

## TECHNOLOGIE CIĘCIA

# Struna diamentowa Małe narzędzie o wielkich możliwościach

TEKST: DR INŻ. Magdalena Wiśniewska  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska  
zdjęcia: Istock, autorka

**P**rzecinanie strunowe – technologia rozdzielania znana na polskim rynku nielicznym – przeżywa obecnie renesans na rynku światowym. A wszystko zaczęło się około 1954 roku wraz z rewolucją przemysłową, jaką

było pojawienie się pierwszego krzemowego tranzystora [1]. Narzędzie strunowe, czyli drut zbrojony trwale w ziarno diamentowe, swoje powstanie zawdzięcza potrzebie przecinania na skalę masową monokryształów krzemu. Stale rosnące zapotrzebowanie na płytki podłożowe z trudnoobrabialnych materiałów

krystalicznych stanowił silny mechanizm napędowy dla badań nad rozwojem technologii związanych z ich obróbką. I tak w roku 1964 we Francji została opatentowana najprawdopodobniej pierwsza przecinarka strunowa [2], urządzenie, które do dzisiaj zdominowało ry-

nek wytwarzania podłoży dla elektroniki, fotowoltaiki i optyki.

## Wstęp

Od ponad 50 lat przecinanie strunowe jest wiodącą metodą uzyskiwania podłoży krzemowych [3]. Należy tu zaznaczyć, że rozróżnia się przecinanie strunowe w zawieszynie ścierniej oraz z wykorzystaniem strun zbrojonych trwale. To drugie rozwiązanie zyskuje ostatnio na zainteresowaniu ze względu na większą wydajność, co oznacza krótszy czas cięcia oraz możliwość redukcji nieekologicznej zawiesziny ścierniej [4]. Tym samym przecinanie strunowe może być przykładem zrównoważonego wytwarzania [5]. Struna uzbrojona trwale w ziarno diamentowe jest narzędziem pozwalającym zwiększyć produktywność dwu-, a nawet trzykrotnie w stosunku do przecinania w zawieszynie ścierniej. Jeśli dodamy do tego chłodziwa na bazie wody oraz dużą odporność na zużycie ściernie i możliwość stosowania do szerokiego spektrum materiałów, uzyskujemy narzędzie o olbrzymim potencjale.

Ale czym tak naprawdę jest struna zbrojona? Po pierwsze, należy tu wyjaśnić nazwę przywodzącą na myśl raczej obszary związane z instrumentami muzycznymi niż narzędziami ściernymi. Sięgając do literatury i pierwszych wzmianek o wspomnianym narzędziu, odnajdujemy nazwę *fixed abrasive wire* funkcjonującą do dzisiaj, co można tłumaczyć jako drut zbrojony ściernie [6, 7]. Zaś sama przecinarka opisywana

Narzędzie strunowe powstało do przecinania na skalę masową monokryształów krzemu. Czy jednak potencjał struny diamentowej nie jest znacznie większy? Dowiedz się, jakie są możliwości oraz zastosowania w obszarach wykraczających poza przecinanie kryształów technicznych.

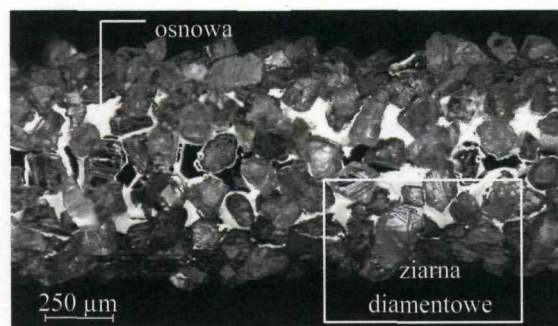
## Z ARTYKUŁU DOWIESZ SIĘ:

- czym jest struna zbrojona;
- jak można wykorzystać to narzędzie do cięcia materiału;
- jakie są zalety i wady użycia struny zbrojonej.

