

	Organizatorzy: Politechnika Łódźka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Trendy rozwojowe ścierniw z węglika krzemu

Development trends of silicon carbide abrasives

CZESŁAW NIŻANKOWSKI
 PAWEŁ KAZIMIERSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.377

Przedstawiono techniki wytwarzania i właściwości obecnie produkowanych ścierniw z czarnego i zielonego węglika krzemu oraz monowęglika krzemu i mikrowłókien (whiskerów) węglika krzemu. Wskazano i omówiono aktualne trendy rozwojowe ścierniw z węglika krzemu w postaci spiekane go węglika krzemu, mikrokrystalicznego węglika krzemu i nanokrystalicznego węglika krzemu oraz nanokrystalicznych włókien węglika krzemu.

SŁOWA KLUCZOWE: węgiel krzemu, ścierniwo, wytwarzanie, trendy rozwoju

Techniques for the production and properties of currently manufactured abrasives with black and green silicon carbide, monocarbide silicon and the mikrofiber (whiskers) from silicon carbide was presented. Stated and discussed current development trends of abrasive silicon carbide in the form of a sintered microcrystalline silicon carbide, silicon carbide, nanocrystalline silicon carbide and nanocrystal fibers from silicon carbide.

KEYWORDS: Silicon carbide, abrasives, preparation, development trend

Wprawdzie węgiel krzemu jest minerałem występującym w przyrodzie pod nazwą moissanitu, ale jego zasoby naturalne są bardzo małe. Kiedy więc w połowie XIX wieku, po wyeksplorowaniu znacznych wówczas złóż szmergla zaczęto intensywnie poszukiwać możliwości produkcji jakiegokolwiek, twardego, syntetycznego materiału ściernego, przypadkowo dokonano syntezy właśnie węglika krzemu. Ten związek chemiczny o oznaczeniu SiC zawiera w swym składzie objętościowym 70,045% krzemu i 29,955% węgla. Cechuje się wysoką twardością, dobrą wytrzymałością mechaniczną, wysokim przewodnictwem elektrycznym i ciepłym oraz wysoką temperaturą rozkładu chemicznego. Posiada także dużą odporność na szoki termiczne i utlenia-

jące działanie powietrza. Jest więc związkiem trwałym. Podczas syntezy krystalizuje najpierw w układzie regularnym jako β – SiC a następnie heksagonalnym jako α – SiC. Kryształy węglika krzemu według badań K. Woźniaka stanowią politypy tego związku zbudowane z tetraedrow tworzących sieci heksagonalne lub romboedryczne [7]. Jako ścierniwo węgiel krzemu stosowany jest zarówno luzem jak i w postaci związanej przy produkcji zarówno spojonych jak i nasypowych narzędzi ściernych. Otrzymywany jest w dwóch odmianach, bądź to jako czarny węgiel krzemu (tzw. karborund czarny), bądź też jako zielony węgiel krzemu (tzw. karborund zielony). Ścierniwa te zilustrowano na rys.1 i 2.

Czarny węgiel krzemu przeznaczony jest do obróbki ścierniej stopów żelaza z węglem, a więc żeliwa szarego i żeliwa sferoidalnego, jak również metali nieżelaznych np. aluminium i jego stopów, brązów, mosiądzów oraz materiałów niemetalicznych np. kamieni, betonów, ceramiki, szkła, tworzyw sztucznych i gumy. Natomiast zielony węgiel krzemu stosowany jest w obróbce ścierniej takich twardych materiałów jak węgliki spiekane, cermetale, ceramika, szkło, granit, kamienie szlachetne, marmur oraz żeliwa i stale odporne na korozję o strukturze austenitycznej. Ziarna ściernie z zielonego węglika krzemu są twardsze, chemicznie „czystsze” i bardziej kruche od ziaren ściernych z czarnego węglika krzemu. Posiadają również nieco lepsze zdolności do samoostrzenia. Niestety są znacząco droższe. Porównanie podstawowych właściwości tych obu gatunków przedstawiono w tabeli 1.

W skali przemysłowej, czarny węgiel krzemu otrzymywany jest drogą syntezy w elektrycznym piecu oporowym Achesona z mieszaniny piasku kwarcowego, koksu naftowego, amorfu, siloksikonu i masy zwrotnej. Piasek kwarcowy to zwietrzałe i rozdrobnione skały magmowe lub piaskowca o wysokiej zawartości krzemionki SiO₂. Koks naftowy powstaje w wyniku termicznej obróbki pozostałości po destylacji ropy naftowej [8]. Siloksikon tworzony jest w warstwie przylegającej do bloku klinkieru SiC jako mieszanina SiC i składników surowców wsadowych. Pod pojęciem amorfu rozumiemy drobnokrystaliczny węgiel krzemu, pozostały po operacji sortowania klinkieru [7]. Sam proces synte-

