

## XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji  
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW  
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7  
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,  
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

## Obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna materiałów kompozytowych

### Electrochemical-discharge machining of composite materials

GRZEGORZ SKRABALAK<sup>1</sup>  
ANDRZEJ STWORA<sup>2</sup>

W artykule zaprezentowano obróbkę materiałów kompozytowych na bazie węglików spiekanych z ziarnami diamentu, wykorzystującą hybrydową technologię obróbki elektrochemiczno-elektroerozyjnej oraz wirującą elektrodę w roli narzędzia. Przedstawione wyniki badań uwzględniają wydajność, dokładność procesu obróbki oraz jego wpływ na strukturę warstwy wierzchniej. Przedstawione badania mają na celu aplikację zaproponowanej technologii obróbki dla potrzeb wytwarzania narzędzi skrawających z kompozytów zawierających ziarna diamentowe.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka hybrydowa, obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna ECDM, wirująca elektroda, materiały kompozytowe.

*The paper presents results of researches in the area of hybrid electrochemical-discharge machining of diamond based composite materials for the needs of cutting tools manufacturing. Presented results include machining process accuracy, efficiency and its influence on the surface layer of machined composites.*

**KEYWORDS:** hybrid machining, electrochemical-discharge machining ECDM, rotating electrode, composite materials.

#### Wprowadzenie

Obserwowany w ostatnich latach rozwój materiałów wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym oraz lotniczym, jak i dążenie do zwiększenia wydajności produkcji, przy jednoczesnym ograniczeniu liczby braków, wymagają stosowania narzędzi skrawających o wysokiej wytrzymałości, umożliwiających pracę przy wyższych niż dotychczas

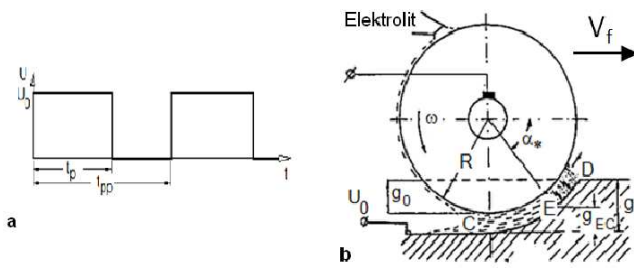
prędkościach skrawania. Materiały, z których wykonane są ostrza skrawające, często charakteryzują się dużą twardością, przez co stawiają jednocześnie duże wyzwania przed narzędziami i metodami obróbki, które pozwoliłyby precyzyjnie i wydajnie ukształtować ostrze skrawające. Nowe materiały konstrukcyjne typu DDCC (Diamond Dispersed Cemented Carbide) przeznaczone na ostrza skrawające, charakteryzujące się wysoką twardością i odpornością na zużycie ściernie, dużą wytrzymałością na pękanie wymagają, opracowania i optymalizacji technologii oraz narzędzi do obróbki tychże materiałów [1]. Narzędzia wykonane z kompozytu DDCC charakteryzują się wysoką twardością, oraz dużą odpornością na zużycie (nawet kilkunastokrotnie wyższą niż w przypadku standardowych węglików spiekanych) [2]. W artykule zaprezentowano hybrydową metodę obróbki elektrochemiczno-elektroerozyjnej zastosowaną do kształtowania materiału kompozytowego – DDCC. Ostrza skrawające wykonane z kompozytu DDCC znajdują zastosowanie m.in. w przemyśle motoryzacyjnym do obróbki łożysk oraz elementów silników wykonanych ze stopów aluminium, umożliwiając obróbkę z wysokimi prędkościami skrawania.

#### Hybrydowa obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna wirującą elektrodą

Proces obróbki elektrochemiczno-elektroerozyjnej (ECDM) wykorzystuje zjawisko wyładowań elektrycznych w elektrolitach. Kombinacja dwóch rodzajów ubytkowej obróbki bezstykowej pozwala na uzyskanie dużych wydajności procesu, przy zachowaniu jednocześnie wysokiej dokładności oraz jakości powierzchni obrabianej [3-5]. Proces obróbki ECDM znajduje zastosowanie podczas drążenia głębokich otworów, obróbki wykańczającej form wtryskowych oraz podczas obróbki materiałów kompozytowych. Jedną z odmian procesu obróbki ECDM jest obróbka ECDM, wykorzystująca wirującą elektrodę, schematycznie przedstawiona na rysunku 1.