była jako *wire saw machine* – maszyna/piła tnąca drutem [6, 7]. Obecnie w oznaczeniu międzynarodowym funkcjonuje nazwa *fixed-abrasive diamond wire saw machining* (DWS), czyli piła lub przecinarka drutowa, w przypadku których ziarno diamentowe zostało trwale osadzone na powierzchni drutu. Uściślenie rodzaju drutu jest istotne, gdyż metoda ta jest często mylona z przecinaniem drutowym elektroerozyjnym, *wire electrical discharge machining* (WEDM). Natomiast polska nazwa, czyli przecinanie strunowe, wywodzi się z cechy narzędzia, jaką jest elastyczność. Narzędzie zamocowane na przecinarkę, niczym struna w fortepianie, jest napięte, mocne, a jednocześnie sprężyste.

Struna diamentowa zalicza się do narzędzi ściernych. Zbudowana jest z rdzenia zdolnego przemieścić naprężenia rozciągające, zginające oraz zmienne i stanowiącego kluczowy element narzędzia. Przerwanie rdzenia jest równoznaczne ze zniszczeniem narzędzia. Najczęściej wykonywany jest on ze stali nierdzewnej lub sprężynowej [8, 9]. Drugim istotnym elementem jest ścierniwo diamentowe, któremu narzędzie strunowe zawdzięcza swoje niemal nieograniczone możliwości cięcia różnorodnych materiałów. Wielkość stosowanych ziaren może się wahać w przedziale od kilku do kilkudziesięciu  $\mu\text{m}$  [8, 9]. Ostatni element – spoiwo – stanowi wiązanie między rdzeniem narzędzia a ziarnem ściernym i jednocześnie ustala poszczególne ziarna względem siebie. Najczęściej stosowane jest spoiwo niklowe lub żywiczne [5]. Zdjęcie mikroskopowe struny zbrojonej trwale w ziarno diamentowe przedstawiono na fot. 1.

Przemysł narzędziowy od lat stara się nadążyć za rozwojem materiałów technicznych. Nową technologią przecinania szybko wzbudziła zainteresowanie przemysłów: elektronicz-



**Fot. 1.** Zdjęcie mikroskopowe struny diamentowej: zdjęcie z mikroskopu stereoskopowego Keyence

nego, optycznego oraz fotowoltaicznego. I tak narzędzia strunowe są stosowane przemysłowo do cięcia monokryształów od około 1964 roku. Ale to nie wszystkie możliwości strun zbrojonych w diament.

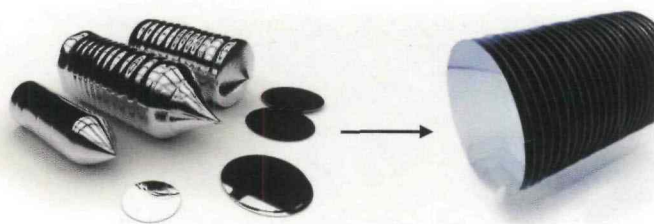
### Struny diamentowe – narzędzia o wielu zaletach

Różne metody przecinania niosą odmienne korzyści, jednocześnie żadna z nich nie jest pozbawiona wad oraz problemów. Wśród zalet przecinania strunowego należy wymienić:

- dużą dokładność wymiarowo-kształtową,
- małe straty materiału obrabianego,
- małe siły skrawania,
- niskie temperatury w strefie cięcia,
- minimalne odkształcenia w obrębie warstwy wierzchniej,
- małą chropowatość powierzchni po cięciu,
- samooczyszczanie się narzędzia strunowego w czasie pracy,
- jednorodne warunki skrawania,
- małą energochłonność procesu [10].

