

## Laserowe kształtowanie wacnoci topików bezpieczników

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wykorzystanie mikrotechnologii laserowych do kształtowania wacnoci topików bezpieczników. Topiki w formie cienkich drutów bądź tam podlegały roznym metodom obróbki laserowej: stopowaniu, usuwaniu materiału, wycinaniu otworów. Badania mikroskopowe, metalograficzne, pomiary wacnoci elektrycznych i aczeniowych wykazay przydatnoci mikrotechnologii laserowych do wytwarzania topików bezpiecznikw, szczegolnie na mae prady znamionowe.

**Abstract.** The article presents the using of laser microtechnologies to shaping the properties of fuse-elements. Fuse-elements in the form of thin wires or tapes were subjected to various laser processing methods: alloying, material removal, holes cutting. Microscopic, metallographic, electrical and switching characteristics showed the usefulness of laser microtechnologies for the production of fuse-elements, especially for small rated currents. **The using of laser microtechnologies to shaping the properties of fuse-elements**

**Sowa kluczowe:** topiki bezpiecznikowe, mikrotechnologie laserowe, wacnoci aczeniowe

**Keywords:** fuse-elements, laser microtechnologies, switching properties

### Wstęp

Bezpieczniki topikowe mimo swej długiej historii są stosowane nadal i należą do najszybciej działających zabezpieczeń ograniczających prądy zakoceniowe. Zagadnienia dotyczące problemów materiałowych, niezawodności oraz modelowania bezpieczników topikowych są ciągle aktualne [1-4]. Najistotniejszym elementem wkładki topikowej jest topik, wykonany najczęściej ze srebra lub miedzi. W celu obniżenia ceny w niektórych konstrukcjach wkładek topikowych ze srebra wykonane są jedynie te elementy topików, które są najbardziej narażone na utlenianie się, a pozostałe wykonane są z miedzi. Przydatności materiału w zastosowaniu na topiki ocenia się na podstawie stałej Mayera, która z dobrym przybliżeniem można przedstawi następująco:

(1)

$$K = \frac{c_t}{\rho_0} \ln(1 + \alpha t_{top}) + \frac{1}{2} \frac{H}{\rho_1} \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\right),$$

gdzie:  $c_t$  – ciepło wacniwe materiału topika,  $t_{top}$  – temperatura topnienia topika,  $\rho_0$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – rezystywności materiału odpowiednio w temperaturach: otoczenia, topnienia i parowania,  $\alpha$  – temperaturowy współczynnik rezystywności materiału topika,  $H$  – ciepło topnienia.

Stała Mayera determinuje wartości jednego z najważniejszych parametrów topika, czyli całki Joule'a przedukowej ( $I^2 t$  przedłukowe), która jest miarą energii potrzebnej do nagrzanania i stopienia topika:

(2)

$$S^2 \times K = \int_0^{t_p} i^2 dt,$$

lub w przypadku topika z przewezaniem:

(3)

$$S_z^2 \times K = \int_0^{t_p} i^2 dt$$

gdzie:  $S$  – pole przekroju topika,  $S_z$  – pole przekroju topika w miejscu przewezania,  $t_p$  – czas przedłukowy.

Analiza zależności (1), (2) i (3) wyraźnie wskazuje, że istniejq dwie ścieżki prowadzące do uzyskania lepszych parametrów aczeniowych topików: 1 - modyfikacja wacnoci materiału topika, 2 - zmiana jego geometrii, szczególnie poprzez wprowadzanie przewezen o określonym kształcie i wymiarach. Należy dazyc do uzyskania zdeteminowanych miejsc rozpadu topika, w

określonych przypadkach w wielu punktach równocześnie. Miejsca słabe, w których topik rozpada się w wyniku prądu zwarciowego lub przeciaeniowego, moz by wycinane, nacinane, ale także zmienne pod względem materiałowym. Opracowanie technologii kształtowania topików z materiałów tańszych ni srebro, ale o cechach zbliżonych, jest ciągle przedmiotem licznych badań. Autorzy podjęli badania nad kształtowaniem charakterystyk topików bezpiecznikowych poprzez zastosowanie mikrotechnologii laserowych, które są ze swej natury predestynowane do mikroobrobki bardzo cienkich elementów przewodzących, jakimi są topiki [5,6].

