciklusa lomljenja i zacijeljivanja kurpnozrnim  
 sparikalцитом i mikrokristalastim kalcitom. Brojne  
 pukotine i prsline zacijeljene su i limonitno-hematit-  
 nom tvari.

Kamen klasificiran kao vapnenačka mikrobreča  
 ima slijedeća fizičko mehanička svojstva ispitana u  
 Građevinskom Institutu, Zagreb (uvjerenje o kvali-  
 teti br. 972/85):

Čvrstoća na pritisak:

u suhom stanju –  $\sigma_{sr} = 119$  MPa

u vodozasicećenom stanju –  $\sigma_{sr} = 80,5$  MPa

poslije smrzavanja –  $\sigma_{sr} = 77,0$  MPa

Čvrstoća na savijanje –  $\sigma_{sr} = 5,6$  MPa

Otpornost na habanje struganjem –  $A_s =$   
 $= 18,1 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$

Upijanje vode –  $U = 0,31$  mas. %

Postojanost na mrazu – postojan  
 Zapreminska masa –  $\gamma_m = 2681 \text{ kg/m}^3$   
 Gustoća –  $\gamma_g = 2723 \text{ kg/m}^3$   
 Stupanj gustoće – 0,984  
 Poroznost – 1,6 vol. %

#### Režim rada

Navedeni kamen pilio se dijamentnom žičnom  
 pilom sa slijedećim osnovnim tehničkim podacima:  
 – Model i tip stroja – Telediam electronic, TD 45  
 – Proizvođač – Pellegrini (Italija)  
 – Instalirana snaga motora – 33 kW  
 – Frekvencija – 50 do 60 Hz  
 – Natezanje žice – kontinuirano podesivo od 0 do  
 2500 N  
 – Maksimalna brzina žice – 45 m/s

Za vrijeme piljenja brzina žice bila je stalna (40  
 m/s). Kod normalnog proizvodnog piljenja režim  
 rada je takav da je opterećenje stroja stalno, a  
 ovisno o vrsti kamena ili ukupnom otporu piljenja  
 mijenja se posmak stroja, a time i učinak piljenja.  
 Kod većine modela strojeva nezavisni elektropogon  
 posmaka nema mogućnost regulacije brzine motora.  
 Tu se brzinom posmaka odgovara na razlike u otporu  
 kojeg kamen pruža reznom alatu – dijamentnoj žici.  
 Znači da za vrijeme piljenja učinak varira ovisno o  
 veličini otpora (karakter stijene, veličina reza i dr.)  
 a opterećenje stroja (potrošnja električne energije)  
 ostaje nepromijenjeno.

Opisani režim rada zadržan je i kod ovih ekspe-  
 rimentalnih istraživanja. Da bi usporedba piljenja s  
 različito formiranim dijamentnim žicama bila što  
 vjerodostojnija, nastojalo se da dimenzije i površine  
 rezova budu što je moguće sličnije, kako bi učinci  
 bili što izjednačeniji. Pilili su se vertikalni rezovi u  
 etaži visine cca 4 m dužine od 11 do 12 m, tako da  
 je prosječna površina reza iznosila oko 46 m<sup>2</sup>. Radilo  
 se s opterećenjem kod kojeg je jakost struje iznosila  
 55 A, jer se iz iskustva na tom kamenolomu pri  
 takvom opterećenju postižu zadovoljavajući učinci,  
 a što je najvažnije, pri takvom režimu rada gotovo  
 da nema pucanja žice.

#### Način mjerenja

Potrošnja dijamentnih perli mjerena je na uzorku  
 od 80 perli kod petog tipa žice, a za ostale je tipove  
 povećavana približno proporcionalno povećanju

broja perli po m' žice. Tako je uzorak četvrtog tipa žice imao 95 perli, trećeg 110, drugog 130 i prvog 165 perli. Prosječni rezultati potrošnje dijamantnog sloja određeni su prema volumenu sloja smanjenom piljenjem. Gubitak zapremine perle utvrđen je vaganjem perli prije formiranja žice i vaganjem istih dobro očišćenih perli nakon ispiljene određene površine kamena, na vagi s točnošću od 0,1 miligram.