Jeśli zostaną również wspomniane duża szybkość cięcia, czystość procesu (chłodziwem jest woda z niewielką ilością środka powierzchniowo czynnego) oraz brak działań niszczących nawet na kruche i delikatne materiały, można się spodziewać, iż obszar zastosowań struny zbrojonej będzie się poszerzał. Niezależnie od tego, czy przecinanym materiałem jest starannie wyhodowany monokryształ, kawałek szkła, czy spiekany blok zaawansowanej technologicznie ceramiki, cięcie struną znacznie zmniejsza straty materiału, oszczędzając czas, pieniądze i materiał. Co sprawia, iż struny są tak konkurencyjnym narzędziem? W porównaniu z tradycyjnymi piłami tnącymi zewnętrznym (*outer diameter saw*) ❖

## TECHNOLOGIE CIĘCIA

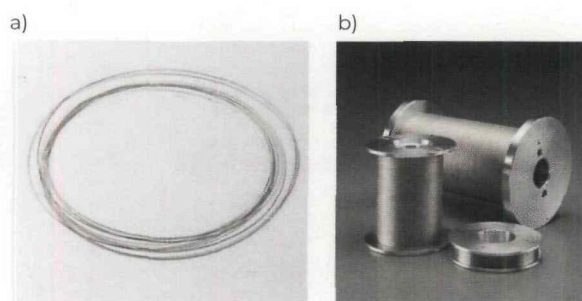


**Fot. 2.** Widok przykładowego kryształu krzemu, z którego odcinane są płytki podłożowe [12, 13]

❖ lub wewnętrznym obwodem (*inner diameter saw*) i innymi metodami cięcia, cięcie struną pozwala zaoszczędzić znaczne ilości materiału. Typowa szerokość cięcia wynosi  $\sim 0,250$  mm dla drutu diamentowego, ale może być mniejsza. Mniejsza szczelina cięcia oznacza więcej płytek podłożowych. Jednocześnie dobra jakość powierzchni oznacza, że kolejne etapy (szlifowanie, docieranie i polerowanie) można zminimalizować, oszczędzając czas i materiał [11]. Na fot. 2 widoczne są krzemowe płytki podłożowe, które mogą mieć grubość  $280 \mu\text{m}$  i chropowatość  $R_a \sim 0,16 \mu\text{m}$ .

Kolejnym istotnym zagadnieniem wymagającym rozwinięcia jest wydajność. Przecinarki strunowe mogą być urządzeniami kompaktowymi, wykorzystującymi strunę w postaci pętli (fot. 3a). W nieco większych modelach stosowany jest drut na szpulach (fot. 3b). Jednak producenci przecinarek poszli o krok dalej, pokazując, iż struna jest narzędziem bez ograniczeń, i na rynku pojawiły się przecinarki wielostrunowe. To innowacyjne rozwiązanie zakłada, iż zmiana układu prowadzenia daje możliwość przewinięcia lub zamocowania drutu równolegle nawet kilka tysięcy razy, dzięki czemu tworzy się sieć zdolną przeciąć w jednym cyklu pracy maszyny cały blok krzemu przy jednym przejściu. Pod względem wydajności nie ma drugiej takiej metody na świecie.

Przecinanie struną diamentową wpisuje się również w nurt zrównoważonego wytwarzania. W obecnych czasach coraz większą rolę przywiązuje się do zagadnień ochrony środowiska i bezpieczeństwa. Stosowanie różnego rodzaju chłodziw i ich usuwanie jest coraz droższe i podlega coraz bardziej rygorystycznym regulacjom. Opisana metoda wypada bardzo korzystnie ze względu na możliwość przecinania na sucho lub z wykorzystaniem chłodziw na bazie wody [4, 5].



**Fot. 3a-b.** Możliwe rozwiązania konstrukcyjne narzędzi strunowych: a) struna w postaci pętli, b) struna z końcami wolnymi [4, 14, 15]

Czy metoda ta ma jakieś wady? Główną może być cena. Jak w przypadku wszystkich narzędzi diamentowych, w zależności od długości i średnicy, ceny strun diamentowych zaczynają się od około 37 € za strunę w postaci pętli o długości zaledwie 1600 mm [16]. Struny są również narzędziami wymagającymi pod względem użytkowania. Przy niewłaściwych parametrach naciągu, przecinania, jak również przy niewłaściwym montażu pękają. I co należy podkreślić – struny diamentowe stosowane są do materiałów niemetalowych.