Opracowano i przebadano 3 warianty technologiczne:

A – laserowe wytwarzanie mikroobszaru rezystywnego na cienkich drutach [7];

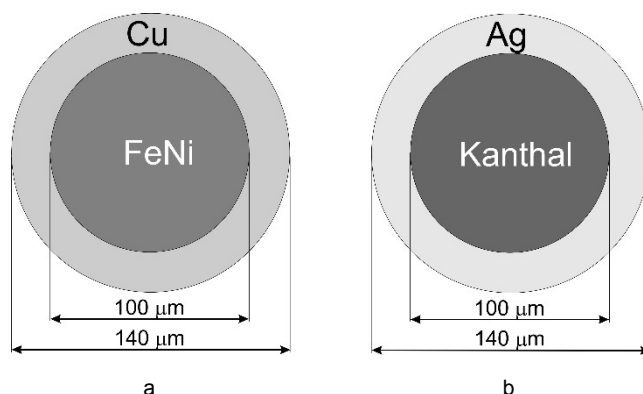
B – laserowe wytwarzanie mikroobszaru rezystywnego w topikach paskowych z przewezaniami;

C – laserowe wycinanie przewezen w topikach paskowych.

Wytworzone topiki typu A, B oraz C poddano badaniom mikroskopowym, metalograficznym oraz termograficznym. Zbadano ich własności elektryczne i aczeniowe. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki tych badań. W pracach technologicznych wykorzystywano dwa rodzaje laserów: impulsowy laser Kwant-15 ( $\lambda=1064$  nm), generujący impulsy o czasie trwania 1-4 ms i energii do 17 J oraz laser światłowodowy redEnergy SPI ( $\lambda=1062\pm 3$  nm), generujący impulsy nanosekundowe, o max. wartości mocy 20 W.

### Topiki drutowe z mikroobszarem rezystywnym (A)

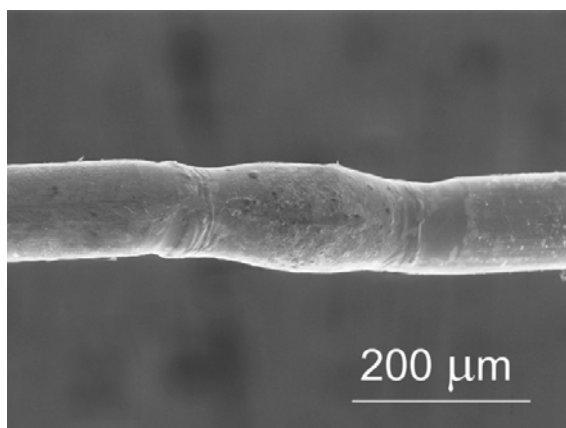
Ta cze badań miała na celu uzyskanie topików do wkładek topikowych przekładnikowych WN na małe prądy znamionowe (ok. 1 A).



Rys.1. Druty dwuwarstwowe zastosowane do wytwarzania mikroobszaru rezystywnych

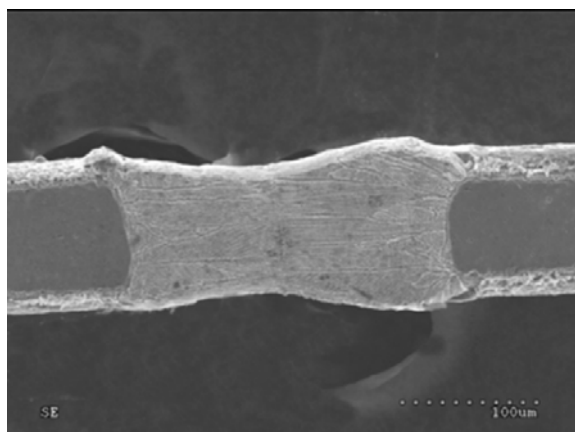
Topiki typu A wytwarzano stosując jako materiał podstawowy dwa rodzaje cienkich drutów dwuwarstwowych, pokazanych na rysunku 1. Drut z rysunku 1a (topik typu A1) ma rdzeń z materiału oporowego FeNi o konduktywności około 4,8 MS/m i jest pokryty warstwą miedzi, która decyduje o jego uśrednionej konduktywności. Drut z rysunku 1b (topik typu A2) ma rdzeń ze stopu oporowego typu Kanthal i zewnętrzną warstwę Ag, która również decyduje o wysokiej uśrednionej konduktywności.

