

# Possibilities and non-standard applications of abrasive wires coated with diamonds

## Możliwości i niestandardowe zastosowania strun zbrojonych trwale ziarnem diamentowym

MAGDALENA WIŚNIEWSKA  
MONIKA DUDA\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.81>

Nowadays diamond abrasive wire cutting has become a technology associated mainly with electronics and photovoltaics. This method allows obtaining silicon substrate plates (wafers) on a mass and global scale. However, isn't the potential of the diamond wires much greater? The article presents the possibilities of using armed strings in areas where such tools have not been attempted to be implemented or investigated.

**KEYWORDS:** wire cutting, fixed abrasive diamond wires, diamond tools, hard-machinable materials

Przecinanie strunowe stało się w dzisiejszych czasach technologią kojarzoną głównie z elektroniką i fotowoltaiką. To właśnie ta metoda pozwala na uzyskiwanie krzemowych płytek podłożowych na skalę masową i światową. Czy jednak potencjał struny diamentowej nie jest znacznie większy? Artykuł prezentuje możliwości zastosowania strun zbrojonych w obszarach, gdzie tego typu narzędzi nie próbowano wdrożyć, ani nie badano takiej ewentualności.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przecinanie strunowe, struny zbrojone trwale, narzędzia diamentowe, materiały trudnoobrabialne

Na przestrzeni ostatnich 20 lat przecinanie strunowe stało się wiodącą metodą uzyskiwania podłoży krzemowych [1]. Należy wspomnieć o dwukierunkowości tej metody, co jest związane z mechanizmem zbrojenia strun. Rozróżnia się przecinanie strunowe w zawieszynie ścierniej oraz z wykorzystaniem strun zbrojonych trwale. To drugie rozwiązanie cieszy się ostatnio zainteresowaniem ze względu na dużą wydajność (i tym samym krótszy czas cięcia) oraz możliwość redukcji nieekologicznej zawieszyny ścierniej [2].

Struna uzbrojona trwale w ziarno diamentowe, osadzone w osnowie niklowej, jest narzędziem umożliwiającym dwu-, a nawet trzykrotne zwiększenie produktywności w stosunku do przecinania w zawieszynie ścierniej. Charakteryzuje się odpornością na ścieranie i możliwością stosowania do szerokiego spektrum materiałów i w obecności chłodziwa na bazie wody. Jest to więc narzędzie o olbrzymim potencjale.

### Możliwości zastosowania strun diamentowych

W literaturze oraz informacjach udostępnianych przez firmy z branży przecinania strunowego można odnaleźć tylko nieliczne zastosowania strun diamentowych (inne niż związane z produkcją płytek podłożowych).

Szerokie możliwości zastosowania narzędzi strunowych zbrojonych trwale (rys. 1) widać na przykładzie oferty firmy Ensoll, specjalizującej się w dopasowywaniu technologii przecinania do potrzeb klientów indywidualnych [3]. Na filmach firma prezentuje wykorzystanie strun diamentowych m.in. do: przecinania kryształów KDP, cięcia szkła

oraz drewna, przecinania cementu piankowego i wełny mineralnej, rozdzielania kamieni szlachetnych oraz blokowego papieru falistego. Firma wykorzystuje struny zbrojone trwale ziarnem diamentowym – najczęściej są to struny w postaci pętli. Chropowatość powierzchni po przecięciu, uzyskana dla monokryształu KDP, jest mniejsza niż 1,6 μm [3].

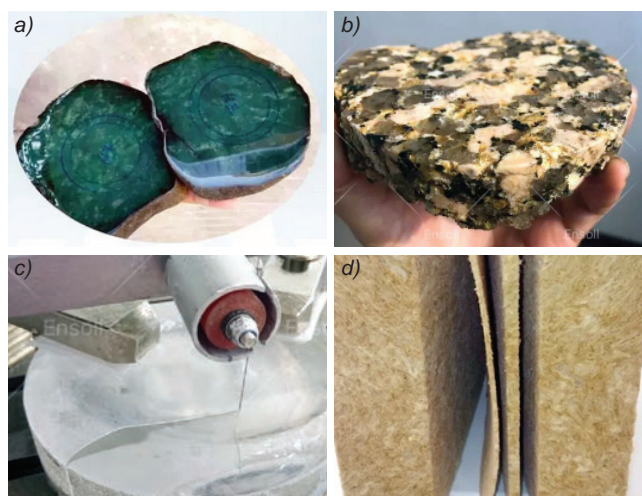


Fig. 1. Examples of cutting with using fixed abrasive diamond wire: a–b) natural stones, c) glass, d) mineral wool

