

Bożena CIAŁKOWSKA<sup>1</sup>  
Szymon DRECHNY<sup>2</sup>  
Zbigniew RODZIEWICZ<sup>3</sup>

## JAKOŚĆ WYCINANYCH KSZTAŁTÓW STRUNĄ ZBROJONĄ W MATERIAŁACH TRUDNOOBRABIALNYCH

W procesie cięcia kształtowego struną zbrojoną występują różne problemy z zapewnieniem odpowiedniej jakości wycinanych kształtów w materiałach trudnoobrabialnych. Pokazano to na przykładzie ceramiki technicznej. Przedstawiono również analizę możliwych przyczyn rozbieżności w ich odwzorowaniu. Wskazano sposoby możliwej redukcji wspomnianych rozbieżności oraz możliwość poprawy jakości wycinanych kształtów na przecinarnie strunowej PS2Tsk.

**Słowa kluczowe:** cięcie kształtowe, struna zbrojona, materiały trudnoobrabialne, przecinarki strunowe

### 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój metody przecinania struną zbrojoną trwale, jak i zbrojoną luźnym ścierniwem w czasie cięcia. Dotyczy to głównie przecinania wielostrunowego w różnych układach kinematycznych cięcia płytek krzemowych, stosowanych na fotoogniwa, w przemyśle woltaicznym [1]. Obecnie wiele firm na świecie specjalizuje się w przecinaniu strunowym przy równoległym doskonaleniu narzędzi strunowych o różnej budowie. Istotnym obszarem zastosowań narzędzia strunowego jest możliwość wycinania określonych kształtów w różnych układach jego prowadzenia: ręcznego według szablonu lub sterowanego komputerowo. Problematyka tego zagadnienia jest związana i określona przez specyfikę samego narzędzia strunowego. Istnieje wiele odmian narzędzi strunowych, ze względu na ich budowę (struna zbrojona trwale, zbrojona luźnym ścierniwem, w postaci pętli oraz z dwoma końcami). W przypadku wycinania kształtowego najczęściej stosuje się strunę w postaci

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Bożena Ciałkowska, Politechnika Wrocławska, e-mail: bozena.cialkowska@pwr.edu.pl

<sup>2</sup> Szymon Drechny, Politechnika Wrocławska, e-mail: szymon.drechny@pwr.edu.pl

<sup>3</sup> Zbigniew Rodziewicz, Politechnika Wrocławska, e-mail: zbigniew.rodziewicz @pwr.edu.pl

pętli bez końca. Sterując odpowiednio struną, można wykonywać skomplikowane kształty w jednym przejściu narzędzia.

W porównaniu z innymi metodami ściernymi, takimi jak: cięcie taśmą, tarczą diamentową itp., przewagą narzędzia strunowego oprócz cięcia prostoliniowego jest możliwość precyzyjnego wycinania kształtowego w różnych materiałach, często o złożonej budowie i konstrukcji. Istotną zaletą jest możliwość wycinania konturów charakteryzujących się krzywiznami o ostrych kątach, z dobrym efektem jakości powierzchni. Należy tutaj zaznaczyć, że dotyczy to głównie materiałów trudnoobrabialnych niemetalowych, takich jak: ceramika techniczna, cermetale, płyty grafitowe, kompozyty, również przekładkowe typu „honey comb”, kompozyty szklane, tworzywa sztuczne itp. [2, 3].

## 2. Cięcie strunowe

Na jakość i efekty cięcia strunowego znaczący wpływ mają następujące czynniki:

- małe siły skrawania (kilka N),
- „zimne cięcie”, tzn. niskie temperatury w strefie cięcia, zbliżone do temperatury otoczenia,
- duża precyzja wymiaru i kształtu,
- samooczyszczenie się narzędzia w czasie cięcia,
- uzyskana chropowatość jak po szlifowaniu,
- bardzo małe odkształcenia w strefie warstwy wierzchniej,
- minimalne straty materiału w przypadku trwałego nasypu zbrojenia struny (równe wielkości ziarna diamentowego wraz ze średnicą drutu),
- jednolite warunki skrawania,
- niska energochłonność procesu przecinania.