Laserowa technologia wytwarzania mikroobszarów rezystywnych w przypadku obu rodzajów drutów była odmienna. W przypadku drutu FeNi/Cu wykorzystano autorską metodę laserowego wytwarzania mikroobszarów rezystywnych [7]. Precyzyjne przetopienie drutu pojedynczym impulsem laserowym powodowało powstawanie stopu o bardzo dużej rezystywności, przewyższającej ponad sześciokrotnie uśrednioną rezystywność drutu dwuwarstwowego. Optymalna wartość powierzchniowej gęstości mocy impulsu o czasie trwania 4 ms wynosiła  $1,8 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup>. Mikroobszar rezystywny na drucie FeNi/Cu pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Mikroobszar rezystywny utworzony poprzez lokalne stopowanie drutu FeNi/Cu – topik typu A1 [8]

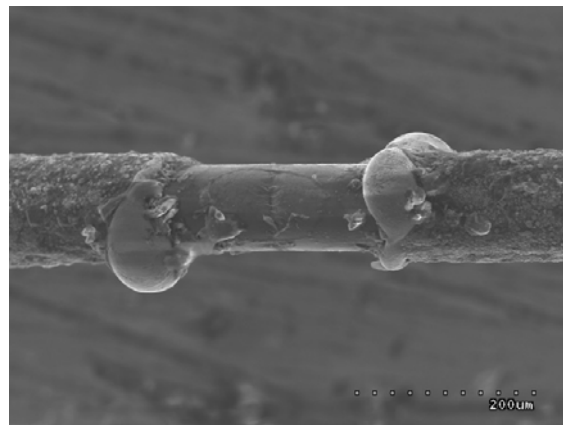
Tak duży wzrost rezystywności był m.in. efektem dobrej jednorodności strukturalnej obszaru, co pokazuje rysunek 3. Strukturę tworzą jednoosiowe dendryty stopu o składzie określonym przez mikroanalizę rentgenowską jako 40,5% Ni, 19,8% Cu oraz 39,7% Fe [9].



Rys.3. Jednorodna struktura mikroobszaru rezystywnego na drucie FeNi/Cu

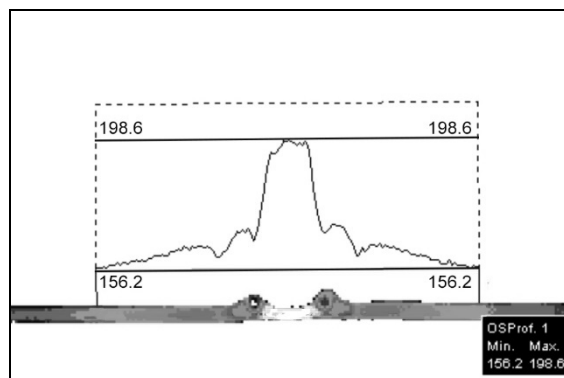
W przypadku topików typu A2 (drut kanthal/Ag) zastosowano laserowe usuwanie zewnętrznej warstwy Ag, bez naruszenia rdzenia z kanthalu. Określenie warunków dla procesu wytwarzania przewężeń na dwuwarstwowym

drucie kanthal/Ag obejmowało badania doświadczalne, prowadzące do zwiększenia absorpcji powłoki Ag, umożliwiającej skuteczne topienie srebra. Dobrano rodzaj absorbentu oraz sposób jego nanoszenia, a dzięki precyzyjnej regulacji gęstości mocy powierzchniowej możliwe było stopienie pokrycia Ag bez stopienia rdzenia drutu (rysunek 4). Optymalna wartość powierzchniowej gęstości mocy impulsu o czasie trwania 4 ms wynosiła  $1,4 \cdot 1,6 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup>.



Rys.4. Mikroobszar rezystywny z przewężeniem utworzony poprzez laserowe usunięcie zewnętrznej warstwy Ag z drutu kanthal/Ag – topik typu A2.

Celem szczególnym przeprowadzonych badań termograficznych było potwierdzenie wpływu zmodyfikowanego obszaru na stan termiczny elementu topikowego. Niezbędne dla prawidłowego określenia temperatur oraz kinetyki nagrzewania ujednoczenie emisyjności różnych komponentów topików utworzonych na drutach o średnicy rzędu 0,1 mm było niezwykle subtelne i nie mogło zakłócić geometrii i zróżnicowania materiałowego laserowo zmodyfikowanych obszarów. Przepływ przez topik prądu o dużej wartości powodowałby szybkie niszczenie powłoki emisyjnej. Z tego powodu badania termograficzne nagrzewania topików modelowych na drutach kanthal/Ag oraz drutach FeNi/Cu przeprowadzono dla przepływu prądów mniejszych od wartości znamionowej.