Rys. 1. Przykłady przecinania struną zbrojoną trwale: a–b) kamieni naturalnych, c) szkła, d) wełny mineralnej [3]

Wśród zalet przecinania strunami zbrojonymi trwale firma Ensoll wymienia: szybkość cięcia (nawet do 60 m/s), dobrą jakość powierzchni i krawędzi ciętego elementu, możliwość cięcia bardzo cienkich detali i płaskorównoległość powierzchni [3].

Na rynku europejskim interesującymi zastosowaniami przecinania strunowego może się pochwalić firma Dramet [4], która w ten sposób kształtuje materiały strukturalne oraz wycina skomplikowane kontury (co jest wręcz niszowym zastosowaniem). Struny są jedynymi narzędziami ściernymi, które można ciąć kształtowo, jednak ta właściwość niemal nigdzie nie znajduje zastosowania. Wśród materiałów ciętych przez niemiecką firmę znajdują się materiały piankowe i strukturalne (rys. 2a), kompozyty, ceramika czy węgliki. Firma wykorzystuje wycinanie kształtowe do produkcji elektrod grafitowych (rys. 2b) oraz wycinania konturów w filcu i kompozytach GFRP (rys. 2c–d) [4]. Wybór narzędzia strunowego jest podyktowany kosztami, wysoką jakością krawędzi, brakiem delaminacji, dokładnością wymiarową i możliwością uzyskiwania bardzo skomplikowanych kształtów.

\* Dr inż. Magdalena Wiśniewska, m.wisniewska@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7481-9110> – Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska  
Mgr inż. Monika Duda, monika.duda@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-1219-8806> – Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska

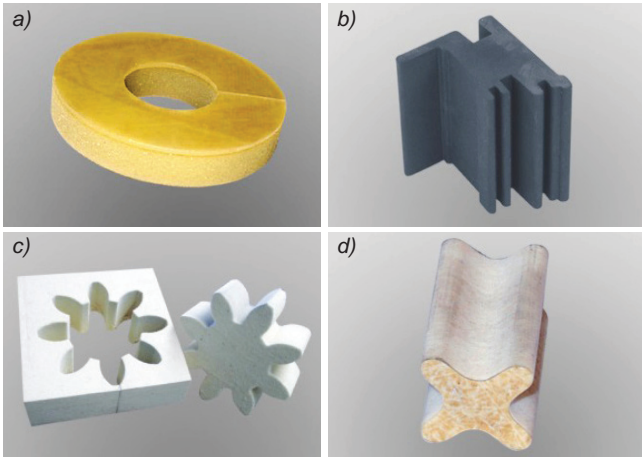


Fig. 2. Examples of elements cut with fixed abrasive diamond wires: a) foam composites, b) graphite electrodes, c) felt, d) glass fiber composites [4]

Rys. 2. Przykładowe elementy wycinane za pomocą strun zbrojonych trwale: a) kompozyty piankowe, b) elektrody grafitowe, c) filc, d) kompozyty z włóknem szklanym [4]

### Badania nad potencjalnymi zastosowaniami strun diamentowych zbrojonych trwale

Struny diamentowe trwale zbrojone ziarnem ściernym (rys. 3) bardzo dobrze się sprawdzają w laboratoriach, które mają do czynienia z szerokim spektrum materiałów o różnorodnych właściwościach i w związku z tym potrzebują uniwersalnych narzędzi. Takie struny są przydatne zwłaszcza na etapie przygotowywania próbek do badań (np. mikroskopowych, zmęczeniowych).