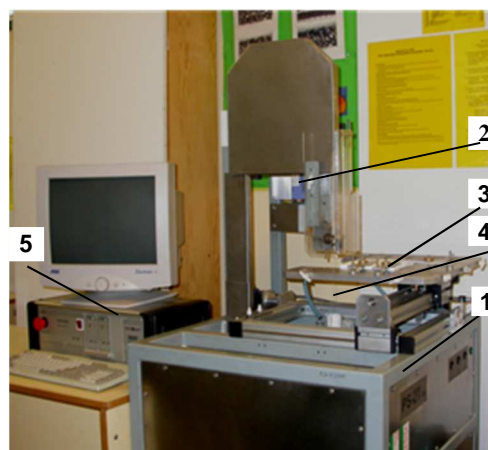
Przecinanie narzędziem strunowym znalazło szerokie zastosowanie nie tylko w warunkach laboratoryjnych (dzięki wymienionym wyżej cechom metoda świetnie nadaje się do wykonywania m.in. zgładów), ale również przemysłowych. Wymienione wyżej zalety pozwalają na obróbkę drogich materiałów, praktycznie z minimalnymi stratami w stosunku do konwencjonalnych metod. Można wykonywać złożone kształty niskim nakładem pracy, z wymaganą jakością, bez potrzeby stosowania obróbki wykończeniowej przy dość dużej wydajności cięcia. Istnieje możliwość regeneracji strun bezkońcowych (w postaci pętli) przez jej zgrzewanie w przypadku zerwania. Wysoka jakość uzyskanej powierzchni po wycinaniu oraz dokładność wymiaru i kształtu, która jest obecnie wymagana przy wytwarzaniu nowych produktów, przyczynia się do coraz większego rozwoju i zastosowania omawianej metody do cięcia, często na gotowo.

Z wymienionych powodów w wycinaniu kształtowym stosuje się narzędzia strunowe zbrojone trwale nasypem diamentowym, w postaci pętli bez końca. Istnieją dwa sposoby prowadzenia struny w materiale. Można prowadzić ją ręcznie,

czyli wycinać kształt, przesuując materiał według szablonu lub sterować komputerowo stołem roboczym w układzie X-Y. Drugi sposób jest oczywiście bardziej dokładny, daje lepsze efekty, a dodatkowym atutem jest fakt, że wycinany kontur można łatwo zaprogramować w systemach CAD. Wycinanie kształtowe struną bezkońcową zbrojoną trwale posiada następujące zalety [4]:

- możliwość uzyskiwania skomplikowanych kształtów w jednym przejściu narzędzia,
- możliwość przecinania materiału w dowolnych kierunkach dzięki równemu rozmieszczeniu ścierniwa dookoła powierzchni rdzenia narzędzia strunowego,
- znikome straty materiału dzięki małej średnicy narzędzia, które tworzy bardzo wąską szczelinę cięcia (poniżej 1 mm),
- samooczyszczenie się struny, pozwalające na pracę cięcia w materiałach o różnych właściwościach (twarde, kruche, elastyczne itd.),
- niską energochłonność procesu oraz małe siły skrawania, zapewniające niewielkie nagrzewanie się w strefie obróbki, jak również łatwość mocowania przecinanego materiału,
- przy odpowiednim doborze parametrów i właściwym prowadzeniu struny możliwość precyzyjnego wycinania kształtu z wysoką jakością powierzchni.

Pewną niedogodnością jest konieczność właściwego wprowadzania struny w materiał w punkcie startowym.



Rys. 1. Widok ogólny przecinarki strunowej PS2Tsk: 1 – przecinarka PS2Tsk, 2 – falownik, 3 – stół X-Y, 4 – struna, 5 – sterownik stołu X-Y

Fig. 1. View of wire saw PS2Tsk: 1 – wire saw PS2Tsk, 2 – inverter, 3 – X-Y table, 4 – wire, 5 – X-Y table driver