<sup>1</sup>dr inż. Grzegorz Skrabalak (grzegorz.skrabalak@ios.krakow.pl)

<sup>2</sup>mgr inż. Andrzej Stwora (andrzej.stwora@ios.krakow.pl)

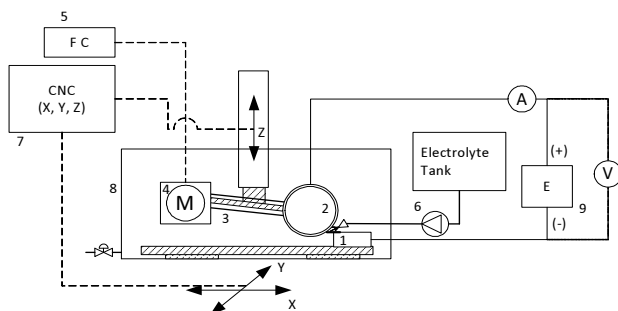


Rys. 1. Schemat procesu obróbki ECMD wirującą elektrodą (b) wykorzystującego impulsowe napięcie zasilające szczelinę roboczą (a) [3]

Podczas procesu obróbki ECMD wirującą elektrodą, elektroda (obracająca się z prędkością  $\omega$ , jest ustawiana względem przedmiotu obrabianego na głębokość  $g_0$  (rys. 1b). Elektroda porusza się względem przedmiotu obrabianego z prędkością  $V_f$ . Proces usuwania materiału z przedmiotu obrabianego zlokalizowany jest w dwóch strefach: obróbki elektrochemicznej (EC, rys. 1b) oraz strefie wyładowań elektrycznych obróbki elektroerozyjnej (ED, rys. 1b). Wyładowania w obszarze ED występują w warstwie gazów obecnych w szczeliny międzyelektrodowej, powstałych w efekcie lokalnego wrzenia elektrolitu. Z uwagi na fakt, że warstwa gazów nie rozkłada się równomiernie w całej szczeliny międzyelektrodowej, rozmiary stref obróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej zmieniają się w trakcie trwania pojedynczych impulsów napięcia zasilającego szczelinę międzyelektrodową. Wyładowania występujące w strefie obróbki elektroerozyjnej (ED), przyczyniają się do powstawania charakterystycznych kraterów, powodując zwiększoną chropowatość powierzchni. Nierówności te są wygładzane podczas fazy obróbki elektrochemicznej – w strefie obróbki EC [3-4].

### ■ Stanowisko doświadczalne

Doświadczenia związane z obróbką hybrydową kompozytów DDCC prowadzono na stanowisku badawczym, zbudowanym w oparciu o 3-osiową sterowaną numerycznie obrabiarkę elektrochemiczną EOCA 40. Obrabiarka została wyposażona w głowicę szlifierską umożliwiającą obrót elektrody roboczej z prędkością 500-7000obr/min. Schematycznie stanowisko badawcze zaprezentowano na rysunku 2. Komorę roboczą obrabiarki z zainstalowaną głowicą szlifierską i elektrodą roboczą zaprezentowano na rysunku 3.



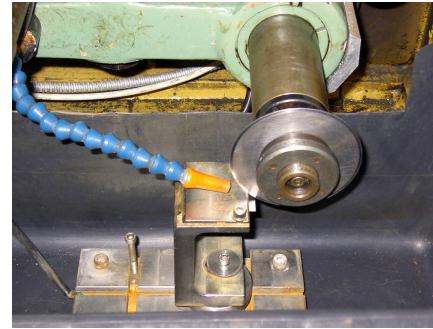
Rys. 2. Schemat stanowiska do badań procesu obróbki ECMD wirującą elektrodą: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – elektroda robocza, 3 i 4 – głowica szlifierska, 5 – falownik do sterowania prędkością obrotową elektrody, 6, 7, 8 – część obrabiarkowa oraz układ obiegu i filtracji elektrolitu, 9 – układ zasilający szczelinę roboczą prądem impulsowym