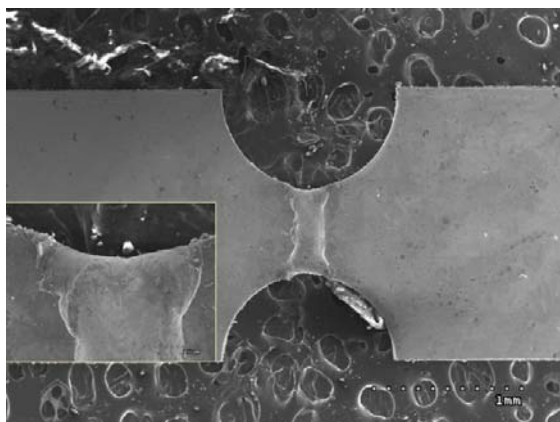


Rys.5. Obraz termograficzny nagrzewania topika typu A2 prądem 1A ( $0,8 \times I_n$ ).

Analiza termogramów potwierdziła założenie, że najgorętszym obszarem topika jest środkowy odcinek zmodyfikowany laserowo (rysunek 5). Topiki typu A1 oraz A2 były montowane w typowych porcelanowych korpusach wkładek topikowych wielkości DII na prąd znamionowy 10 A, zamykane metalowymi okuciami i wypełniane piaskiem kwarcowym o granulacji od 0,2 mm do 0,5 mm służącym jako gasiwo łuku elektrycznego.

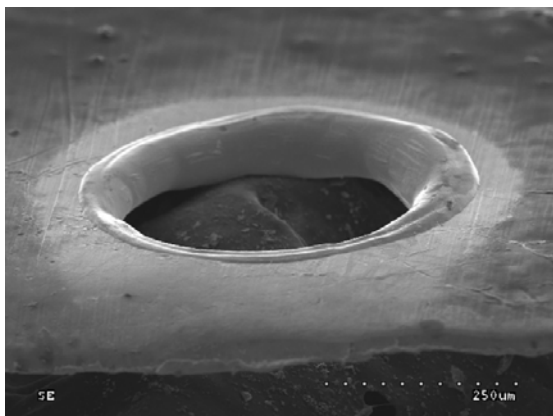
### Topiki z obszarem rezystywnym w przewężeniu (B)

Topiki typu B z mikroobszarem rezystywnym wykonano z taśmy miedzianej o grubości 0,09 mm, z 3 przewężeniami utworzonymi przez boczne wycięcia o kształcie półkole. W przewężeniach te, poprzecznie do osi symetrii podłużnej topika laserowo wtopiono drut z konstantanu o średnicy 0,1 mm (rysunek 6).



Rys.6. Topik typu B wytworzony poprzez laserowe stopowanie przewężenia w taśmie Cu materiałem o wysokiej rezystywności (konstantan).

Laserowo stopowana rezystywna ścieżka nie powinna powodować dalszego przewężenia przekroju, dlatego opracowano specjalną technikę domieszkiwania na krawędzi miedzianego topika, polegającą na laserowym ucinaniu drutu konstantanowego w kontrolowanej odległości od krawędzi. Ucinaniu takiemu towarzyszy tworzenie się mikrokulki, która podczas formowania zbliża się do krawędzi paska folii Cu i tworzy dogodne warunki do zapoczątkowania domieszkiwania od samej krawędzi, bez dalszego jej podcinania. Topiki były montowane w typowych porcelanowych korpusach wkładek topikowych wielkości DII na prąd znamionowy 16 A, zamykane metalowymi okuciami i wypełniane piaskiem kwarcowym o granulacji od 0,2 mm do 0,5 mm służącym jako gasiwo łuku elektrycznego.

