

*obróbka powierzchni skał, piła linowa*

Wiesław FRANKIEWICZ, Krzysztof FUŁAWKA<sup>1</sup>

## **BADANIA PROCESU WYCINANIA PROFILOWANYCH ELEMENTÓW KAMIENNYCH DIAMENTOWĄ PIŁĄ LINOWĄ**

Opisano budowę piły z liną diamentową do przecinania bloków skalnych wycinania elementów profilowanych. Na podstawie wykonanych pomiarów w PPHiU Piramida Sp. z o.o. przeanalizowano wydajności cięcia powierzchni o zróżnicowanych kształtach z granitu strzegomskiego.

### **1. WSTĘP**

Technologia obróbki kamienia obejmuje szereg operacji obróbczych, jak: cięcie bloków na płyty surowe, przycinanie płyt w celu nadania im odpowiedniego wymiaru i kształtu oraz określonej faktury powierzchniom elementów kamiennych, np. przez groszkowanie, piaskowanie, szlifowanie, polerowanie, itp. (Głapa & Korzeniowski, 2005). Ponadto w procesie obróbczym stosowane są operacje pomocnicze, m.in.: wiercenie otworów, fazowanie, profilowanie i wykonywanie nietypowych fragmentów elementów kamiennych. Do wszystkich wymienionych operacji wykorzystywane są coraz nowocześniejsze maszyny obróbcze, charakteryzujące się zwiększoną wydajnością i dokładnością, także możliwością wykonania elementów o dowolnych kształtach. Wśród maszyn obróbczych wyróżnić można m.in. jedno lub wielolinowe piły diamentowe. Te najbardziej zaawansowane, oprócz cięcia z bloku skalnego płyt prostych, umożliwiają również wykonywanie kształtów profilowanych.

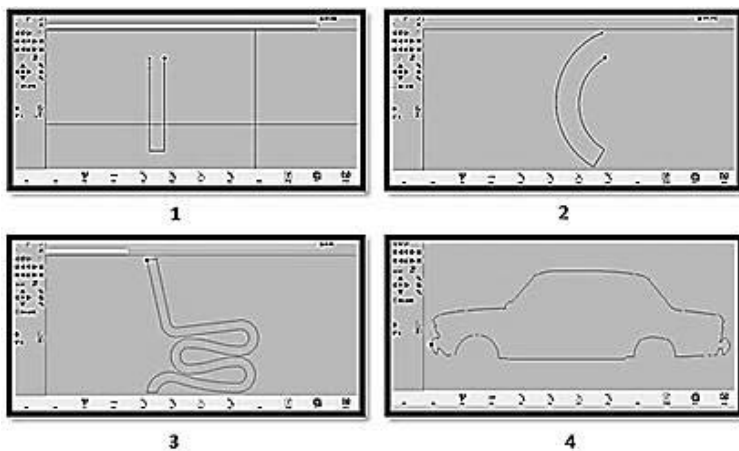
<sup>1</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii,  
wieslaw.frankiewicz@pwr.edu.pl, krzysztof.fulawka.wroc.@gmail.com

Jednym z najnowszych urządzeń do cięcia profilowanego jest piła jednolinowa diamentowa firmy Pellegrini model DF JOLLY, umożliwiająca wycinanie z dużą dokładnością elementów kamiennych o złożonych kształtach.

## 2. BADANIE PROCESU WYCINANIA ELEMENTÓW KAMIENNYCH

Na przebieg proces cięcia elementów kamiennych piłą z liną diamentową wpływa wiele czynników: właściwości fizykomechaniczne przecinanej skały, parametry i kształt wycinanych elementów, parametry pracy maszyny oraz wytrzymałość segmentów diamentowych liny. Celem badań było określenie wpływu kształtu wycinanych elementów kamiennych na efektywność procesu cięcia. Badania wykonano w zakładzie PPHiU Piramida Sp. z o.o. w Strzegomiu dla jednolinowej piły diamentowej do cięcia profilowanego firmy Pellegrini model DF JOLLY. Wszystkie badania prowadzone były podczas wycinania z granitu strzegomskiego ze złoża „Borów I-kamieniółom 49 A” elementów kamiennych (rys. 1):