Jako źródło zasilania szczeliny roboczej wykorzystano urządzenie / generator skonstruowany w ramach projektu ELESIN przez zespół Prof. Wollenberga i Dr H-P Schulze'a

w Otto von Guericke University w Magdeburgu. Generator ten pracuje w trybie stałoprądowym, umożliwiając pracę z następującymi nastawami [5]:

- prąd roboczy: 0 – 50 A;
- napięcie międzyelektrodowe: 20 – 99 V;
- czas impulsu / przerwy: 10 – 2000 $\mu$ s.

Podczas prowadzonych prac doświadczalnych, jako elektrodę roboczą wykorzystano tarczę miedzianą o średnicy 100mm oraz szerokości części roboczej 3mm (rys. 4a). Proces obróbki był prowadzony w wodnym roztworze NaCl o stężeniu 3% i temperaturze 20-22°C.

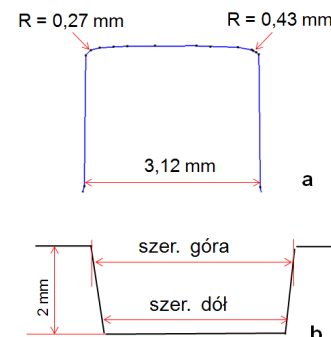


Rys. 3. Komora robocza obrabiarki z zainstalowaną elektrodą oraz przedmiotem obrabianym

### ■ Wyniki badań procesu obróbki ECMD kompozytu DDCC

Wykorzystując zaprezentowane wcześniej stanowisko badawcze, wykonano kilka serii doświadczeń związanych z obróbką rowków w kompozycie DDCC. Rowki o długości 8 mm i głębokości 2 mm były wykonywane w 4 przejściach elektrody roboczej (za każdym razem elektroda była obniżana o 0,5mm – głębokość  $g_0$ , rys. 1b). Prędkość przesuwu elektrody względem przedmiotu obrabianego:  $V_f = 1$  mm/min. Przedmiot obrabiany stanowiły próbki wykonane z kompozytu DDCC, z ziarnami diamentu o wielkości 6-12 $\mu$ m oraz 20% udziale wagowym diamentu w kompozycie (waga diamentu względem osnowy przed spiekaniem). Podstawowe charakterystyki procesu zostały określone w oparciu o:

- wyznaczoną wydajność procesu obróbki;
- pomiar chropowatości powierzchni po obróbce;
- pomiar geometrii uzyskanego kształtu – odwzorowanie kształtu elektrody roboczej (rys. 4b).



Rys. 4. Wymiary części roboczej wykorzystywanej elektrody (a), pomiar geometrii uzyskanego kształtu (b)

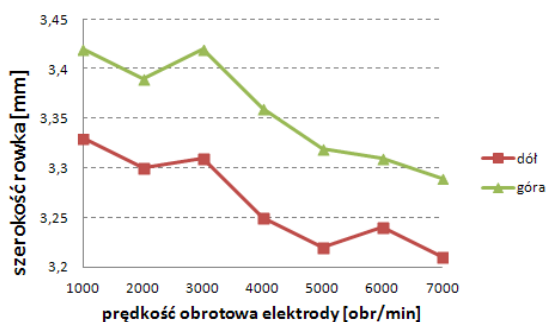
Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w Tabeli 1 poniżej.

Tab. 1. Wymiary rowka i chropowatość powierzchni jego dna w zależności od parametrów energetycznych procesu obróbki ECDM elektrodą wirującą z prędkością 5000obr/min