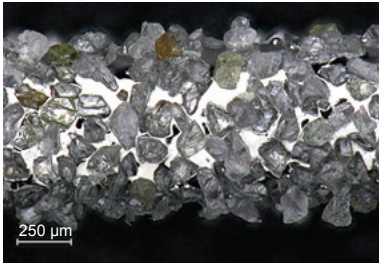


Fig. 3. Topography of an example abrasive wire tool permanently reinforced with diamond grain in the field of view of a stereoscopic microscope  
Rys. 3. Topografia przykładowego narzędzia strunowego zbrojonego trwale ziarnem diamentowym w polu widzenia mikroskopu stereoskopowego

Firmy decydują się na testy przecinania materiałów struną zbrojoną, aby uniknąć problemów (takich jak: zbyt wysoka temperatura w strefie cięcia, brak możliwości zastosowania chłodzenia, kruchość materiału lub jego niejednorodność, szybkie zużywanie się narzędzi konwencjonalnych, zbyt szeroka szczelina cięcia, wprowadzanie zbyt dużych naprężeń) typowych dla innych metod.

Przykładem niestandardowego zastosowania struny zbrojonej może być przecinanie próbki stopu magnezu AM60, w której wykonano gwinty. Na potrzeby badań mikroskopowych należało ją przeciąć w taki sposób, aby odsłonić wykonany gwint bez niszczenia samej próbki (rys. 4).

Ze względu na niewielkie wymiary próbki żadna inna testowana metoda nie zdała egzaminu. Uzyskano chropowatość powierzchni poniżej  $0,8 \mu\text{m}$ .

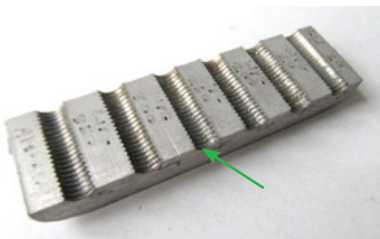


Fig. 4. Laboratory use of fixed abrasive diamond wires for sample preparation for microscopic examination  
Rys. 4. Laboratoryjne zastosowanie strun zbrojonych trwale do przygotowania próbki do badań mikroskopowych

Nowym i niestandardowym obszarem zastosowań jest zabieg nacinania próbek wiosłkowych, przeznaczonych do badań wpływu nałożonych powłok na wytrzymałość zmęczeniową materiału. Próbki przedstawione na rys. 5 mają budowę warstwową. Na bazę w postaci blaszki ze stali AISI 304 nakładano różnorodne powłoki kompozytowe. Następnie próbki nacinano w celu uzyskania odpowiedniego koncentratora naprężeń. Długość i geometria karbu mogą być różne i często zależą od geometrii próbki. W badanych próbkach wiosłkowych o szerokości przeżęcia 15 mm optymalna długość karbu wynosiła 3 mm.

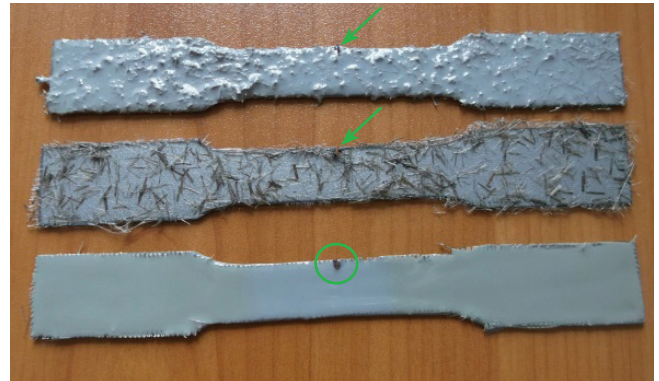


Fig. 5. Oar-shaped samples with notch cut with diamond wire  
Rys. 5. Próbkki wiosłkowe z naciętym strunowo karbem

Zadanie nacinania karbu okazało się trudne w realizacji, ponieważ należało uniknąć delaminacji powłoki od metalicznej bazy. Jednocześnie cięcie musiało być możliwe najcieńsze oraz zakończone owalnie (np. wycinanie piłą sprawia, że karb jest prostokątny, co generuje problemy).

Prowadzone badania miały na celu sprawdzenie wpływu nałożonych powłok na wytrzymałość zmęczeniową materiału. Stal AISI 304 jest często używana do wytłaczania oraz innych przeróbek plastycznych. Na podstawie wstępnych badań stwierdzono, że po nałożeniu powłoki można osiągnąć nawet sześciokrotny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej.