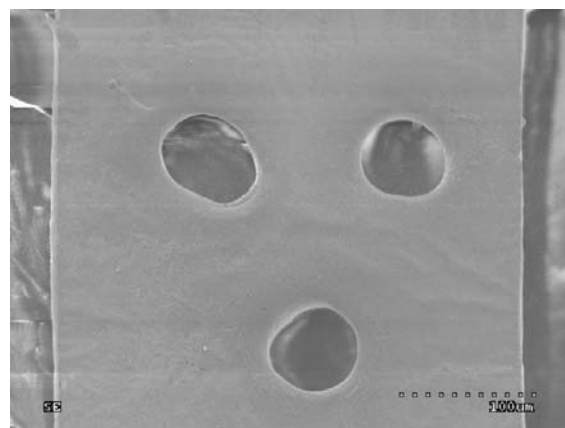


Rys.7. Otwór w taśmie Ag wykonany laserowym impulsem milisekundowym

### Topiki z przewężeniami wycinanymi laserowo (C)

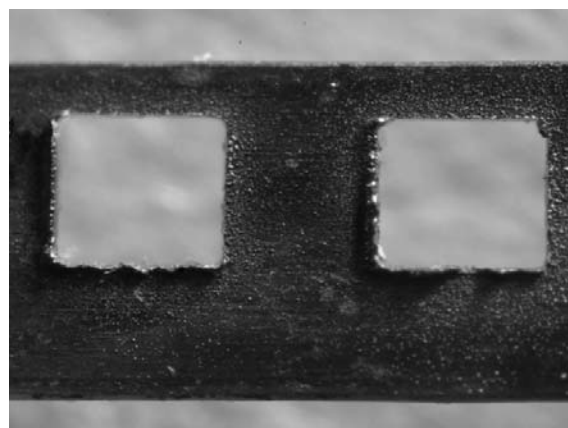
Topiki z przewężeniami wycinanymi laserowo wytwarzano zarówno przy zastosowaniu lasera z impulsami milisekundowymi (topiki typu C1), jak i nanosekundowymi (topiki typu C2) [10]. Pierwotnie materiał wyjściowy dla topików typu C1 stanowiła taśma Ag o grubości 80 μm i szerokości 600 μm. Wytwarzaniu mikrootworów w folii Ag, niezależnie od energii impulsu laserowego, towarzyszyło powstawanie toroidalnego natopienia wokół otworu. Wynikało to z kinetyki topienia srebra impulsami

milisekundowymi i było to zjawisko niekorzystne z punktu widzenia uzyskania efektywnego przewężenia przekroju (rysunek 7). W dalszych pracach wykorzystano zatem taśmę Cu/Ag o grubości 25 μm i szerokości 340 μm, wykonaną przez przewalcowanie na grubość drutu miedzianego srebrzonego o średnicy 0,1 mm. Topiki C1 z przewężeniami miały po 3 miejsca przeciążeniowe w odległości ok. 10 mm, przy czym każde miejsce przeciążeniowe powstało w wyniku wykonania laserem 3 otworów w taśmie Cu/Ag (rysunek 8).



Rys.8. Topik typu C1 z taśmy Cu/Ag z otworami wyciętymi laserowymi impulsami milisekundowymi

Topiki typu C2 miały wycięcia wykonane w taśmie Cu/Ag laserem światłowodowym z impulsami nanosekundowymi [10].



Rys.9. Topik typu C2 z taśmy Cu/Ag z otworami wyciętymi laserem światłowodowym impulsami nanosekundowymi

Wycięcia w topikach typu C2 miały jednakże niezbyt równe krawędzie, ze zgrubieniami wokół otworu (rysunek 9).

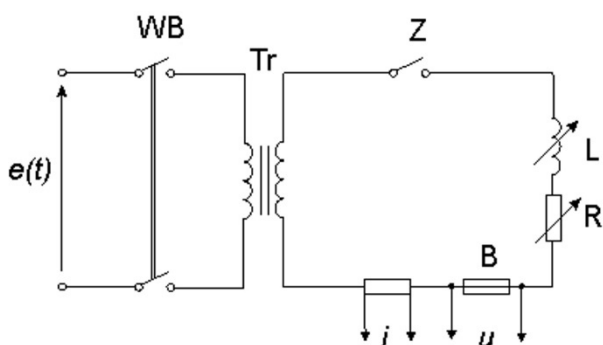
### Właściwości elektryczne i łączeniowe topików

Rodzaje korpusów wkładek wykorzystanych do montażu topików pokazano na rysunku 10. Wykonano pomiary rezystancji oraz strat mocy modeli wkładek topikowych z topikami wszystkich typów: A1, A2, B, C1, C2 i CX. W przypadku topików A1 oraz B straty mocy były mniejsze niż wkładek z topikami nie modyfikowanymi laserowo, natomiast wkładki z topikami A2 miały straty mocy nieco większe.

Wykorzystując układ pomiarowy pokazany na rysunku 11 przeprowadzono badania właściwości łączeniowych wkładek modelowych. Wszystkie badane modele wkładek topikowych poprawnie wyłączyły prądy zwarciovowe i prąd przeciążeniowy.