Uz potrošnju perli registriran je ostvareni učinak piljenja. Prilikom skraćivanja žice zbog napredovanja reza i ponovnog uključivanja pojedinih sekcija žice u rez, strogo se pazilo da markirane perle iz odabranog uzorka provedu što je moguće isto vrijeme u rezu. Zato su sve mjerene perle (odabrani uzorak) na određenom tipu žice ispilile gotovo istu količinu kamena u gotovo identičnim radnim uvjetima. Računska dužina žice sastavljena od perli koje su neprekidno sudjelovale u ukupno promatranoj površini rezanja iznosila je 30 m.

Sa svim ispitivanim perlama ispiljena je približno ista količina kamena od približno 180 m<sup>2</sup>. One su skinute s dijamantne žice ranije nego bi potrošnja perli mogla utjecati na promjenu učinka piljenja.

Glavnina mjerenja potrošnje dijamantnog sloja perli obavljena je prilikom prve regeneracije dijamantne žice kod zamjene čeličnog užeta.

## Rezultati i diskusija

Prosječni rezultati mjerenja potrošnje dijamantnih perli prikazani su u tab. 2. Prosječni učinak piljenja gotovo je nepromjenljiv kod različitih tipova dijamantne žice, ali se potrošnja perli povećava sa smanjenjem broja perli po m' žice. To je bilo i za očekivati, jer je režim rada bio tako podešen da nije dolazilo do bitnih kolebanja opterećenja. Gotovo iste površine i oblici rezova, ista vrsta stijene, stalna brzina dijamantne žice, isti uvjeti hlađenja i ostali nepromijenjeni radni čimbenici utjecali su na to da se kod svih slučajeva otpori piljenja nisu bitno mijenjali. Režim je piljenja bio tako podešen da se radilo istom snagom odnosno silom posmaka, a na promjenu opterećenja se odgovaralo promjenom brzine posmaka. Kako se za vrijeme piljenja opterećenja nisu bitno mijenjala, tako je i brzina posmaka

neznatno varirala pa se i učinak piljenja tijekom rada samo neznatno mijenjao. Male se promjene učinka za vrijeme rada pogotovo ne odražavaju na prosječni učinak ostvaren nakon dužeg vremenskog perioda. Zato su prosječni učinci piljenja kod svih pokusa za sve tipove žica bili gotovo identični.

Promjena koncentracije dijamanata po m' žice kod različitih tipova žice odrazila se, međutim, na potrošnju dijamantnog sloja perli a time i na životni vijek žice. Da bi rezultati istraživanja utjecaja koncentracije dijamanata na potrošnju perli bili što pregledniji izražene su prosječne potrošnje perli kao prosječne potrošnje m' žice. Nadalje, prosječna potrošnja dijamantne žice prikazana je kao specifična potrošnja, tj. potrošnja je izražena po jedinici ispiljene površine (m<sup>2</sup>/m'). Tako izraženi rezultati istraživanja navedeni su u tab. 3.

Da bi se rezultati mjerenja prikazali kao specifična potrošnja promatrane količine piljenja svedene su na m' dijamantne žice (Tab. 3, stupac 3) na taj način, da su količine piljenja (Tab. 2 stupac 2) podijeljene s dužinom žice od 30 m. Izmjerene prosječne potrošnje perli (Tab. 2 stupac 5) su također prikazane po m' dimantne žice (Tab. 3 stupac 4). To je postignuto tako da su prosječne potrošnje perli na m' dijamantne žice (Tab. 3 stupac 2) pomnožene brojem perli po m' dijamantne žice (Tab. 3 stupac 2). Dijeljenjem prosječne potrošnje dijamantne žice (Tab. 3. stupac 4) s količinom piljenja (Tab. 3 stupac 3) dobile su se specifične potrošnje dijamantnih žica izražene u mg/m<sup>2</sup> (Tab. 3 stupac 5). Da bi se dobile specifične potrošnje dijamantnih žica izražene u m' potrošene žice po m<sup>2</sup> piljenja, podijeljene su te specifične potrošnje izražene u mg/m<sup>2</sup> ukupnom masom dijamantnog sloja po m' žice. Ukupna masa dijamantnog sloja po m' žice dobivena je tako, da je masa dijamantnog sloja jedne perle od 1400 mg pomnožena brojem perli na m' pojedinog tipa dijamantne žice. Tako izraženi rezultati specifične potrošnje dijamantne žice navedeni su u tab. 3 stupac 6 i 7 i prikazani dijagramom na slici 2. Recipročne veličine tako izražene potrošnje žice označavaju trajnost žice, te su kao takve navedene u Tab. 3 stupac 8 i 9 također prikazane na dijagramu sl. 2.