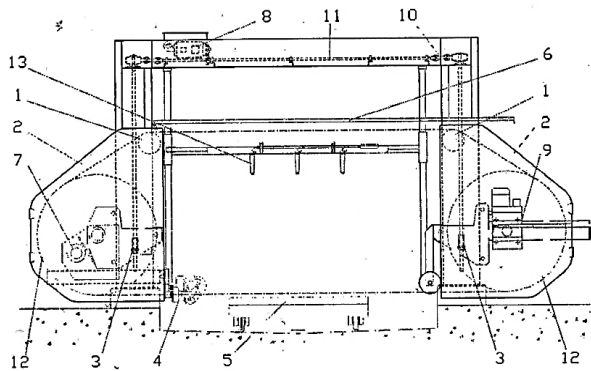
- płyt płaskich
- elementów profilowanych:
  - o niskim stopniu złożoności (płyta krawężnikowa),
  - złożonych (element ogrodowy),
  - o skomplikowanym kształcie (model fiata 125p w skali 1:1).



Rys. 1. Elementy o różnym stopniu złożoności wykorzystane do badań; 1 – płyty płaskie, 2 – elementy o niskim stopniu złożoności, 3 – element złożony, 4 – element o dużym stopniu skomplikowania

Fig 1. Elements of varying degrees of complexity used to analysis 1 – flat plates, 2 – profiled elements with a low degree of complexity, 3 – composite profiled element, 4 – profile element with a high degree of complexity

Na rysunku 2 i w tabeli 1 przedstawiono budowę oraz dane techniczne badanej piły.



Rys. 2. Schemat budowy piły (Instrukcja... 2013)

1 – koło prowadzące górne, 2 – osłona koła zamachowego, 3 – nakrętka pociągowa, 4 – przekładnia koła prowadzącego, 5 – wózek, 6 – górna osłona, 7 – silnik napędu liny, 8 – silnik napędowy góra-dół, 9 – napinacz, 10 – złączka, 11 – wałek napędowy, 12 – koło zamachowe

Fig. 2. Schematic diagram of the single-wire saw (Instrukcja... 2013)

1 – upper guide wheel, 2 – guard flywheel, 3 – pull-nut, 4 – wheel gear engagement, 5 – trolley, 6 – top cover, 7 – rope drive motor, 8 – drive motor up and down, 9 – tensor, 10 – fitting, 11 – drive shaft, 12 – flywheel

Tab. 1. Dane techniczne piły (Instrukcja... 2013)

Tab. 1. Specifications of the single-wire saw (Instrukcja... 2013)

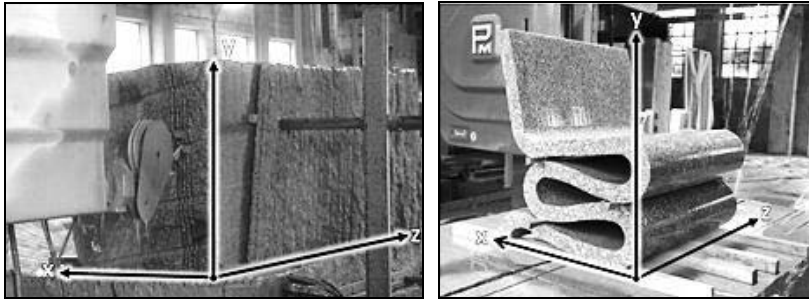
Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
maksymalne wymiary obrabianego bloku bloku	2,0×3,0	[m]
maksymalne wymiary bloku bez kół prowadzących	2,0×4,0	
wymiary piły; długość × szerokość × wysokość	9,8×5,7×3,5	
długość liny	19,9–21,4	
prędkość liny	0–40	[m/s]
całkowita zainstalowana moc	41	[kW]