Rys.10. Korpusy wkładek zastosowane do badań topików: (od lewej) wkładki typu DII na prąd znamionowy 10A i 16A oraz wkładka typu 10×38



Rys.11. Układ do pomiaru właściwości łączeniowych topików; Oznaczenia: WB – wyłącznik bezpieczeństwa, Tr – transformator zwarciový 75 kVA, Z – załącznik zwarciový, L – dławik powietrzny nastawiany, R – rezystor nastawiany, B – badany bezpiecznik,  $e(t)$  – źródło prądu,  $i$  – rejestracja prądu,  $u$  – rejestracja napięcia

Wkładki z topikami A1 wykazywały porównywalne wartości całek Joule'a przedłukowych i wyłączenia w stosunku do wkładek z topikami bez miejsc rezystywnych oraz podobne charakterystyki czasowo-prądowe. Topiki A1 wykazały skrócony czas wyłączenia prądem probierczym górnym.

Wytworzenie miejsc rezystywnych na topikach A2 spowodowało 4-krotne zmniejszenie prądu znamionowego wkładek, przy zwiększonych jednocześnie stratach mocy. Wyniki wyłączenia prądów zwarciový wskazały na istotne zmniejszenie całek Joule'a przedłukowych modeli wkładek z topikami A2, ale zwiększenie całki Joule'a wyłączenia prądu 1090 A w porównaniu do modeli z topikami bez przewężeń.

Wykonanie miejsca rezystywnego w przewężeniach topików typu B spowodowało ponad 4-krotne skrócenie czasu przedłukowego modelu wkładki topikowej przy prądzie probierczym górnym, jednak nie spowodowało konieczności zmiany prądu znamionowego. Wyniki wyłączenia prądów zwarciový wskazały na istotne zmniejszenie całek Joule'a przedłukowych modeli wkładek z topikami typu B. Przy wyłączeniu prądu  $I_1$  całki Joule'a przedłukowe były o 34 % mniejsze, a przy wyłączeniu prądu  $I_2$  aż o 42 % mniejsze. W konsekwencji mniejsze były również całki Joule'a wyłączenia.

Wybrane wyniki badań łączeniowych topików C1 oraz C2 przedstawiono w Tabeli 1. W przypadku wkładek z topikami wytworzonymi impulsami nanosekundowymi (typ C2) uzyskano prawidłowe przebiegi wyłączenia, charakteryzujące się małymi przepięciami i skróconym czasem wyłączenia w stosunku do wkładek z topikiem bez

przewężeń [10]. Wartości całek Joule'a przedłukowych odpowiadały wartościom wynikającym z przekroju przewężenia. Przy prądzie spodziewanym 1100 A całka Joule'a przedłukowa ( $10,4 \text{ A}^2\text{s}$ ) była niewiele większa od parametru konstrukcyjnego  $S_z^2K$  ( $9,1 \text{ A}^2\text{s}$ ) (Tabela 1). Mniej korzystne wyniki uzyskano dla wkładek z topikami wykonanymi impulsami milisekundowymi (Typ C1). Niedoskonałe właściwości wyłączeniowe takich wkładek należy kojarzyć z niedostatecznym zmniejszeniem przekroju poprzecznego i toroidalnym pogrubieniem krawędzi otworów w topikach.

Tabela 1. Wybrane parametry łączeniowe topików z taśmy Cu/Ag z przewężeniami wykonanymi laserem

Rodzaj topika	Parametr $S_z^2K$	Wartość prądu:		Całka Joule'a ( $I^2t$ ):	
		spodziewanego $I_p$	ograniczonego $I_o$	przedłukowa	wyłączenia
-	$\text{A}^2\text{s}$	A	A	$\text{A}^2\text{s}$	$\text{A}^2\text{s}$
C1	2,6	77,4	74,3	5,54	8,79
C1	2,6	1090	197	5,00	7,58
C2	9,1	116	138	11,5	55,0
C2	9,1	1100	227	10,4	37,1

C1 – topiki z przewężeniami wykonanymi impulsami laserowymi milisekundowymi;  
C2 – topiki z przewężeniami wykonanymi impulsami laserowymi nanosekundowymi