Tablica 2 Prosječni rezultati ispitivanja potrošnje dijamantnog sloja perli kod različitih tipova dijamantne žice

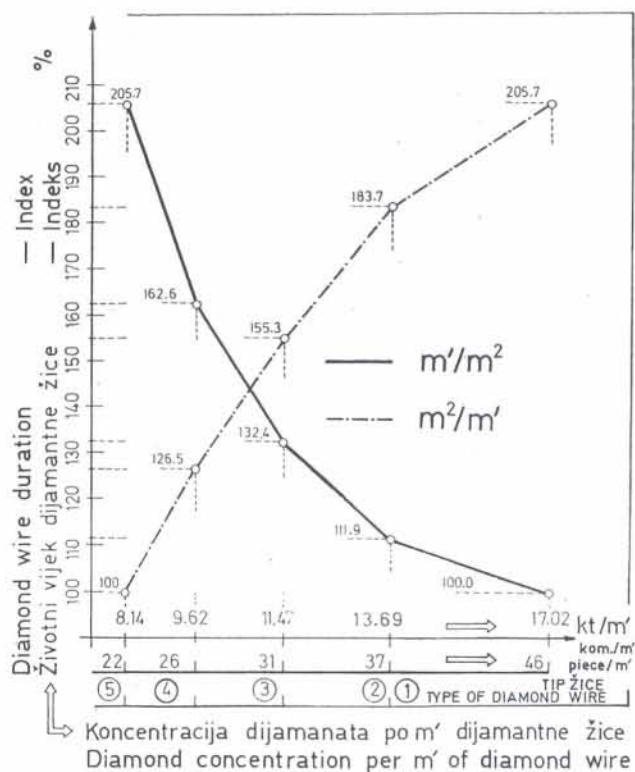
Table 1 Average results obtained after experiments on abrasion of diamond layer on the beads for various types of diamond wires

Tip žice Type of diamond wire	Količina piljenja Amount of sawing m <sup>2</sup>	Vrijeme rada Consumed time h	Prosječni učinak Average result m <sup>2</sup> /h	Prosječna potrošnja perli Average wearing of beads		
				mg/kom. mg/piece	μm/kom. μm/piece	Indeks Index
1	2	3	4	5	6	7
5	183,60	21,30	8,62	244,8	456,2	100,0
4	179,85	20,56	8,75	189,5	353,1	77,4
3	180,60	20,20	8,94	155,0	288,8	63,3
2	181,20	20,52	8,83	131,5	245,0	53,7
1	178,05	20,32	8,76	115,4	214,9	47,1

Tablica 3 Prosječni rezultati potrošnje dijamentne žice izraženi kao specifične vrijednosti

Table 3 Average results of diamond wire wearing presented as specific values

Tip žice Type of diamond wire	Broj perli Number of beads	Količina piljenja svedena na m' žice Amount of sawing concerning m' of wire	Prosječna potrošnja dijamentne žice Average wearing of diamond wire	Specifična potrošnja dijamentne žice Specific wearing of diamond wire	Trajnost dijamentne žice Diamond wire duration				Specifična cijena dijamentne žice Specific cost of diamond wire	
					kom./m' piece/m'	m <sup>2</sup>	mg/m'	mg/m <sup>2</sup>	m'/m <sup>2</sup>	Indeks Index
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	22	6,120	5385,6	880,00	0,02857	205,7	35,00	100,0	3111,4	100,0
4	26	5,995	4927,0	821,85	0,02258	162,6	44,29	126,5	2905,8	93,4
3	31	6,020	4805,0	798,17	0,01839	132,4	54,37	155,3	2822,3	90,7
2	37	6,040	4865,5	805,55	0,01555	111,9	64,30	183,7	2848,4	91,5
1	46	5,935	5308,4	894,42	0,01389	100,0	72,00	205,7	3162,5	101,6