### Potencjał i możliwości strun diamentowych

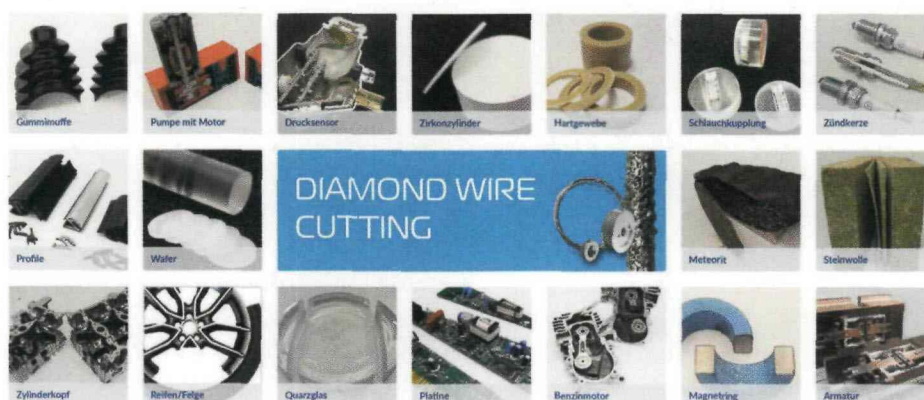
Cięcie wielostrunowe jest główną technologią wykorzystywaną do przecinania krzemowych bloków na płytki podłożowe. Jest to technologia szeroko stosowana w obróbce kruchych materiałów, takich jak krzem, szafir czy kwarc. Koszt produkcji podłożowych płytek krzemowych stanowi około 30-40% całkowitych kosztów produkcji ogniw słonecznych. Około 80% światowej produkcji ogniw fotowoltaicznych jest obecnie wytwarzane przy użyciu krzemu monokrystalicznego. To tłumaczy, dlaczego tzw. wielocięcie krzemu struną stało się metodą wiodącą, szczególnie biorąc pod uwagę aspekt obniżania kosztów produkcji, tak aby energia solarna stała się bardziej przystępna cenowo. Należy tu zwrócić uwagę, iż narzędzia to jedynie część systemu, którego drugim, integralnym składnikiem są maszyny. Dążenie do ciągłego zwiększania wydajności przecinania strunowego decyduje o pojawianiu się ciekawych rozwiązań konstrukcyjnych przecinarek, jak i strun.

Struny mogą się różnić pod względem wielkości i koncentracji ziaren diamentowych, zastosowanej osnowy oraz mechanizmu osadzenia ziaren. Zdjęcia strun różnych pod względem topografii przedstawiono na fot. 4.

## TECHNOLOGIE CIĘCIA



Fot. 4. Przykładowe topografie strun zbrojonych trwale w ziarno diamentowe, wytwarzanych przez firmę Diamond WireTec [17]



Fot. 5. Spektrum materiałów, które można przecinać struną diamentową [17]

Potencjał tych narzędzi to jednak nie tylko obszar produkcji płytek podłożowych. Zastosowanie diamentu jako ścierniwa zbrojącego struny pozwoliło uzyskać narzędzie o niemal nieograniczonych możliwościach. Narzędzie jednocześnie delikatne, ale i na tyle agresywne, by sprawdzić się w przecinaniu szerokiej gamy nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, użytkowych, jak i naturalnych (fot. 5).