Do cięcia kształtowego materiałów trudnoobrabialnych niemetalowych opracowano i wykonano na Politechnice Wrocławskiej specjalną przecinarkę PS2Tsk sterowaną komputerowo (rys. 1) [2, 3]. Podstawowe elementy składowe charakteryzujące tę przecinarkę to: oryginalny układ prowadzenia narzędzia strunowego, zamknięty obieg chłodziwa, płynna regulacja prędkości cięcia, odprowadzenie produktów ubocznych i odsysanie pyłów po cięciu. Zaadaptowany stół

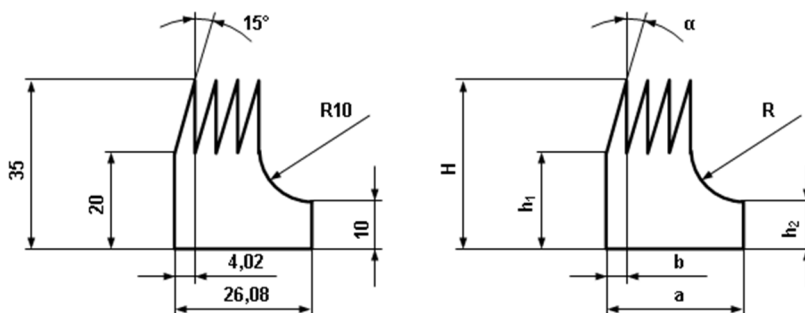
krzyżowy X-Y z dwoma komputerowo sterowanymi osiami umożliwia dokładne wycinanie elementów kształtowych z materiałów trudnoobrabialnych.

### 3. Eksperyment

Warunki przeprowadzonego eksperymentu były następujące:

1. Czynniki stałe
  - maszyna badawcza: przecinarka strunowa PS2Tsk,
  - materiał przecinany: ceramika krzemianowa o grubości 6 mm,
  - narzędzie strunowe w postaci pętli bez końca (struna firmy HK SD-0,9-2500-G10-3D126),
  - prędkość cięcia  $V_c = 8$  m/s,
  - prędkość posuwu  $V_f = 20$  mm/min.
2. Czynniki zmienne
  - wycinany po konturze kształt: GRZEBIEŃ 1,
  - ten sam kształt GRZEBIEŃ 1, wycinany z dodatkowymi „wyjściami” struny w celu poprawy jakości wycinanego kształtu, określony jako GRZEBIEŃ 2.
3. Parametry mierzone
  - dokładność wymiarowa [mm],
  - dokładność kształtowa [mm].

Aby ocenić jakość wycinanych kształtów, zaprojektowano taki kształt, który posiada trudne do wykonania kąty ostre. Zaproponowany kontur o wymiarach 26,08x35 mm posiada: 4 ostre wierzchołki o kącie rozwarcia  $15^\circ$ , 1 promień R10, 3 kąty proste, 1 kąt rozwarty (rys. 2).



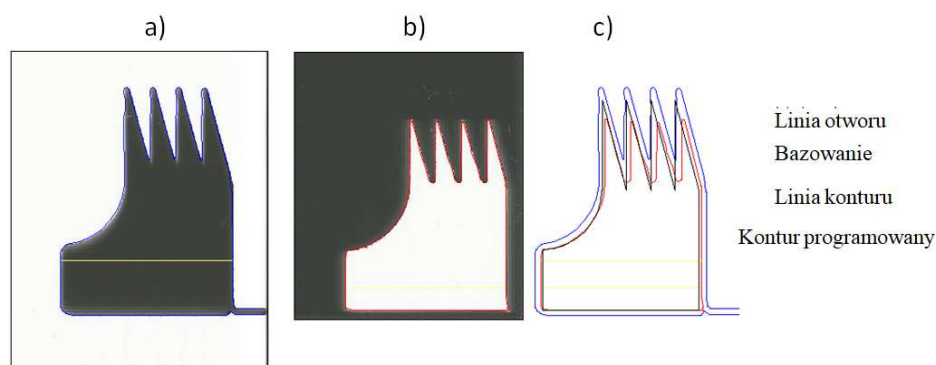
Rys. 2. Główne wymiary zaprojektowanego konturu GRZEBIEŃ