## 2.1. ETAPY PROCESU

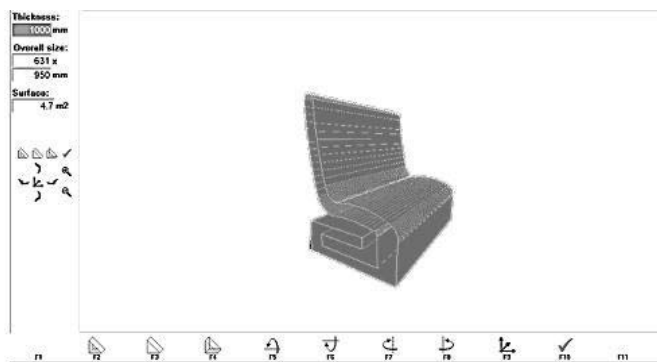
Na proces wycinania elementu kamiennego piłą z liną diamentową Pellegrini DF JOLLY składają się czynności: projektowania elementu, wprowadzenia projektu do panelu sterującego, wycinania elementu.

Projektowanie kształtu elementu, poprzedzające proces wycinania, odbywa się z wykorzystaniem programu RobotDraw 2d Pellegrini, kompatybilnym z panelem sterującym piły. W fazie projektowania następuje:

- zaprogramowanie kształtu elementu wraz z wymiarami w płaszczyźnie  $xy$  (rys. 3),
- określanie prędkości przemieszczania się liny w płaszczyźnie  $xy$ ,
- obliczenie przecinanej powierzchni,
- wizualizacja elementu (rys. 4).



Rys. 3. Wizualizacja kierunków opisujących wymiary bloku  
 Fig. 3. Visualization of directions describing the dimensions of the block



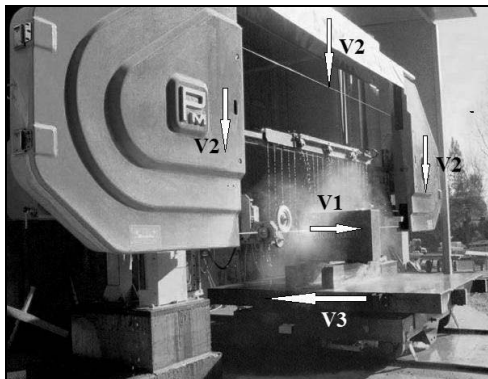
Rys. 4. Wizualizacja elementu w programie RobotDraw 2d  
 Fig. 4. Visualization of the proposed object in Robot Draw 2d

Projekt wycinanego elementu wprowadzany jest do panelu sterującego (rys. 5), umożliwiającego bieżącą kontrolę zużycia energii i wody, prędkości linii [m/s], postępu cięcia [cm/h] i jego wydajności [m<sup>2</sup>/h].



Rys. 5. Panel sterujący (fot. K. Fuławka)  
 Fig. 5. The control panel (fot. K. Fuławka)

Kolejno rozpoczyna się operacja cięcia według wprowadzonych do programu parametrów. Można tu wyróżnić: zacinanie (wstępne zagłębianie się liny w bloku), cięcie właściwe i końcowe. W trakcie cięcia istnieje możliwość korygowania jego przebiegu, np. przed zacięciem, ze względu na nierówną powierzchnię górną bloku wprowadza do panelu mniejszą, wstępną prędkość przemieszczania liny, w celu jej ochrony przed uszkodzeniem. Złożony kształt elementu kamiennego uzyskuje się w wyniku sterowania poziomego ruchu: liny tnącej w przecinanym bloku – V1, układu napędowego liny – V2, wózka z obrabianym elementem – V3 (rys. 6).



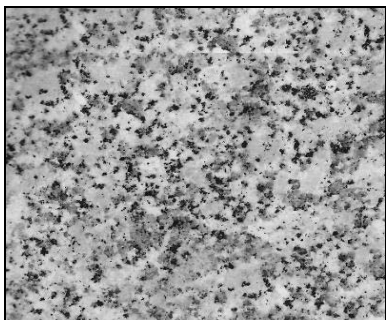
Rys. 6. Ruchy piły linowej w procesie wycinania elementu profilowanego  
 Fig. 6. Movements of the wire saw during processes of cutting shaped element  
 (www.directindustry.com/prod/pellegrini/stone-cutting-machines.html)