### Zastosowanie strun diamentowych

Możliwość zastosowania struny w postaci „na szpuli” lub w pętli, a nie tylko w układzie wielostrunowym, sprawiła, iż narzędzie to można zastosować w maszynach o zróżnicowanych

gabarytach, a tym samym w obszarach przecinania laboratoryjnego, w produkcji jednostkowej lub jako narzędzie zastępujące tarcze albo taśmy. Jest to również narzędzie dające możliwość wycinania kształtowego z bardzo wysokimi dokładnościami. Przechodząc do przykładów nieoczywistych zastosowań strun, ciekawą ilustracją możliwości tych narzędzi może być przecinanie meteorytów oraz minerałów naturalnych na potrzeby badań lub ekspozycji. Tego typu materiały zachowują się często jak kompozyty, są niejednorodne, twarde i kruche. Ich cięcie jest zawsze dużą niewiadomą, gdyż zastosowanie narzędzia generującego zbyt duże siły skrawania może łatwo doprowadzić do niekontrolowanego pęknięcia. Struny ponadto pozwa-

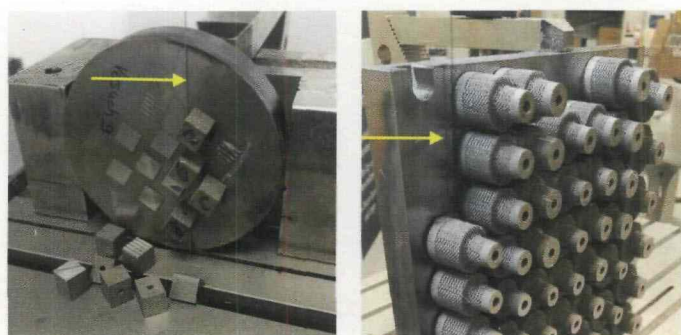
## TECHNOLOGIE CIĘCIA



**Fot. 6.** Przykład zastosowania strun diamentowych w procesie przecinania meteorytu oraz kamieni naturalnych: jadeitu i granitu [14, 17]



**Fot. 7.** Wybrane przykłady detali przecinanych struną diamentową [17]



**Fot. 8.** Przykład wykorzystania struny do odcinania wydruku 3D od płyty bazowej [17]

❖ lają otrzymać gładką powierzchnię przy dobrej wydajności cięcia. Na fot. 6. pokazano przykład cięcia meteorytu, jadeitu oraz granitu.

Wiele wyrobów na różnych etapach wytwarzania i użytkowania wymaga przejścia badań, np. mikroskopowych, zmęczeniowych itp. W tym celu z właściwego detalu wycina się próbki o niewielkich gabarytach. W takich przypadkach doskonale sprawdza się struna diamentowa. Dzięki cięciu w zasadzie na zimno, przy niskich siłach skrawania i niewielkiej szczelinie cięcia możliwe jest wycięcie „na gotowo” próbek z dowolnego detalu. Kilka ciekawych przykładów przedstawiono na fot. 7.

Innowacyjnym zastosowaniem struny diamentowej jest odcinanie gotowego wydruku 3D, wykonywanego w technologii SLM, od płyty drukarki 3D, kluczowa jest tutaj szczelina cięcia wynosząca mniej niż 0,5 mm (fot. 8).

Jak już wspomniano, narzędzia strunowe sprawdzają się doskonale w procesie wycina-

nia próbek z różnorodnych materiałów do badań. W kontroli jakości opon konieczne jest wycięcie próbki z pełnego przekroju. Duża różnorodność opon oraz ich budowa sprawiają, iż jest to materiał niezwykle trudny do cięcia. W tym przypadku stosowana jest specjalna struna o średnicy zaledwie 2 mm, mogąca ciąć z prędkością nawet do 60 m/s [18]. By zwiększyć wydajność wycinania próbek, w procesie stosuje się dwie równoległe pracujące struny. Taka metoda pozwala zrezygnować z dodatkowego szlifowania próbek. Jedną struną można przeciąć do 80 próbek [18].