U [V]	I [A]	Czas impulsu [μs]	Czas przerwy [μs]	Szerokość rowka [mm]		Chropowatość powierzchni dna rowka [μm]	
				DÓŁ	GÓRA	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>
30	30	40	40	3,22	3,32	1,32	6,92
30	30	200	200	3,25	3,41	1,44	8,25
30	30	40	120	3,18	3,25	1,31	7,15
50	30	40	40	3,26	3,34	1,35	7,22
50	30	200	200	3,33	3,43	1,43	8,14
50	30	40	120	3,22	3,27	1,36	7,48
70	30	40	40	3,32	3,40	1,36	7,53
70	30	200	200	3,45	3,56	1,47	8,22
70	30	40	120	3,28	3,36	1,39	7,67
90	30	40	40	3,38	3,45	1,42	7,52
90	30	200	200	3,48	3,61	1,49	8,34
90	30	40	120	3,34	3,45	1,41	7,25

Na podstawie analizy zaprezentowanych wyników można stwierdzić, że obróbka ECDM wirującą elektrodą pozwala na precyzyjne kształtowanie elementów wykonanych z kompozytów DDCC. Zwiększone rozbieżności otworu widoczne w przypadku procesu prowadzonego przy wyższym napięciu oraz przy dłuższych czasach impulsu, związane jest z większym udziałem roztwarzania elektrochemicznego (rys. 1b – strefa EC). Wraz ze wzrostem napięcia międzyelektrodowego oraz wzrostem długości czasu impulsu można również zaobserwować wzrost chropowatości powierzchni dna rowka. Również w tym przypadku zwiększony udział roztwarzania elektrochemicznego wpływa na szybsze usuwanie materiału, fazy wiążącej, odsłaniając tym samym ziarna diamentu.

Wyniki doświadczeń przedstawione w tabeli 1, dotyczą obróbki wirującą elektrodą z prędkością 5000 obr/min. W ramach prowadzonych doświadczeń wykonano również eksperymenty związane z określeniem wpływu prędkości obrotowej elektrody roboczej – rysunek 5. W tym celu wykonano eksperymenty dla 8 prędkości obrotowych elektrody roboczej: od 0 – 7000 obr/min (z krokiem 1000 obr/min).



Rys. 5. Dokładność odwzorowania kształtu elektrody z zależności od prędkości obrotowej ( $U=30$  V,  $t_i = t_p = 40$  μs,  $I = 30$  A,  $V_f = 1$  mm/min)

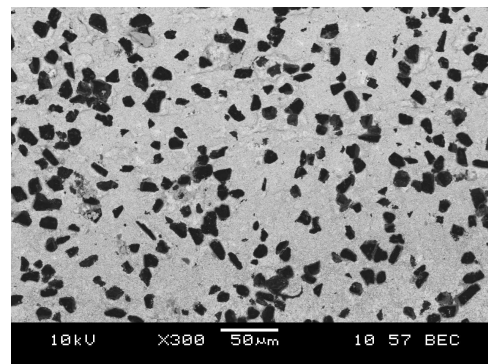
Aby zachować przejrzystość, wykres przedstawiony na rysunku 5 nie uwzględnia szerokości rowków uzyskanych dla elektrody nieruchomej (0 obr/min) – w tym przypadku zmniejszono prędkość przesuwu elektrody  $V_f$  do 0,2 mm/min. W tym przypadku szerokość rowka w górnej części była równa ~5,5mm, natomiast w dolnej ~4,2mm.

Wyniki doświadczeń związanych z określeniem wpływu prędkości obrotowej elektrody na dokładność obróbki, po-

zwalają stwierdzić, że w przypadku obrotów nie mniejszych niż 4000 obr/min, zmiana prędkości obrotowej nie wpływa znacząco na poprawę dokładności procesu obróbki. W przypadku mniejszych prędkości obrotowych rozbieżności rowka jest większe. Podczas prowadzonych doświadczeń z wirującą elektrodą nie zaobserwowano zużycia elektrody roboczej. W przypadku pracy z nieruchomą elektrodą, zaobserwowano zużycie zarówno powierzchni czołowej, jak i powierzchni bocznych. Czoło elektrody uległo „skróceniu” o 0,4 mm, natomiast szerokość elektrody zmniejszyła się o 0,3 mm (do 2,82mm przy czole elektrody) do 0,15 mm (do 2,97 mm, na wysokości 1,5mm od czoła elektrody)