## 2.2. BADANA SKAŁA

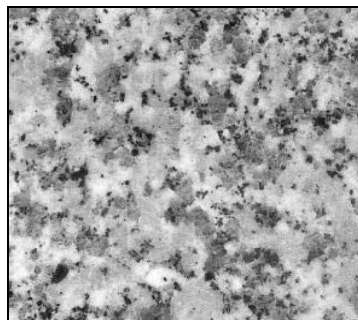
Elementem kamiennym w badaniach był granit strzegomski typu Kostrza, charakteryzujący się nieuporządkowaną porfirowatą z hipautomorficzną ziarnistą strukturą materiału podstawowego, barwy jasnej, z przeważającą ilością minerałów białych i białoszarych (skalenie i kwarc) w stosunku do minerałów ciemnych (biotyt); tabela 2, rysunki 7–8. Ziarna nieporfirowatych skaleń i kwarcu są z reguły większe od ziaren minerałów ciemnych i wynoszą 1 do 3 mm. Tekstura skały jest nieuporządkowana (Dokumentacja ... 1995, Kryza & Walendowski, 2005).

Tab. 2. Skład mineralny granitu (Dokumentacja... 1995)  
 Tab. 2. The mineral composition of granite

Minerał	Zawartość procentowa [%]
skalenie	58
kwarc	31
biotyt	7
amfibolit	2
minerały akcesoryczne	2



Rys. 7. Granit średnioziarnisty typu Kostrza  
Fig. 7. Kostrza – type medium grained granite



Rys. 8. Granit gruboziarnisty typu Kostrza  
Fig. 8. Kostrza – type coarse grained granite

(<http://kamienie-budowlane.pgi.gov.pl>)

### 3. WYKONANIE POMIARÓW

Celem badań była analiza wydajności cięcia, wychylania liny tnącej od pierwotnego położenia oraz trwałość liny w zależności od stopnia złożoności kształtu elementu.

#### 3.1. WYDAJNOŚĆ CIĘCIA

Wydajność cięcia jest funkcją parametrów procesu, tj. prędkości przemieszczania się liny tnącej, zgodnie z obrysem wycinanego elementu i jego szerokości. Prędkość przemieszczania liny zależy od etapu cięcia, tj. zacinania, cięcia właściwego i docinania oraz od złożoności kształtu obrabianego elementu profilowanego. Duża zmienność kształtu, a tym samym konieczność zmiany kierunku przemieszczania się liny sprawia, że w celu zmaksymalizowania dokładności wycinania należy zmieniać prędkość przemieszczania liny i tym samym wydajność cięcia dla poszczególnych odcinków, składających się na końcowy kształt elementu. W trakcie pomiarów, wydajność cięcia dla tych odcinków odczytywano z panelu sterującego z dokładnością do 0,1 m<sup>2</sup>/h. W tabeli 3 i 4 przedstawiono przykładowo zmienność wydajności cięcia dla płyty płaskiej i elementu profilowanego o dużym stopniu skomplikowania kształtu.

Dla każdego badanego elementu obliczono średnią wydajności cięcia  $\bar{w}$  [m<sup>2</sup>/h]:

$$\bar{w} = \frac{V_1 \cdot s \cdot l_1 + V_2 \cdot s \cdot l_2 + \dots + V_n \cdot s \cdot l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}$$

gdzie:

- $V_1$  – prędkość przemieszczania liny, [m/h],
- $l_1$  – długość przecinanego odcinka, [m],
- $s$  – szerokość elementu, [m].

Tab. 3. Wydajność wycinania płyty płaskiej (Fuławka, 2014)

Tab. 3. Flat plate cutting performance (Fuławka, 2014)

Prędkość przemieszczania się liny (w płaszczyźnie x,y), $V_i$	Długość cięcia przy danej prędkości, $l_i$	Sumaryczna długość cięcia $\Sigma l_i$	Szerokość elementu $s$ (oś z)	Wydajność cięcia $w_i = V_i \times s$
[m/h]	[mm]	[mm]	[m]	[m <sup>2</sup> /h]
0,5	50	50	1	
0,9	120	170		0,9
1	100	270		1
1	100	370		1
1	100	570		1
1	100	670		1
1	100	870		1
1	100	970		1
1	100	1070		1
0,9	100	1170		0,9
0,5	50	1220		0,5