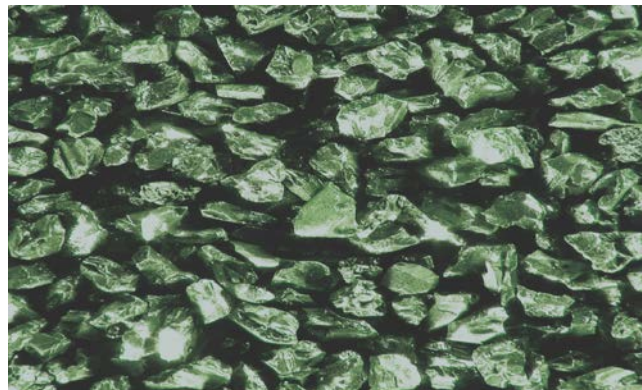
* prof. dr hab. inż. Czesław Niżankowski (nizan@mech.pk.edu.pl), mgr inż. Paweł Kazimierski (kazimierski1980@gmail.com)

zy czarnego węgla krzemu zaliczyć należy do szczególnie złożonych. Podstawowe etapy tego procesu przedstawiono na rysunku (rys. 3) Natomiast na następnym rysunku przedstawiono kolejność operacji technologicznych procesu wy-

tworzania ścierniw z czarnego węgla krzemu (rys. 6) oraz widok ogólny oporowego pieca Achesona podczas syntezy bloku czarnego węgla krzemu (rys. 7).



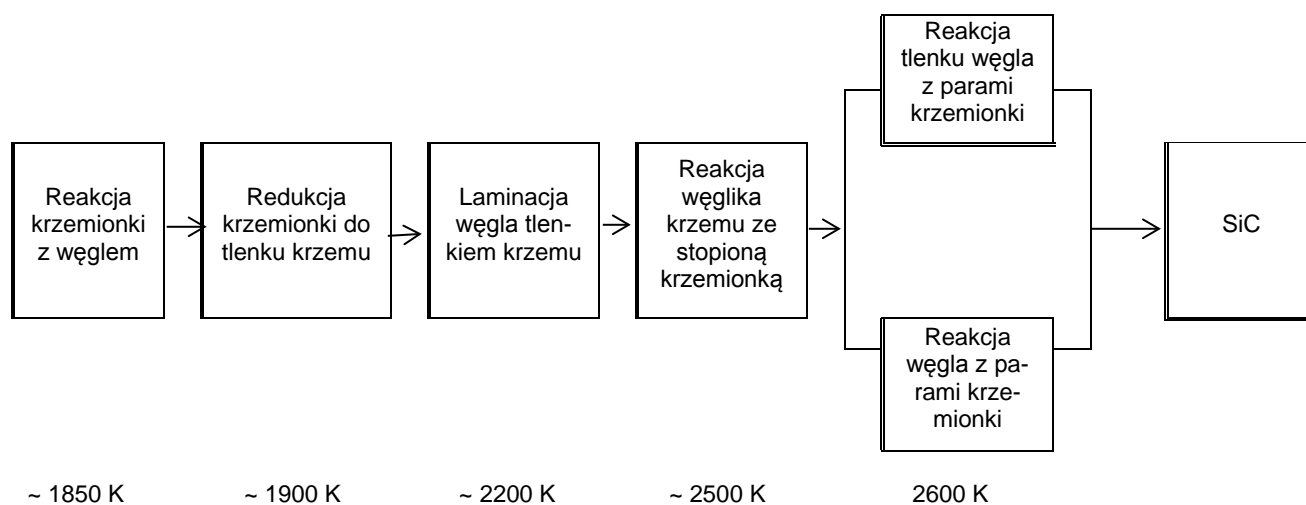
Rys. 1. Widok ziaren ściernych z czarnego węgla krzemu 98C [14]



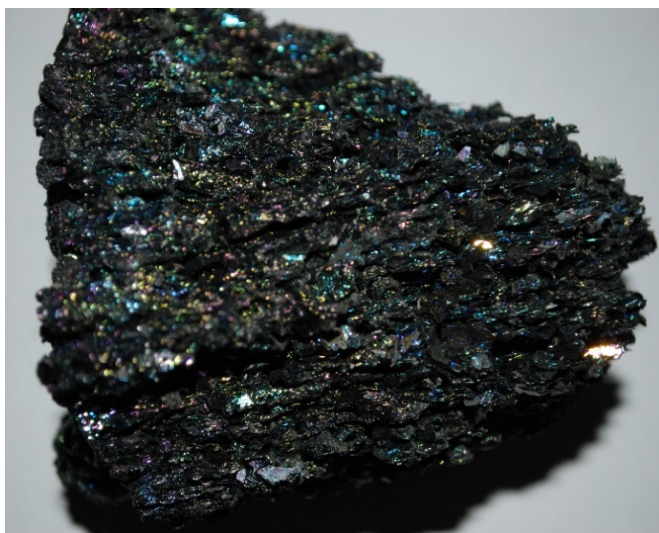
Rys. 2. Widok ziaren ściernych z zielonego węgla krzemu 99C [14]