#### ■ Analiza mikrostruktury powierzchni kompozytu DDCC po obróbce ECDM

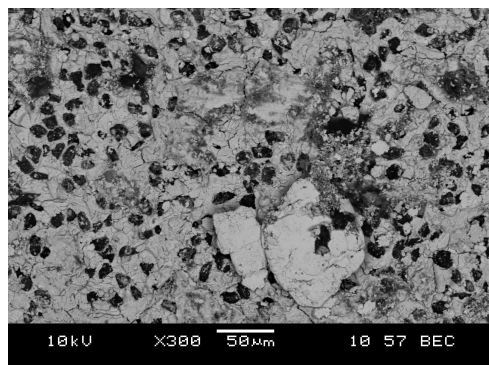
Oprócz dokładności geometrycznej oraz wydajności procesu obróbki, istotnym czynnikiem decydującym o możliwości jego praktycznego zastosowania jest wpływ procesu obróbki na strukturę warstwy wierzchniej obrabianego materiału. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wytwarzania elementów, części pracujących w trudnych warunkach – jak ostrza i narzędzia skrawające. Na rysunku 6 zaprezentowano strukturę powierzchni kompozytu DDCC przed procesem obróbki, z kolei na rysunkach 7-9 zaprezentowano mikrostrukturę warstwy wierzchniej kompozytu DDCC po obróbce ECDM wirującą elektrodą.



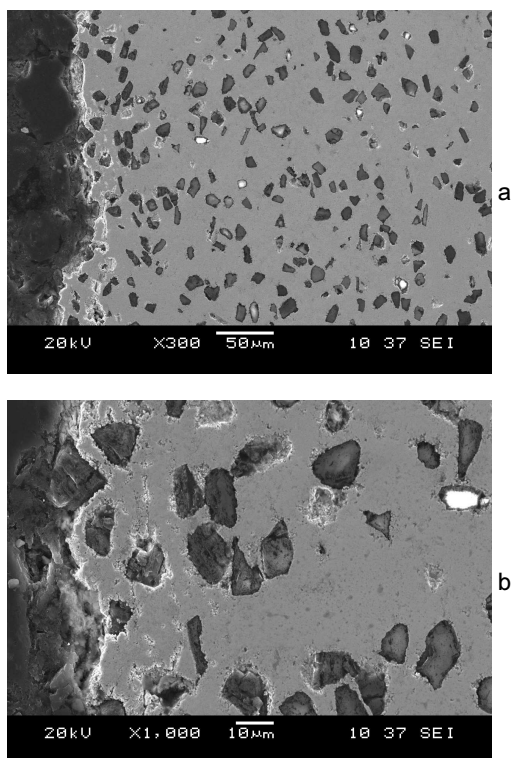
Rys. 6. Powierzchnia kompozytu DDCC przed obróbką

Na podstawie analizy przedstawionych mikrostruktur, można stwierdzić, że obróbka ECDM wirującą elektrodą nie wpływa negatywnie na warstwę wierzchnią obrabianych elementów wykonanych z kompozytu DDCC. Widoczne na rysunku 7 mikropęknięcia fazy wiążącej nie wnikają głębiej

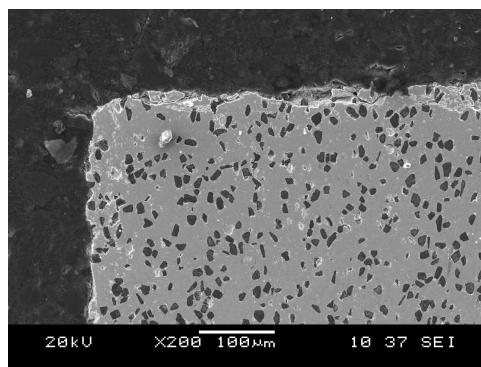
niż na około 20-30  $\mu\text{m}$  w głąb powierzchni przedmiotu obrabianego (rys. 8a, b). Podobny stan warstwy wierzchniej kompozytu DDCC po obróbce ECDM, jak na dnie rowka, występuje również na obróbennej ścianie wykonanego rowka (rysunek 9).