Tab. 4. Wydajność wycinania elementu o dużym stopniu skomplikowania kształtu (Fuławka, 2014)

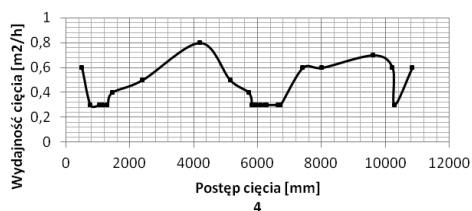
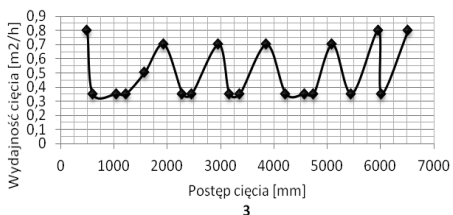
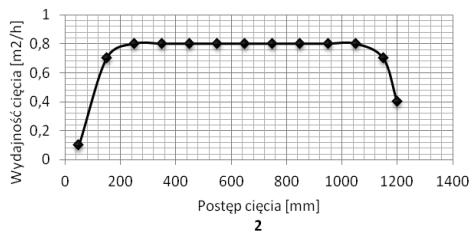
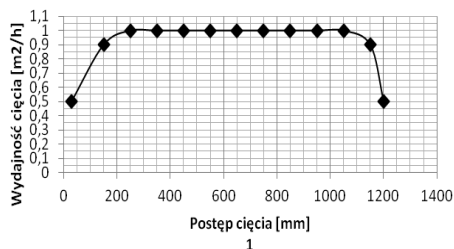
Tab. 4. High degree of complexity element cutting performance (Fuławka, 2014)

Prędkość przemieszczania się liny (w płaszczyźnie x,y), $V_i$	Długość cięcia przy danej prędkości, $l_i$	Sumaryczna długość cięcia $\Sigma l_i$	Szerokość elementu $s$ (oś z)	Wydajność cięcia $w_i = V_i \times s$
[m/h]	[mm]	[mm]	[m]	[m <sup>2</sup> /h]
0,30	500	500	2	0,6
0,15	260	760		0,3
0,15	280	1040		0,3
0,15	75	1115		0,3
0,15	145	1295		0,3
0,20	150	1445		0,4
0,25	945	2390		0,5
0,40	1800	4190		0,8
0,25	945	5135		0,5
0,20	580	5715		0,4
0,15	100	5815		0,3
0,15	75	5935		0,3
0,15	150	6235		0,3
0,15	50	6285		0,3
0,15	350	6635		0,3
0,15	75	6710		0,3
0,30	700	7410		0,6
0,30	600	8010		0,6
0,35	1600	9610		0,7
0,30	600	10210		0,6
0,15	60	10270		0,3
0,30	560	10830		0,6

W tabeli 5 przedstawiono średnie wydajności cięcia, a na rysunku 9 zmianę wydajności i postępu cięcia dla poszczególnych elementów.

Tab. 5. Średnia wydajność cięcia (Fuławka, 2014)  
Tab. 5. Average cutting performance (Fuławka, 2014)

Wycinany kształt	Średnia wydajność cięcia [m <sup>2</sup> /h]
1 prosty – płyta płaska	0,91
2 profilowany o małym stopniu złożoności płyta krawężnikowa	0,72
3 profilowany, złożony – element ogrodowy	0,55
4 profilowany o dużym stopniu skomplikowania (model fiata 125p w skali 1:1)	0,44