Do nacinania karbu użyto struny zbrojonej w postaci pętli o grubości  $600 \mu\text{m}$  i wielkości ziarna ok.  $64 \mu\text{m}$  – to narzędzie doskonale spełniło swoją rolę. Podczas cięcia struną ani razu nie doszło do delaminacji próbki, jej pęknięcia lub uszkodzenia powłoki, co zdarzało się w przypadku stosowania innych narzędzi. Możliwe, że gdyby wybrano cieńszą strunę, efekty byłyby jeszcze lepsze.

Struna zbrojona trwale ma również olbrzymi potencjał w zakresie przecinania płyt ceramicznych, z których wykonuje się osetki (rys. 6). Najczęstszą formą płyty do cięcia jest prostopadłościan o wymiarach  $250 \times 50 \times 200 \text{ mm}$  lub  $250 \times 40 \times 200 \text{ mm}$ . Osetki są cięte na długości  $L = 250 \text{ mm}$  i  $L = 200 \text{ mm}$ .



Fig. 6. The process of cutting ceramic blocks into whetstones using a fixed abrasive diamond wire  
Rys. 6. Proces przecinania bloczków ceramicznych na osetki za pomocą struny zbrojonej trwale

Materiał, z którego zbudowany jest przecinany bloczek, stanowi ziarno elektrokorundowe lub węgiel krzemu o granulacji  $46\div 400\ \mu\text{m}$ , spójne spoiwem ceramicznym. Wycinane osetki mają różną grubość, przy czym istotna jest płaskorównoległość. Do badania możliwości przecinania bloczków ceramicznych wykorzystano strunę o grubości  $900\ \mu\text{m}$  i wielkości ziarna diamentowego ok.  $120\div 140\ \mu\text{m}$ . Przy stosunkowo małej prędkości przecinania ( $10\ \text{m/s}$ ) proces przebiegał bardzo sprawnie. Materiał wykazywał bardzo dobrą skrawalność. Po zmodyfikowaniu metody pod względem liczby strun (do tzw. przecinania wielostrunowego) i zwiększeniu parametrów cięcia (prędkości skrawania i docisku materiału do struny) możliwe byłoby stworzenie niezwykle wydajnej technologii wytwarzania osetek.

Kolejnym przykładem potencjału metody przecinania strunowego jest przecinanie kompozytów oraz materiałów łatwo ulegających zniszczeniu podczas obróbki. Istnieje wiele materiałów, stosowanych w przemyśle, które ze względu na swoje właściwości są trudne w obróbce. Gdy nie można zastosować chłodziwa – np. w obróbce materiałów higroskopijnych, ulegających spęczaniu pod wpływem wody, o niskiej temperaturze topnienia lub łatwo ulegającym rozwarstwianiu i uszkodzeniom – wybór metody przecinania bardzo się zawęża. Kompozyty przekładkowe, zbudowane np. z pianki (rohacel 71sl) zespolonej (od góry i od dołu) tkaniną z włókna węglowego (tkanina ma gęstość powierzchniową na poziomie  $200\ \text{g/m}^2$  i jest przesączona żywicą epoksydową) są klasycznym przykładem problemów z delaminacją oraz wyrwaniem i niszczeniem włókien podczas procesu przecinania (rys. 7). Jednakże zastosowanie tak delikatnej techniki przecinania jak metoda strunowa pozwala uzyskać bardzo gładkie krawędzie bez uszkodzonych włókien i bez przetopień wypełniacza [5].

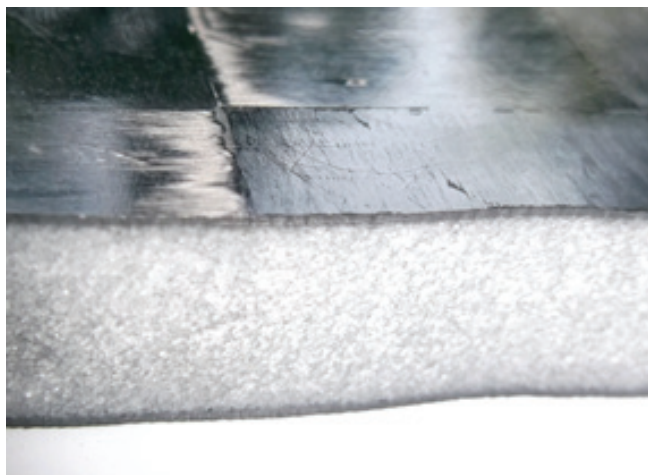


Fig. 7. General view of the carbon fiber composite  
Rys. 7. Widok ogólny kompozytu z włóknem węglowym