Sl. 2 Ovisnost potrošnje dijamentne žice o koncentraciji dijamanata

Fig. 2 How the concentration of diamonds effects the wire wearing

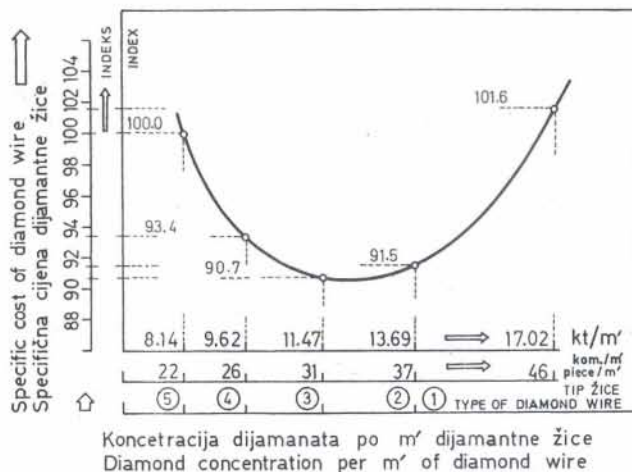
Dobivena krivulja ovisnosti specifične potrošnje dijamentne žice ( $m'/m^2$ ) odgovara pretpostavci da će povećanje koncentracije dijamanata po m' dijamentne žice izazvati smanjenje potrošnje dijamentnog sloja perli. Povećanjem broja perli po jedinici dužine dijamentne žice proporcionalno se povećava koncentracija dijamanata po m' žice, tj. broj reznih zrna i shodno tome, smanjuje se specifična potrošnja dijamentne žice. Recipročna krivulja potrošnje dijamentne žice – trajnost dijamentne žice ( $m^2/m'$ ) odgovara istoj pretpostavci, jer je povećanje koncentracije izazvalo povećanje životnog vijeka žice. Iz ovih rezultata se vidi da se jednim metrom dijamentne žice tip 5, koja ima 22 perle po m' ili koncentraciju

od 8,14 kt/m' može ispiliti ukupna površina od 35 m<sup>2</sup>, (indeks 100), dok žica s 46 perli po m' (koncentracija 17,02 kt/m') može ispiliti površinu od 72 m<sup>2</sup> (indeks 205,7), što je više nego dvostruko.

Iz navedenih krivulja (sl. 2) se također vidi da smanjenje potrošnje dijamentnih perli nije potpuno proporcionalno povećanju koncentracije dijamanata po m' dijamentne žice. To ukazuje na to da na trajnost i efikasnost žice utječu i ostali konstruktivni elementi žice i način njenog formiranja. Nadalje, unatoč nastojanjima da prilikom pokusa svi ostali čimbenici budu što stalniji to se u proizvodnim uvjetima nije moglo postići kako bi se moglo ostvariti laboratorijskim pokusima.

Na temelju izloženih razmatranja može se zaključiti da se s povećanjem broja perli po m' dijamentne žice smanjuje specifična potrošnja dijamentnog sloja, znači da je povećanje broja perli svrhovito. Međutim, kod tog razmatranja treba uzeti u obzir da se s povećanjem broja perli povećava ukupna količina dijamanata na dijamentnoj žici. Povećana količina dijamanata na istoj jedinici dužine znači i povećanu cijenu dijamentne žice. Zbog toga specifična potrošnja dijamentnog sloja, izražena u mg/m<sup>2</sup> ili dijamentne žice u m/m<sup>2</sup> odnosno recipročna vrijednost trajnosti žice m<sup>2</sup>/m', ne daje realne pokazatelje. U određenom momentu povećanje cijene žice po jedinici ispiljene površine premašiti će korist od smanjenja potrošnje sloja. Iz krivulje na sl. 2 ne razabire se kod koje koncentracije brže raste povećanje cijene dijamentne žice od efekta piljenja. Znači da za izbor racionalne koncentracije ta krivulja nije potpuno mjerodavna, jer se iz nje nedovoljno razabire kod koje koncentracije dolazi do negativnog efekta uslijed povećanja cijene žice u odnosu na pozitivni efekt piljenja uslijed povećanja koncentracije. Da bi se dobila realnija slika o utjecaju koncentracije dijamanata na potrošnju dijamentnog sloja, potrošnja je izražena kao specifična cijena dijamentne žice. Pod specifičnom cijenom dijamentne žice podrazumijeva se cijena potrošnje dijamentnog sloja (ovdje ITL) po 1 m<sup>2</sup> ispiljene površine. Da bi se dobila ta specifična cijena žice, odnosno da bi se ustanovilo koliko će cijena pojedinog tipa dijamentne