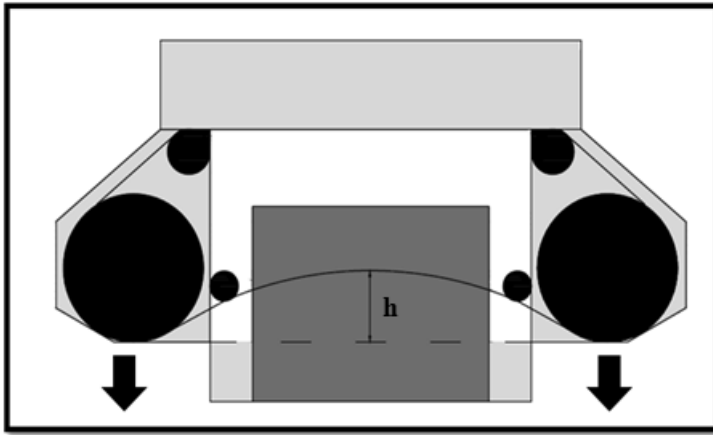
Rys. 9. Wpływ kształtu wycinanego elementu na wydajność i postęp cięcia; 1 – płyty proste, 2 – elementy o niskim stopniu złożoności, 3 – element złożony, 4 – element o dużym stopniu skomplikowania

Fig. 9. The influence of the shape of the cut pieces on the cutting performance and progress;  
1 – flat plates, 2 – profiled elements with a low degree of complexity, 3 – composite profiled element, 4 – profile element with a high degree of complexity

### 3.2. WYCHYLENIA LINY TNĄCEJ

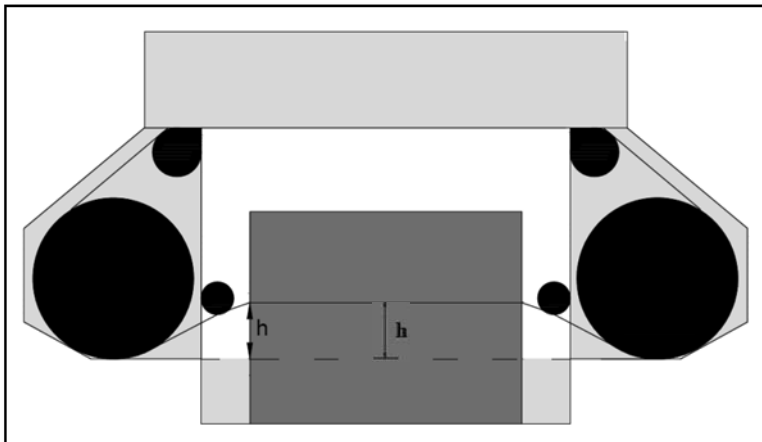
Podczas wycinania występuje zjawisko tzw. wychylania linii, będące konsekwencją nacisku linii na przecinany element kamienny i ruchu poziomego wózka. W uproszczeniu, oznacza to tworzenie przez linię diamentową przestrzennego łuku (rys. 10).





Rys. 10. Zjawisko „wychylenia liny” – wycinanie płyt prostych  
 Fig. 10. The effect of „swing of wire” – flat plate cutting

Wychylenie liny w przypadku cięcia płyt płaskich nie ma wpływu na jakość uzyskanej powierzchni cięcia. Natomiast przy wycinaniu elementów kamiennych o złożonym kształcie powodować może, uzyskanie niewłaściwego kształtu powierzchni. Stąd w tym przypadku wychylenie powinno mieć taką wartość, aby kształt części liny tnącej skałę był zbliżony do linii prostej (rys. 11).



Rys. 11. Zjawisko „wychylenia liny”; wycinanie elementu profilowanego  
 Fig. 11. The effect of „swing of wire” – profiled element cutting

Wielkość wychylenia zależy zarówno od twardości obrabianej skały jak i od prędkości przemieszczania się liny, a tym samym wydajności cięcia. W trakcie pomiaru, wartości wychylenia liny odczytywano z panelu sterowania z dokładnością do