Fig. 2. Main dimensions of the designed GRZEBIEŃ contour

### 4. Analiza uzyskanych wyników

Analizę wyników wycinania rozpoczęto od wykonania wysokiej rozdzielczości skanów pierwszego konturu, określonego jako GRZEBIEŃ 1. Po wyskalowaniu oraz obrysowaniu wyciętych krawędzi w programie AutoCad2016 wy-

konano pierwsze pomiary. Nałożono na siebie uzyskane kontury, co dało efekt zamieszczony na rys. 3. Sprawdzono dokładność wymiarową. Uzyskane wyniki dla wybranych parametrów przecinania przedstawiono w tab. 1. Największy błąd wymiaru wyniósł 14,7%. Uzyskano go podczas kształtowania zaokrąglenia. Otrzymano dobre odwzorowanie zadanego kąta rozwarcia wierzchołków zębów ( $15^\circ$ ), co oznacza, że błąd wymiaru kąтового nie przekroczył 5%. Odnośnie do wymiarów gabarytowych, wymiar podstawy  $a$  został odwzorowany z małym błędem, natomiast wymiar wysokościowy  $H$  został obarczony dużą odchyłką, wynoszącą 8,4%. Jest to spowodowane zjawiskiem ścinania wierzchołków konturu. Układ sterowania stołem roboczym nie został wyposażony w system



Rys. 3. Analiza kształtu GRZEBIEN 1: a) otwór, b) wycięty kształt, c) nałożone na siebie kontury  
Fig. 3. Analysis of the shape of the GRZEBIEN 1: a) hole, b) cut out shape, c) overlapping contours

Tabela 1. Wyniki pomiarów głównych wymiarów kształtu GRZEBIEN 1

Table 1. Results of measurements of the main dimensions of the GRZEBIEN 1 shape

Wymiar	Wymiar projektowany	Wymiar zmierzony	Wielkość błędu [%]
$a$ [mm]	26,08	26,91	3,2
$H$ [mm]	35	32,06	8,4
$h1$ [mm]	20	21,03	5,2
$h2$ [mm]	10	9,98	0,2
$\alpha1$ [stopnie]	15	15,23	1,5
$\alpha1$ [stopnie]		15,48	3,2
$\alpha1$ [stopnie]		15,65	4,3
$\alpha1$ [stopnie]		15,07	0,5
$R$ [mm]	10	11,47	14,7
$b1$ [mm]	4,02	3,76	6,5
$b2$ [mm]		4,36	8,5
$b3$ [mm]		4,29	6,7
$b4$ [mm]		3,69	8,2

kompensacji grubości narzędzia, co powoduje wejście struny w obszar wewnętrzny konturu obrabianego. Przy tak małych wartościach kątów ostrych zjawisko to jest szczególnie widoczne. Dodatkowo potęguje je uginanie narzędzia strunowego w czasie pracy, które nie jest kompensowane żadnym wspomagającym układem sterowania, tylko rolkami dokładnego prowadzenia. Kolejnym aspektem jest dokładność kształtowa. Zaobserwowano znaczne przesunięcie kolejnych wycinanych zębów od konturu zaprogramowanego. Tabela 2 zawiera wartości liczbowe wspomnianego przesunięcia.

Tabela 2. Wartości przesunięć kolejnych zębów kształtu GRZEBIEŃ 1

Table 2. Values of displacements of following teeth of the GRZEBIEŃ 1 shape

Nr zęba	Przesunięcie $u$ [mm]	Przyrost $r$ [mm]	Średni przyrost $r_{sr}$ [mm]
1	0,41	nd	0,28
2	0,64	0,23	
3	0,99	0,35	
4	1,25	0,26	

Jak wynika z uzyskanych wartości, przesunięcie jest w miarę stałe, a jego uśredniona wartość wynosi 0,28 mm. Oznacza to, że każdy kolejno wycinany wierzchołek był przesunięty od poprzedniego o średnio 0,28 mm więcej. Charakterystyczny jest też wypust w materiale w miejscu wychodzenia narzędzia z konturu. Został on spowodowany zmniejszonymi siłami oddziałującymi na narzędzie, dlatego ślizga się ono po powierzchni konturu zamiast zagłębić się w niego. Z taką dokładnością, na jaką pozwalały warunki, zmierzono również szerokość rowka powstałego podczas wycinania. Pomiaru dokonano w 6 miejscach i uśredniono wynik (tab. 3). Potwierdza to informacje o używanej strunie ścierniej. Średnia szerokość rowka wyniosła 0,97 mm, a grubość narzędzia oferowana przez producenta 1 mm. Wskazuje to na powolne zużywanie się struny. Można było również zauważyć bardzo małe straty materiału, w przybliżeniu równe wartości grubości narzędzia.