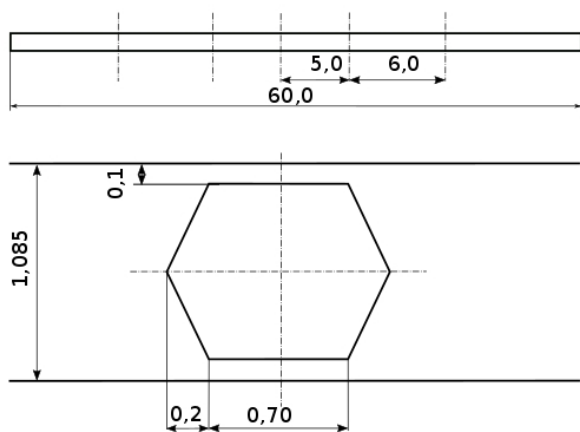
Należy podkreślić, że wkładki z otworami typu C1 oraz C2 wytwarzano w taśmie Cu/Ag o docelowej szerokości poniżej 1 mm. Z technologicznego punktu widzenia wytwarzanie otworów okazało się trudne, co wiązało się głównie z niedostatecznie precyzyjnym pozycjonowaniem taśmy wobec wiązki laserowej. Wykonane otwory nie były symetrycznie usytuowane względem krawędzi topika, co oczywiście powodowało bardzo duży rozrzut parametrów poszczególnych egzemplarzy.

W nowej metodzie laserowego kształtowania topików zastosowano całkowicie odmienne podejście. Topiki typu CX są wycinane z cienkiej taśmy w jednym procesie wraz z otworami. Wykorzystano nanosekundowe impulsy jednomodowego lasera red ENERGY G3SM (SPI). Możliwa jest dowolna zmiana geometrii otworów oraz ich sekwencyjne usytuowanie wzdłuż topika. Projekt geometrii topika CX pokazano na rysunku 12.

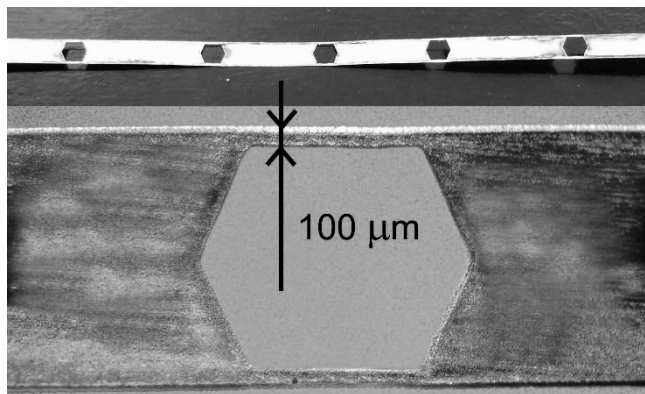
Topiki typu CX wycinano w folii Ag o grubości 34  $\mu\text{m}$ . Proces wycinania takiego topika trwa kilka sekund. Na uwagę zasługuje fakt, że nowa technologia nie wymaga dodatkowych absorberów, co jest zazwyczaj niezbędne podczas laserowej obróbki srebra. Dostateczne sprzężenie energetyczne wiązki laserowej z materiałem uzyskano poprzez optymalne sterowanie sekwencją impulsów laserowych w czasie, co zapewnia wzrost temperatury i wydajne zwiększenie absorpcji promieniowania.

Na rysunku 13 pokazano zdjęcia mikroskopowe wyciętych topików typu CX oraz ich powiększone fragmenty. W topikach tych uzyskano bardzo korzystny stopień przewężenia wynoszący ok. 5,4, przy tak delikatnym topiku niemożliwy do uzyskania klasyczną metodą wykrawania. Parametr konstrukcyjny  $S_z^2K$  wyniósł ok.  $3,3 \text{ A}^2\text{s}$ .

Rodzaje wkładek wykorzystanych do montażu topików pokazano na rysunku 13. Topiki typu CX montowano w korpusach wkładek topikowych o wymiarach 10×38 mm. W modelach wkładek topikowych z topikami CX uzyskano prąd znamionowy 8 A przy stracie mocy 4,6 W oraz bardzo stromą charakterystykę czasowo-prądową.



Rys. 12. Geometria topika typu CX z 5 wycięciami, wymiary w mm.



Rys. 13. Obraz mikroskopowy topika typu CX.

### Podsumowanie

Nie uzyskano znaczącej zmiany charakterystyki czasowo-prądowej modeli wkładek z topikami typu A1. W celu obniżenia przepięć zapłonowych należałoby zwiększyć stopnie przewężenia oraz zwiększyć liczbę przewężeń i/lub spowodować ich wydłużenie.