Obszarem, w którym struny zastąpiły inne narzędzia (głównie tarcze i taśmy), są szeroko pojęte etapy przygotowawcze produkcji oraz pośrednie. Docinanie na wymiar lub kształt odpowiedni dla kolejnych kroków produkcyjnych to przypadki, w których struny są coraz częstszym wyborem. Decydują o tym wydajność, szczelina cięcia, dużo niższe siły skrawania, a tym samym – ryzyko uszkodzeń i pęknięć oraz temperatura. Zastosowanie struny np. do odcinania części stożkowej kryształu krzemu to nawet trzykrotna oszczędność czasu w porównaniu z tradycyjnymi piłami. Dla tego przypadku struna pozwala zrealizować 200 cięć, więc nie ma konieczności każdorazowej wymiany narzędzia [14].

Z nieszablonych zastosowań można wspomnieć o wycinaniu kartonowych drapaków dla kotów. Można się zastanawiać, co trudnego jest w cięciu kartonu? Drapaki kartonowe mają budowę przekładkową, ich cięcie wiąże się z dużą ilością pyłu, co stanowi zagrożenie dla pracowni-

## TECHNOLOGIE CIĘCIA

ków, wymagają niskiej temperatury przecinania bez stosowania chłodzenia. Trudne jest również uzyskanie gładkich powierzchni i krawędzi niewymagających dodatkowej obróbki. Dzięki ostrym ziarnom diamentowym uzyskane powierzchnie są gładkie. Niewielkie średnice strun generują minimalne straty materiału, a tym samym powstawanie mniejszych ilości pyłu. Uzyskane krawędzie nie wymagają dodatkowych zabiegów.

Dla obszarów badawczych narzędzia strunowe sprawdzają się doskonale w procesie przygotowania na przykład tzw. próbek wiosełkowych lub próbek prostopadłościennych używanych do prób udarnościoowych [20]. Próby te zgodnie z normą wymagają nacięcia karbu o odpowiednich wymiarach i kształcie dna. Największy wpływ na wartość udarności mają kształt i głębokość karbu. Im karb jest głębszy, a promień zaokrąglenia karbu jest mniejszy, tym udarność jest mniejsza. W tego typu badaniach karb uzyskuje się z wykorzystaniem m.in. tarcz diamentowych, jednak struny ze względu na swój kształt pozwalają uzyskać optymalny kształt dna wrębu. Przykładowe próbki pokazano na fot. 9.

Takie niestandardowe zastosowania można wyliczać, jednak należy jeszcze wspomnieć o wycinaniu kształtowym. Kształtowe wycinanie drutowe przychodzi od razu na myśl metodę WEDM, czyli drążenia elektroerozyjnego, o którym wspomniano na początku artykułu. Podobieństw niewątpliwie jest wiele, jednak sam mechanizm rozdzielania zupełnie odmienny i znacząco wpływający na wydajność procesu. Wycinanie ściernie drutem zbrojonym jest wielokrotnie szybsze, choć pod względem dokład-



Fot. 9. Przykłady próbek z karbem wykonanym metodą przecinania struną diamentową

ności wymiarowo kształtowej metody te dają zbliżone efekty. Wycinanie strunowe kształtowe wykorzystuje się w produkcji elektrod grafitowych. Drut ścierny sprawdza się tutaj doskonale dzięki niewielkiej średnicy pozwalającej uzyskać bardzo skomplikowane kształty, ostre krawędzie, przy czym niskie siły skrawania nie generują wykruszeń krawędzi. Te same zalety wykorzystuje się przy cięciu kształtowym ceramiki czy węglików.