Tabela 3. Wartości szerokości rowka powstałego podczas wycinania kształtu GRZEBIEŃ 1

Table 3. Values of groove widths formed during the cutting of the GRZEBIEŃ 1 shape

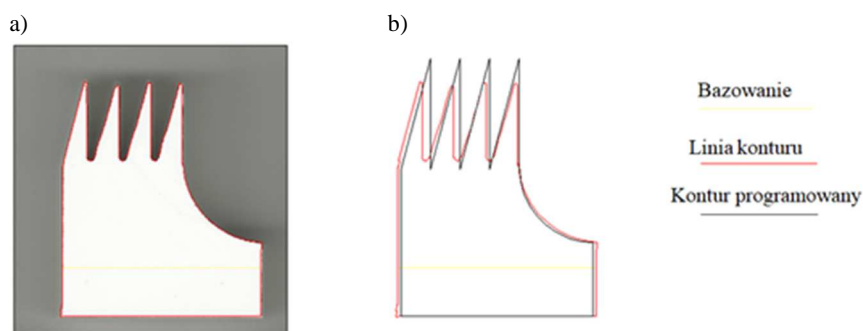
Lp.	Szerokość rowka [mm]	Średnia szerokość rowka [mm]
1	0,89	0,97
2	0,95	
3	1,14	
4	0,95	
5	1,03	
6	0,84	

W ramach drugiego etapu eksperymentu wykonano wycinanie takiego samego kształtu, ale z użyciem dodatkowych wyjść struny poza wycinany kontur, w celu uzyskania poprawy odwzorowania ostrych oraz prostych kątów. Wyniki pomiarów geometrycznych kształtu wykonanego w drugim cięciu zamieszczono w tab. 4. Na rysunku 4 przedstawiono nałożony kontur GRZEBIEŃ 2 wykonany w drugim cięciu na programowaną linię cięcia. W drugiej części porównano oba uzyskane kształty (tab. 4).

Tabela 4. Wyniki pomiarów głównych wymiarów kształtu GRZEBIEŃ 2

Table 4. Results of measurements of the main dimensions of the GRZEBIEŃ 2 shape

Wymiar	Wymiar projektowany	Wymiar zmierzony	Wielkość błędu [%]
$a$ [mm]	26,08	26,9	3,1
$H$ [mm]	35	31,99	8,6
$h1$ [mm]	20	20,71	3,5
$h2$ [mm]	10	9,95	0,5
$\alpha1$ [stopnie]	15	15,84	5,6
$\alpha1$ [stopnie]		16,01	6,7
$\alpha1$ [stopnie]		16,03	6,9
$\alpha1$ [stopnie]		14,87	0,9
$R$ [mm]	10	11,23	12,3
$b1$ [mm]	4,02	3,64	9,5
$b2$ [mm]		4,33	7,7
$b3$ [mm]		4,39	9,2
$b4$ [mm]		3,87	3,7



Rys. 4. Analiza kształtu GRZEBIEŃ 2: a) wycięty kształt, b) nałożone na siebie kontury

Fig. 4. Analysis of the GRZEBIEŃ 2 shape: a) cut out shape, b) overlapping contours

Przy drugiej próbce zmniejszył się błąd zaokrąglenia do wartości 12,3%. Błędy w uzyskaniu wymiarów gabarytowych pozostały na podobnym poziomie, wynosząc dla wymiaru podstawy 3,1%, a dla wymiaru wysokościowego 8,6%. Niestety, znacznie pogorszyły się wymiary kątowe. Największą odchyłkę zauwa-

żono podczas kształtowania 3 zęba. Wyniosła ona aż 6,9%. Dodatkowe wyjścia z materiału narzędzia strunowego spowodowały problemy w ponownym jego wejściu przy tak małych kątach rozwarcia wierzchołków, co pokazuje rys. 5.