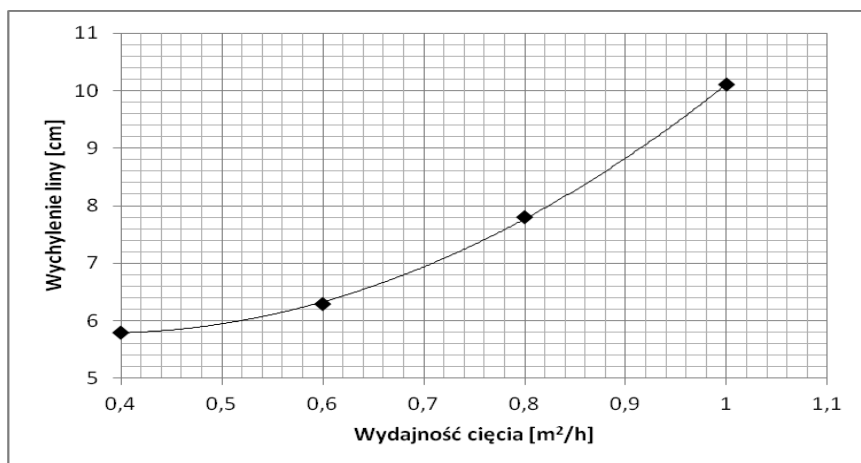
0,001 m. Pomiar wykonano podczas wycinania płyty prostej. Aby określić zmienność wychylenia w zależności od wydajności cięcia określano:

- wydajności w trakcie wycinania płyty prostej,
- wychylenie liny dla każdego cięcia (tab. 6, rys. 12).

Tab. 6. Wychylenie w zależności od wydajności cięcia

Tab. 6. Deflection of the wire depending on the cutting performance

Wydajność cięcia [m <sup>2</sup> /h]	Wychylenie liny [cm]
1,0	10,1
0,8	7,8
0,6	6,3
0,4	5,8



Rys. 12. Wychylenie liny w zależności od wydajności cięcia

Fig. 12. Deflection of the wire depending on the cutting performance

### 3.3. TRWAŁOŚĆ LINY

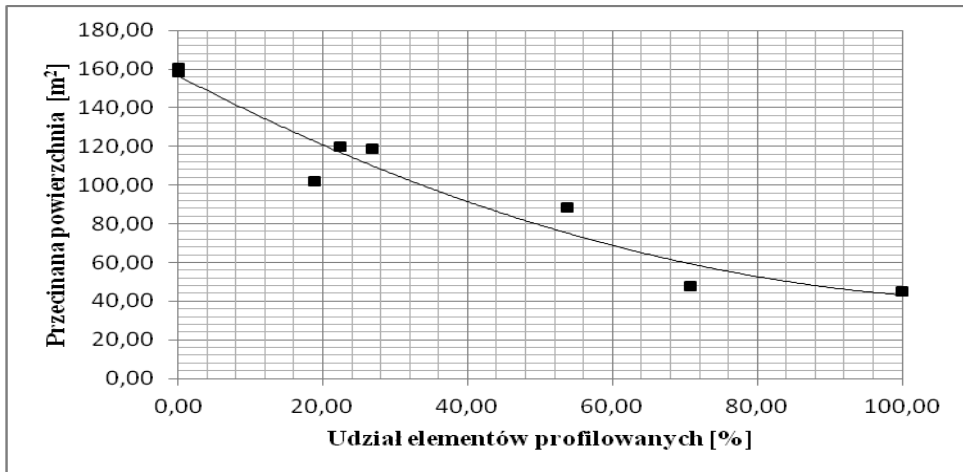
W procesie wycinania elementów kamiennych profilowanych na trwałość liny diamentowej wpływ mają nie tylko właściwości fizykomechaniczne skały i wielkość przecinanej powierzchni, ale także kształt elementu. W przeprowadzonych badaniach, jako kryterium trwałości przyjęto wielkość powierzchni przeciętych za pomocą tej samej liny do momentu pierwszego jej zerwania. Pomiary wykonano dla lin nowych, nieregenerowanych. Dokładność pomiarów powierzchni wynosiła 0,01 m<sup>2</sup>.

Uwzględniano przy tym wpływ kształtu przecinanych elementów (prostych i profilowanych) na wynik cięcia, biorąc pod uwagę ich procentowy udział w liczbie wszystkich elementów wycinanych przez daną linę. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 7 i rysunek 13.