## Podsumowanie

Przedstawione przykłady to obecnie zaledwie kropla w morzu możliwości. Od wycinania prostoliniowego po kształtowe, od materiałów twardych i kruchych po kompozyty, struna ma niemal nieograniczone możliwości. Sprawdza się od lat w przemyśle związanym z obróbką kryształów, ale coraz częściej przecinarki strunowe można spotkać w laboratoriach, muzeach, centrach badawczych, warsztatach i halach produkcyjnych. Struny diamentowe są narzędziem o wielkim potencjale, który dostrzeżono ponownie. Być może również polski rynek odkryje je na nowo i doceni ich możliwości. □

### Piśmiennictwo

1. <http://www.pbs.org/transistor/science/events/silicont1.html> (data dostępu: 11.04.2023 r.).
2. Patent US 3155087.
3. Ciałkowska B., Wiśniewska M.: *Rozwój cięcia struną – początki i stan aktualny na świecie – cz. II*. „Mechanik”, 2013, 4, nr 8-9.
4. Ciałkowska B., Wiśniewska M.: *Proces przecinania struną zbrojoną trwale jako przykład zrównoważonego wytwarzania. Narzędzia i technologie dla Przemysłu 4.0*: XLI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2018, 373-379.
5. Kumar A., Melkote S.N.: *Diamond Wire Sawing of Solar Silicon Wafers: A Sustainable Manufacturing Alternative to Loose Abrasive Slurry Sawing*. „Procedia Manufacturing”, 2018, 21, 549-566.
6. Clark W.I.: *Fixed abrasive diamond wire saw machining*. North Carolina State University Raleigh, 2001.
7. Hardin C.W.: *Fixed Abrasive Diamond Wire Saw Slicing of Single Crystal SiC Wafers and Wood*. North Carolina State University, Raleigh, 2003.
8. [https://www.electronics.saint-gobain.com/sites/imdf.electronics.com/files/winter\\_catalog\\_fixed-diamond\\_wire\\_109804.pdf](https://www.electronics.saint-gobain.com/sites/imdf.electronics.com/files/winter_catalog_fixed-diamond_wire_109804.pdf) (data dostępu: 11.04.2023 r.).
9. [https://hengxingsteelwire.com/product/diamond-wire.html?gclid=Cj0KCQjwla-hBhD7ARIsAM9tQKv\\_Ap6BupJPOF5x168cUz7dxEH8F2hbrlC7nfvYtibt1wrKkZqlefikaAlH2EALw\\_wcB](https://hengxingsteelwire.com/product/diamond-wire.html?gclid=Cj0KCQjwla-hBhD7ARIsAM9tQKv_Ap6BupJPOF5x168cUz7dxEH8F2hbrlC7nfvYtibt1wrKkZqlefikaAlH2EALw_wcB) (data dostępu: 11.04.2023 r.).
10. Ciałkowska B.: *Cięcie struną zbrojoną materiałów trudnoobrobialnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
11. <https://gti-usa.com/product-category/takatori-semiconductor-equipment-advanced-materials/takatori-multi-wire-saws/> (data dostępu: 11.04.2023 r.).
12. <https://www.electronics.saint-gobain.com/markets/prime-wafer-foundries> (data dostępu: 11.04.2023 r.).
13. <https://www.innovwiretechnology.com/en/multi-wire-saws> (data dostępu: 11.04.2023 r.).
14. Materiały firmy Ensoll.
15. Materiały firmy Saint-Gobain.
16. <https://precisionwiresaw.com/apps/webstore> (data dostępu: 11.04.2023 r.).
17. Materiały firmy Diamond WireTec.
18. <https://www.toolsresearch.com/how-to-use-tyrecutting-wire-for-tire-section-cutting/> (data dostępu: 11.04.2023 r.).
19. <http://keandiamondwire.com/cropping> (data dostępu: 11.04.2023 r.).
20. Burda I., Brunner A.J., Barbezat M.: *Mode I fracture testing of pultruded glass fiber reinforced epoxy rods: Test development and influence of precracking method and manufacturing*. „Engineering Fracture Mechanics”, 2015, 149, 287-297.
21. <https://dramet.com/site/manufacturing-or-machining-graphite-electrodes/?lang=en&portfolioCats=106> (data dostępu: 11.04.2023 r.).