Rys. 5. Widok dodatkowych wyjść struny z materiału podczas kształtowania GRZEBIEŃ 2

Fig. 5. View of additional exits of wire from material during cutting GRZEBIEŃ 2 shape

Zamiast zakładanej poprawy zauważono, że struna jeszcze bardziej zeszlifowała ostre wierzchołki niż przy wycinaniu kształtu GRZEBIEŃ 1. Ugięcie struny spowodowało, że narzędzie ślizgało się po pierwszym ukształtowanym ramieniu wierzchołka. Okazało się, że przy tak małych wartościach kształtowanych kątów nieopłacalne jest stosowanie dodatkowych przejść narzędzia. Pomogły one natomiast przy wykonywaniu prostopadłych przejść. Obrazuje to dobrze rys. 5. Ponownie zaobserwowano przesunięcie kolejnych zębów (tab. 5).

Tabela 5. Wartości przesunięć kolejnych zębów kształtu GRZEBIEŃ 2

Table 5. Values of displacements of following teeth of the GRZEBIEŃ 2 shape

Nr zęba	Przesunięcie $u$ [mm]	Przyrost $r$ [mm]	Średni przyrost $r_{sr}$ [mm]
1	0,26	nd	0,30
2	0,52	0,26	
3	0,85	0,33	
4	1,15	0,3	

Średni przyrost przesunięcia w stosunku do kształtu GRZEBIEŃ 1 nieznacznie się zwiększył. Mogło to zostać spowodowane zwiększającym się ugięciem struny bądź pogłębiającym się zużyciem rolek dokładnego prowadzenia.

## 5. Podsumowanie

W urządzeniach, w których nie występują zaawansowane systemy kontroli ugięcia struny wraz z jego kompensacją, podstawową trudnością jest dokładne zachowanie wymiaru i kształtu. Cięcie narzędziami strunowymi dobrze odwzoruje ostre kąty wycinanych kształtów. Udowodniono to eksperymentem, wy-



cinając kształty GRZEBIEŃ 1, GRZEBIEŃ 2. Pierwszy kształt był zaprogramowany bez dodatkowych wyjść struny z materiału, drugi wraz z nimi. Oba uzyskane produkty odznaczały się podobnymi niedokładnościami wymiarowymi. W czasie eksperymentów podważono racjonalność stosowania dodatkowych wyjść przy niskich wartościach ( $15^\circ$ ) kątów rozwarcia wycinanych wierzchołków.

### Literatura

- [1] Bidiville A., Wasmer K., Kraft R., Ballif C.: Diamond wire-sawn silicon wafers – from the lab to the cell production, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg 2009.
- [2] Ciałkowska B., Bienia F., Stolarczyk S., Szymkowski J.: Wycinanie kształtowe w materiałach trudnoobrabialnych wspomagane komputerowo, Materiały XXVIII NSOŚ pod red. Lucjana Dąbrowskiego, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005.
- [3] Ciałkowska B., Rodziejewicz Z.: Możliwości wycinania kształtowego narzędziem strunowym w materiałach trudnoobrabialnych, Mechanik, 87 (2014) 102-105.
- [4] Drechny S.: Jakość wycinanego kształtu w ceramice technicznej struną zbrojoną, Praca inżynierska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2017.

### THE QUALITY OF SHAPES CUT IN HARD MACHINABLE MATERIALS USING ABRASIVE CUTTING WIRE

#### Summary

The process of shaped cut using abrasive cutting wire results in problems with providing an adequate quality of cut shapes in hard machinable materials, as it was shown on the example of technical ceramics. The results of an analysis of the possible causes of divergence in their reproduction were also presented. The ways of possible reduction of the mentioned discrepancies and possible improvement of the quality of cut shapes on the PS2Tsk wire saw were indicated.

**Keywords:** shaped cut, abrasive wire, hard machinable materials, wire saw

DOI: 10.7862/rm.2017.27

*Otrzymano/received: 12.07.2017*

*Zaakceptowano/accepted: 27.09.2017*