Dobre efekty można również uzyskać w przypadku użycia metody strunowej do przecinania drewna lub płyt izolacyjnych z włókien ogniotrwałych (np. Ceraboard 100). Oczywiście wiele zależy od twardości i budowy drewna, jednak generalnie powierzchnie po przecinaniu mają dobrą jakość (np. parametry  $R_a$  dla zakresu prędkości  $5\div 15\ \text{m/s}$  wyniosły: ok.  $1,5\ \mu\text{m}$  dla świerku, poniżej  $1,3\ \mu\text{m}$  dla brzozy, poniżej  $1\ \mu\text{m}$  dla buku) [6]. Temperatura generowana w strefie cięcia powoduje powstawanie przypaleń i odbarwień powierzchni, co może być traktowane albo jako wada, albo jako efekt estetyczny, pozwalający uwydatnić strukturę drewna (rys. 8).

Materiał typu Ceraboard 100 jest powszechnie stosowanym wyrobem izolacyjnym, odpornym na działanie wysokiej temperatury [7], który jednocześnie łatwo uszkodzić podczas zbyt agresywnego przecinania. W przypadku użycia dużych sił skrawania i narzędzi o szerokiej krawędzi tnącej materiał łatwo pęka i kruszy się. Gdy jednak zastosuje się metodę strunową, te problemy nie występują – materiał poddaje się przecinaniu prostoliniowemu i kształtowemu.

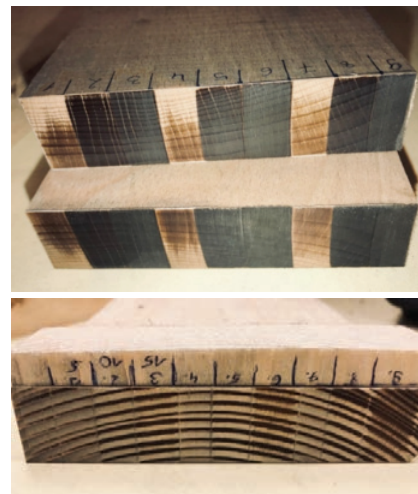


Fig. 8. Examples of wood surfaces after wire cutting [6]  
Rys. 8. Przykładowe powierzchnie drewna po cięciu strunowym [6]

## Podsumowanie

Mimo że przecinanie struną zbrojoną trwale znalazło swoje miejsce w przemyśle, wciąż pojawiają się nowe kierunki zastosowań tej metody. Jest to związane z dużą wytrzymałością narzędzia i jego odpornością na zużycie ściernie – te cechy zapewnia mu ziarno diamentowe. Jeśli dodać do tego niewielkie grubości krawędzi tnącej, niską temperaturę przecinania oraz małe siły tnące, okazuje się, że jest to narzędzie o dużym potencjale. Coraz częściej wykorzystuje się je w warunkach przemysłowych, gdzie zastępuje inne narzędzia tnące w obszarze rozdzielania materiałów trudnoobrabialnych.

## LITERATURA

- [1] Chunhui Chung, Gow Dong Tsay, Meng-Hsiu Tsai. "Distribution of diamond grains in fixed abrasive wire sawing process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 73, 9–12 (2014): 1485–1494.
- [2] Arkadeep K. "Diamond wire sawing of solar silicon wafers: a sustainable manufacturing alternative to loose abrasive slurry sawing". *15th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. Elsevier, 2018.
- [3] <https://www.toolsresearch.com/> (dostęp: 18.06.2019).
- [4] <https://dramet.com/diamond-wire-saw-applications/?lang=en> (dostęp: 18.06.2019).
- [5] Ciałkowska B., Wiśniewska M., Andrzejewski P. „Problematyka przecinania wybranych materiałów kompozytowych struną zbrojoną trwale”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*. 295 (2017).
- [6] Osińska K. „Analiza możliwości i efektów przecinania wybranych gatunków drewna struną zbrojoną trwale”. Politechnika Wroclawska, 2019.
- [7] <http://www.pro-hurt.pl/index.php/2016/07/19/ceraboard-100-1260oc/> (dostęp: 18.07.2019).