žice teretiti jedinicu površine ispiljenog kamena, podijeljena je cijena žice (Tab. 1 stupac 6) s površinom reza koja se može ispiliti s 1 m<sup>2</sup> tog tipa žice (Tab. 3, stupac 8). Dobivene vrijednosti su navedene u tab. 3, stupac 10 i 11 i prikazane dijagramom na slici 3.



Sl. 3 Ovisnost specifične cijene potrošnje dijamantne žice o koncentraciji dijamantata

Fig. 3 How the specific cost of wire wearing is influenced by the diamond concentration.

Kod toga računanja uzeta je kao cijena dijamantne žice samo vrijednost dijamantnih perli (Tab. 1, stupac 6), bez ostalih konstruktivnih elemenata žice. Čelično užje je isto kod svih tipova žice, a njegova potrošnja je nerazmjerna i neovisna o potrošnji perli i potrebno ga je mijenjati prije nego se potroše perle. Blokirni osigurači mogu se koristiti samo jednom, jer se nakon svakog prešanja više ne mogu demontirati pa se mijenjaju istovremeno s užjetom. Čelične opruge i prstenovi se mijenjaju obično zajedno s promjenom perli ili prilikom regeneracije žice kod promjene užeta. Cijene ovih elemenata u usporedbi s cijenom perli su tako male, da uz užje vrijednost žice predstavlja ustvari vrijednost perli. Cijena razdjelne opruge npr. iznosi svega oko 0.5% vrijednosti perle (opruga od 12 mm 22 ITL, a od 30 mm 28 ITL). Na razliku u cijeni između pojedinih tipova žice u najvećoj mjeri utječu broj perli po m' žice, pa je zbog jednostavnijeg prikaza kao vrijednost žice usvojena samo vrijednost perli.

Iz dijagrama na sl. 3 vidi se da krivulja iskoristivosti dijamantnih perli izražena u novčanim jedinicama (ITL), po m<sup>2</sup> ispiljene površine ima zonu minimalnih veličina između koncentracije 11,1 kt/m' (30 perli/m) i koncentracije 12,95 kt/m' (35 perli/m'), bez obzira na rast specifične potrošnje dijamantata između tih koncentracija.

Potrošnja dijamantnog sloja perli izražena u troškovima dijamantnih perli po m<sup>2</sup> ispiljene površine

pokazuje da se unatoč povećanju cijene dijamantne žice kod povećane koncentracije, smanjuje cijena koštanja žice po 1 m<sup>2</sup> piljenja do određene granice, a da bi dalje povećanje koncentracije dijamantata bilo neracionalno.

Iz tablica 1 i 3 vidi se da piljenje vapnenca Romanovac dijamantnom žicom koncentracije 9,62 kt/m' daje 26,5% veći životni vijek žice od onog s koncentracijom od 8,14 kt/m' i 55, 2% i onog s koncentracijom 11,47 kt/m' u odnosu na koncentraciju 8,14 kt/m'. Iako je cijena dijamantne žice veće koncentracije viša od one manje koncentracije, ušteda po 1 m<sup>2</sup> piljenja je 206 ITL kod koncentracije 9,62 kt/m' u odnosu na koncentraciju 8,14 kt/m'. Isti se trend nastavlja do koncentracije 11,47 kt/m', kad dolazi do usporenja snižavanja cijene 1 m<sup>2</sup> piljenja, a zatim se prelazi u negativne rezultate.

### Zaključak

Na osnovi navedenih istraživanja može se zaključiti da se s povećanjem koncentracije smanjuje potrošnja dijamantnog sloja perli ili povećava njihov životni vijek. To je i logično, jer veća koncentracija znači i veći broj reznih zrna, pa se analogno tome povećava trajnost dijamantnih perli i dijamantne žice u cjelini.

Međutim, manja potrošnja dijamantnog sloja (kod povećane koncentracije) ne znači i manju potrošnju dijamantata, jer kod veće koncentracije ima više dijamantata na istoj dužini dijamantne žice, te treba voditi računa o ekonomskoj isplativosti.