Tab. 1. Podstawowe właściwości ziaren ściernych z czarnego i zielonego węgla krzemu [8,14]

L.p	Rodzaj właściwości	Jednostka miary	Czarny węgiel krzemu 98C	Zielony węgiel krzemu 99C
1	2	3	4	5
2	Kształt ziarna	-	Izometryczno – mieczykowate, ostrokrawędziowe	mieczykowato- izometryczne, ostrokrawędziowe
3	Gęstość ziarna	g/cm ³	3,20	3,18
4	Gęstość nasypowa ścierniwa - numer ziarna 46 - numer ziarna 180	g/cm ³	1,39 – 1,49 1,31 – 1,42	1,38 – 1,46 1,30 – 1,40
5	Zawartość frakcji magnetycznej	%	maks. 0,5	maks. 0,2
6	Zabarwienie	-	czarne	zielono - seledynowe
7	Spiekalność	-	dobra	bardzo dobra
8	Skład chemiczny dla ścierniw o nr ziaren od 16 do 100 - SiC - Si + SiO ₂ - wolne C - Fe ₂ O ₃	% obj.	- min 97,5 - maks. 1,6 - maks. 0,3 - maks. 0,2	- min. 99,1 - maks. 0,4 - maks. 0,1 - maks. 0,2
9	Twardość HV _{0,5}	GPa	24	26
10	Wytrzymałość na ściskanie Rc	MPa	- 2000	- 2300
11	Maksymalna temperatura skrawania	K	1680	1720



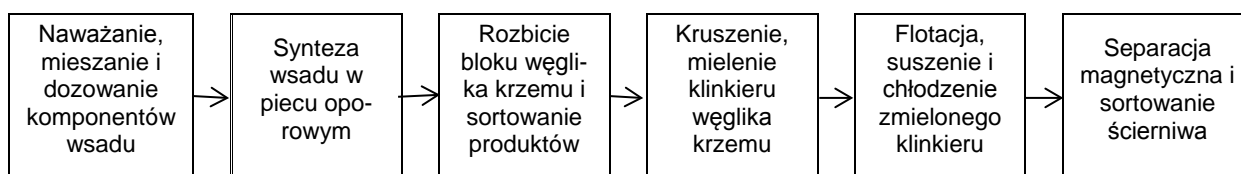
Rys.3. Schemat syntezy czarnego węgla krzemu [7,8,14]



Rys. 4 Widok klinkieru czarnego węgla krzemu 98C



Rys 5. Widok klinkieru siloksonu czarnego węgla krzemu 98C



Rys. 6. Schemat procesu technologicznego wytwarzania ścierniw z czarnego węgla krzemu [7,8,14]



Rys. 7. Widok pieca oporowego Achesona podczas syntezy czarnego węgla krzemu [8] /zdjęcie: Andrzej Skorski/

Jakkolwiek zielony węgiel krzemu różni się krystalograficznie od czarnego wyższą zawartością politypu 6H, to jednak proces jego produkcji jest zbliżony do procesu produkcji czarnego węgla krzemu. Zasadnicze różnice procesów technologicznych obu tych gatunków węgla krzemu polegają na stosowaniu surowców wsadowych o większej czystości i dodaniu do nich soli kuchennej NaCl lub specjal-

nych mieszanek w których występuje ona jako składnik główny w odniesieniu do produkcji zielonego węgla krzemu. Pomimo tego, że pierwsza synteza zielonego węgla krzemu miała miejsce ponad 100 lat temu to zdaniem K. Woźniaka sposób oddziaływania NaCl na syntezę SiC nie został dotychczas w pełni wyjaśniony [7]. W drugiej połowie ubiegłego wieku pojawiła się ciekawa propozycja produkcji