Rys. 7. Powierzchnia kompozytu DDCC po obróbce ECDM wirującą elektrodą ( $U=70\text{ V}$ ,  $t_i = t_p = 40\ \mu\text{s}$ ,  $I = 30\text{ A}$ ,  $V_f = 1\text{ mm/min}$ )



Rys. 8. Powierzchnia dna rowka wykonanego w kompozycie DDCC, metodą ECDM wirującą elektrodą ( $U=70\text{ V}$ ,  $t_i = t_p = 40\ \mu\text{s}$ ,  $I = 30\text{ A}$ ,  $V_f = 1\text{ mm/min}$ ), pow. 300x (a), pow. 1000x (b)



Rys. 9. Powierzchnia krawędzi rowka wykonanego w kompozycie DDCC, metodą ECDM wirującą elektrodą ( $U=70\text{ V}$ ,  $t_i = t_p = 40\ \mu\text{s}$ ,  $I = 30\text{ A}$ ,  $V_f = 1\text{ mm/min}$ )

## Podsumowanie

Zaproponowana metoda obróbki kompozytu DDCC, wykorzystująca zjawiska wyładowań w elektrolitach (ECDM) oraz wirującą elektrodę w roli narzędzia, stanowi efektywną technologię obróbki materiałów kompozytowych z ziarnami diamentowymi. Obróbka ECDM wirującą elektrodą pozwala uzyskać zdecydowanie wyższą wydajność niż proces szlifowania ( $2,3\text{ mm}^3/\text{min}$  w przypadku ECDM, wobec  $\sim 0,24\text{ mm}^3/\text{min}$ ) [6]. Jednocześnie technologia pozwala uzyskać wysoką dokładność obróbki. Ponadto zaproponowana metoda obróbki nie powoduje znaczących uszkodzeń warstwy wierzchniej – strefa wpływu obróbki na warstwę materiału obrabianego ograniczona jest w zakresie 10-40  $\mu\text{m}$  w głąb materiału. Zaproponowana technologia metodą obróbki kompozytów z ziarnami diamentu może być z powodzeniem stosowana jako obróbka zgrubna, zostawiając nadatek nie przekraczający 50-100  $\mu\text{m}$  dla potrzeb obróbki wykańczającej (szlifowania). Taka kombinacja dwóch metod obróbki pozwoli na ograniczenie łącznego czasu wytwarzania np.: ostrzy skrawających, ograniczając jednocześnie koszt związany z wykonaniem i zużyciem narzędzi (w szczególności ściernic diamentowych wykorzystywanych do szlifowania kompozytu).

Przedstawione prace zostały wykonane w ramach projektu PBS1/A5/7/2012, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – Program Badań Stosowanych.

Analiza mikrostruktury powierzchni kompozytów DDCC po obróbce została wykonana w Centrum Inżynierii Materiałowej i Techniki Spiekania, Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie.

## LITERATURA

1. Moriguchi H., Tsuduki K., et al.: Sintering behavior and properties of diamond/cemented carbides, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* vol. 25 (2007) s.237–243.
2. Rosiński M., Michalski A.: WCCo / cBN composites produced by pulse plasma sintering method, *Journal of Materials Science*, vol. 47, no 20, pp. 7064-7071, 2012, DOI 10.1007 / s10853-012-x.
3. Kozak, J., Rajurkar, K.P.: Investigation of Electrochemical Arc machining with Rotating Electrode. *Proceedings of the ISEM-10*, Magdeburg, 1989, 498-509.
4. El-Hofy H.A-G.: *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*, wyd. CRC Press 2014, s. 432-434.
5. Lauter M., Trautmann H.-J., Zybura-Skrabalak M., Schulze H.-P., Wollenberg G.: Structure of process energy sources for time-parallel combined processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 149, Issues 1–3, 10 June 2004, Pages 519–523.
6. Skrabalak G., Staniewicz-Brudnik B.; Baczek E.; Stwora A.: Investigations on processing of cemented carbides and com-

posite materials (BNDCC and DDCC) by means of grinding and hybrid machining. Innovative Manufacturing Technology 2014, Mechanik 02/2015 s. 259-267.

7. Brugemman A.G.: Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen. Ann.Phys. Leipzig, vol.24, 1935.