Veća količina dijamantata na istoj dužini dijamantne žice znači i veću cijenu žice, pa je povećanje cijene svrhovito samo do određene granice. Zato kod izbora koncentracije treba voditi računa o tome da nije optimalna ona koncentracija kod koje će se dobiti najmanja potrošnja dijamantnog sloja, već ona, koja će dati najmanju cijenu potrošnje po m<sup>2</sup> ispiljenog kamena. Optimalne koncentracije dijamantata po m' dijamantne žice kod piljenja vapnenca iznose od 11,1 do 12,95 kt/m'. Tim koncentracijama odgovaraju dijamantne žice s 30 do 35 perli po m' žice kad jedna perla ima koncentraciju dijamantata 35% (1,54 kt/cm<sup>3</sup>) i granulaciju 45/50 mesha.

Primljeno: 17. II. 1993.

Prihvaćeno: 27. V. 1993.

### LITERATURA

- Dunda, S. (1985): Utvrđivanje funkcionalnih zavisnosti tehničkih i tehnoloških parametara dijamantnih alata za obradu arhitektonsko-gradevnog kamena. Magistarski rad s. n., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 159 pp., Zagreb
- Dunda, S. (1991): Osnovne karakteristike dijamantnih segmenata reznih alata za obradu arhitektonskog kamena. *Klesarstvo i graditeljstvo*, 2, 13–22, Pučišća
- Trancu, T. C. (1980): La »Bicicletta« che taglia grandi blocchi di marmo 6000 tonnellate. Informazioni sui diamantati sega-gione della pietra T 45 – De Beers Industrial Diamond Division, 4 pp., Milano

## The Concentration of Diamonds Influences the Wear of Beads in Sawing Dimension Stone with Diamond Wire Sawing Plant

S. Dunda

Among important questions of how to improve the efficiency of dimension stone sawing when diamond wire sawing plant is applied, is what is the optimal diamond concentration on the wire in certain working environment.

The number of cutting elements on the contact areas of diamond beads directly depends upon the concentration of diamonds and significantly influences the sawing resistance value, and consequently the sawing efficiency and abrasion of diamond layer, and finally the diamond wire efficiency in general. The concentration of diamonds represents a very important parameter as from the technical and technological point of view, so from the economy point of view, since the cost of diamond wire is related to the amount of diamond grains on beads.

In order to establish how the change in diamond concentration per m' of wire influences the wear of diamond layer, and thus the life of the wire, the relation between the diamond beads wear down and the change in beads pace has been experimentally tested. The experiments were performed on the limestone sample known as »Romanovac« with five variously formed diamond wires (Fig. 1).

It was found that the increase in the diamond concentration reduces the wear of diamond layer on the beads. This is logical because the higher concentration means the greater amount of cutting grains, what accordingly prolongs the duration of the beads. However, reduced wear of the diamond layer (at higher

concentration of diamonds) does not necessary mean reduced wear of diamonds, because at higher concentration there are more diamonds on the same wire length, and it is necessary to consider the economical side. The greater amount of diamonds on the same wire length means also that the wire is more costly so that the increase of diamond concentration should go only to a certain point. When considering the diamond concentration, the aim should not be the least wear of diamond layer, but the diamond layer which will be the least costly per square meter of the cut stone.

The Tables 1 and 3 show that sawing the limestone Romanovac with diamond wire of 9.62 kt/m concentration gives 26% longer life of the wire than when sawing with concentration of 8.14 kt/m, and even 55.3% longer life of the wire when sawing with concentration of 11.47 kt/m in relation to 8.14 kt/m. Although the price of wire with greater concentration is higher than with less concentration, still 206 ITL can be saved if the 9.62 kt/m concentration is used instead of 8.14 kt/m. This trend continues to the concentration of 11.47 kt/m where the cost reduce becomes slower considering 1 m<sup>2</sup> of sawing, after which it turns to the negative. This proves that the optimal concentration of diamonds per m' in sawing the limestone is from 11.1 to 12.95 kt/m. These concentrations correspond to the diamond wires with 30 to 35 beads per m' where one bead has the diamond concentration of 35% (1.54 kt/cm<sup>3</sup>) and granulation of 45/50 mesh.