Tab. 7. Wielkość powierzchni przy zmiennym udziale elementów profilowanych i płyt prostych (Fuławka, 2014)

Tab. 7. The number of square meters of the surface with variable interest profile elements and simple plates

Lp. pomiaru	Udział elementów prostych (płyty) [%]	Udział elementów profilowanych [%]	Przecięta powierzchnia [m <sup>2</sup> ]
1	0,00	100,00	45,00
2	29,20	70,80	47,84
3	46,29	53,71	88,57
4	73,24	26,76	118,54
5	77,53	22,47	119,92
6	81,12	18,88	102,10
7	100,00	0,00	158,21
8	100,00	0,00	160,41



Rys. 13. Zależność powierzchni przeciętych jedną liną do jej zerwania od procentowego udziału elementów profilowanych

Fig. 13. The dependence of the cut surface of a rope to it breaking on the percentage of profile elements

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Nowoczesne piły z liną diamentową i komputerowym wspomaganie cięcia, w tym piłą DF JOLLY, dają możliwość wycinania z bloku skalnego, elementów o dowolnym kształcie, od elementów płaskich do bardzo złożonych profilowanych. W przypadku wycinania elementu prostego zakres zmienności parametrów procesu cięcia jest niewielki; nie występuje wówczas potrzeba zmiany kierunku przemieszczania się liny w obrębie bloku. Podczas wycinania elementu profilowanego o złożonym kształcie występuje konieczność zmian kierunku i prędkości przemieszczania się liny, istotnie wpływających na wydajności cięcia, wychylenie i jej trwałość.

Na podstawie badań uzyskano informacje dotyczące wartości i zmienności parametrów procesu wycinania elementów prostych i profilowanych z granitu strzegomskiego piłą jednoczynową DF JOLLY:

- średnia wydajność cięcia elementu kamiennego wynosi od 0,44 m<sup>2</sup>/h dla elementu profilowanego złożonego o skomplikowanym kształcie do 0,91 m<sup>2</sup>/h dla elementu prostego, tj. stosunek średniej wydajności cięcia elementu prostego w stosunku do wydajności cięcia elementu profilowanego wynosi od 1,6–2,
- prędkość przemieszczania liny wynosi dla elementu prostego 0,5–1 m/h, a dla elementu złożonego o skomplikowanym kształcie 0,15–0,4 m/h.
- ze wzrostem wydajności zwiększa się wielkość „wychylenia liny”, co ma wpływ na dokładność cięcia i uzyskiwany kształt powierzchni,
- trwałość liny diamentowej oceniana wielkością przeciętej powierzchni, jest czterokrotnie większa w przypadku wycinania płyt prostych stosunku do profili złożonych.

#### LITERATURA

- FUŁAWKA K., 2014, *Analiza procesu wycinania elementów kamiennych za pomocą piły linowej diamentowej do cięcia profilowanego firmy Pellegrini model DF JOLLY w zakładzie PPHiU Piramida Sp. z o.o. w Strzegomiu*, Praca dyplomowa Wydział Geoinżynierii Górniczej i Geologii PW.
- GLAPA W., KORZENIOWSKI J.I., 2005, *Mały leksykon górnictwa odkrywczego*, WiSG, Wrocław.
- Instrukcja obsługi piły Pellegrini model DF JOLLY*, 2013.
- KRYZA R., WALENDOWSKI H., 2007, *Bardzo dobre polskie granity*, Nowy Kamieniarz, nr 26, 40–42.
- Dokumentacja geologiczna w kat. C<sub>1</sub> z jakością w kat. B złoża granitu „Borów I-kamieniołom 49 A”*, 1995, dokumentator U. Majkowska.
- WALENDOWSKI H., 2012, *Granity strzegomskie*, Nowy Kamieniarz, nr 58, 56–57.
- [www.kamienie-budowlane.pgi.gov.pl](http://www.kamienie-budowlane.pgi.gov.pl)
- [www.piramida-strzegom.pl](http://www.piramida-strzegom.pl)

#### STUDY OF CUTTING ELEMENTS SHAPED STONE USING A DIAMOND WIRE SAW

Describes the construction of diamond wire saws to cut blocks of rock. On the basis of measurements in PPHiU Piramida Sp.z o.o. analyzed surface cutting performance of different shapes of granite Strzegom.