Zastosowanie topików typu A2 pozwoliło na ok. 4-krotne zmniejszenie prądu znamionowego modeli wkładek topikowych bez obniżania wytrzymałości mechanicznej topika. Uzyskano zmniejszenie wartości napięć zapłonowych i znaczne zmniejszenie całek *Joule'a* przedłukowych, a więc szybsze działanie wkładek topikowych w przypadku wystąpienia prądów przetężeniowych. Do zmniejszenia całek *Joule'a* wyłączenia, zbyt dużych w stosunku do całek *Joule'a* przedłukowych, może przyczynić się zastosowanie innego stopu na rdzeń drutu i usunięcie niedoskonałości technologicznej polegającej na powstawaniu kulistych zgrubień srebra na końcach przewężeń.

Zastosowanie stopowania rezystywnego w przewężeniach taśmy Cu uzyskano dodatkowe zmniejszenie o ok. 40 % parametru konstrukcyjnego  $S_z^2K$  w

przewężeniach topików. Technologia ta może znaleźć zastosowanie jako uzupełniająca przy wykonywaniu topików na małe prądy znamionowe, gdy z powodu zbyt małej wytrzymałości mechanicznej przewężenia nie można uzyskać odpowiednio dużego stopnia przewężenia topika.

Największe oczekiwania na praktyczne zastosowania mikrotechnologii laserowych związane są z technologią wycinania topików typu CX wraz z zaprojektowanymi wycięciami (przewężeniami). Technologia ta może być szczególnie przydatna do wykonywania topików wkładek na małe prądy znamionowe przeznaczonych do zabezpieczania elementów półprzewodnikowych.

**Autorzy:** dr hab. inż. Ryszard Pawlak, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ryszard.pawlak@p.lodz.pl; mg inż. Krzysztof Cwidak (doktorant), Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: krzysztof.gda@gmail.com.

### LITERATURA

- [1] Yang R., Wang Y., Wu D., Deng Y., Lu, Y., Shu Z., Yang C., Low-Temperature Fusible Silver Micro/Nanodendrites-Based Electrically Conductive Composites for Next-Generation Printed Fuse-Links, *ACS Nano*, 11(2017), n. 8, 7710-7718
- [2] Bahman A.S., Jensen S.M., Iannuzzo F., Failure mechanism analysis of fuses subjected to manufacturing and operational thermal stresses, *Microelectronics Reliability*, 88-90 (2018), 304-308
- [3] Pleśca A., Numerical thermal analysis of fuses for power semiconductors, *Electric Power Systems Research*, 83 (2012), n. 1, 144-150
- [4] Cwidak K., Sulikowski J., Gregorczyk W. High-Voltage Thin-Layer Fuses, *Proceedings - ICEFA, Seventh International Conference on Electrical Fuses and their Applications*, Gdansk, 2003, 95-98
- [5] Pawlak R., Tomczyk M., Walczak M.: Durability and reliability enhancement of selected electronic components achieved by laser technologies, *IEEE Xplore, Proc. of the 24th International Conference MIXDES 2017*, Article number 8005253, 459-462
- [6] Pawlak R., Kawczyński R., Korzeniewska, Lebioda M., Rosowski A., Rymaszewski J., Sibiński M., Tomczyk M., Walczak M., Photovoltaic cells of unconventional shapes [Ogniwa fotowoltaiczne o niekonwencjonalnych kształtach], *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.7, 288-292
- [7] Pawlak R.: Laserowa modyfikacja właściwości materiałów przewodzących, Politechnika Łódzka, *Zeszyty Naukowe Nr 898, Rozprawy Naukowe*, z.305, 2002, praca habilitacyjna
- [8] Pawlak R., Kostrubiec F., Tomczyk M., Walczak M.: Laser microtechnologies for passive elements of electronic circuits, *ICALEO 2005, 24th International Congress Proceedings*, Laser Institute of America, 98 (2005), 395-403
- [9] Pawlak R., Tomczyk M., Walczak M.: The favorable and unfavorable effects of oxide and intermetallic phases in conductive materials using laser micro technologies, *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177 (2012), n.15, 1273-1280
- [10] Pawlak R., Rosowski A., Tomczyk M., Walczak M., Precise laser cutting of narrowings in miniature fuse links by use of fiber laser and YAG (355 NM) laser, *ICALEO 2010, 29th International Congress Proceedings*, Laser Institute of America, 103 (2010), 777-783