zielonego węgla krzemu z surowych łusek ryżu, zbudowanych zasadniczo z celulozy. Według opisu Nutta z 1988 roku, ogrzewanie surowych, granulowanych łusek ryżu w piecu do koksowania prowadzi do tworzenia się produktów w stanie amorficznej krzemionki i węgla. Podczas ich dalszego ogrzewania w zakresie temperatur od 1974 - 2074 K zachodzą między innymi charakterystyczne reakcje syntezy poprzez fazę gazową (krzemionki z węglem i tlenku krzemu z węglem), dysocjacja SiO_2 i wtórna reakcja z węglem w rezultacie czego powstają krystaliczne cząstki zielonego węgla krzemu [15]. Aktualnie trwają prace badawcze w zakresie znalezienia właściwego katalizatora przyspieszającego ten proces. Kolejnym, współcześnie produkowanym ścierniwem z węgla krzemu jest monokrystaliczny węgiel krzemu. Pomimo bardzo dobrych właściwości fizykochemicznych (tab.2), otrzymywany jest na świecie w skali ilościowo 20 – krotnie mniejszej niż czarny i zielony węgiel krzemu rozpatrywany łącznie. Na przyczyny takiego stanu rzeczy zwrócił uwagę J. Borkowski wskazując na fakt braku ciekłej fazy roztworu $\alpha\text{-SiC}$ w warunkach ciśnienia normalnego. Faza ta występuje dopiero w temperaturze 3300K przy ciśnieniu 17 MPa. Zachowanie takich warunków pod-

czas długotrwałego wzrostu kryształów jest w praktyce niemożliwe do osiągnięcia [6]. Dlatego poszczególni producenci monokrystalicznego węgla krzemu opracowali kilka różnych technik jego wytwarzania, które faktycznie stanowią „know-how” producentów. Ogólnie można stwierdzić, że monokryształy $\alpha\text{-SiC}$ można wytwarzać na skalę przemysłową bądź to w warunkach pirolitycznego rozkładu gazów zawierających krzem i węgiel w atmosferze wodoru przez osadzanie kryształów na podgrzany podłożu grafitowym w temperaturze powyżej 2400K, bądź też przez sublimację wstępnie spieczonego, gruboziarnistego węgla krzemu w stan gazowy w temperaturach od 2874 do 3124K z następującą po niej kondensacją w tyglach grafitowych z perforowanymi wkładkami umieszczonych w piecach Achesona [6]. Ziarna ściernie z monokrystalicznego węgla krzemu mają kształt sześciokątnych płytek z dwoma płaskorównoległymi, lustrzanymi powierzchniami o barwie czarno – zielonej (rys. 8) Jako ścierniwo znajdują zastosowanie do produkcji ściernic i taśm ściernych o regularnej orientacji i rozmieszczeniu ziaren ściernych na czynnych powierzchniach narzędzia bądź też jako komponent ścierniw mieszanych.

Tab. 2. Podstawowe właściwości ziaren ściernych z monokrystalicznego węgla krzemu [8]

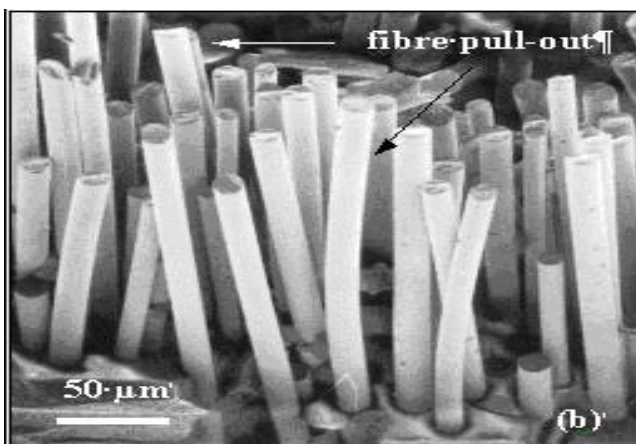
L.p	Rodzaj właściwości	Jednostka miary	Monokrystaliczny węgiel krzemu
1.	Gęstość	g/cm^3	3,25
2.	Porowatość	%	0
3.	Wytrzymałość na ściskanie R_c (dla różnych kierunków posadowienia ziarna)	MPa	1500/2500
4.	Skład chemiczny	% obj. SiC Si + SiO_2 Wolne C	- min 99,95 - ilości śladowe - ilości śladowe
5.	Mikrotwardość $\text{HV}_{0,5}$ (dla różnych położeń penetratora)	GPa	24/27/29
6.	Maksymalna temperatura skrawania (w zależności od położenia ostrza względem powierzchni PO)	K	1800/1880

Należy zaznaczyć, że wielu producentów ziaren ściernych z monokrystalicznego węgla krzemu pozyskuje te ziarna techniką mechanicznej segregacji klasycznych ścierniw z czarnego węgla krzemu, które zawierają od 5 do 10% płytek monokrystalicznych w zależności od wymiaru ziarna. Różne techniki wibracyjnego, sitowego i walcowego

segregowania ziaren ściernych monokrystalicznego węgla krzemu zostały szczegółowo omówione w monografiach J. Borkowskiego i K. Woźniaka [6,16]. Jest to technika znacznie prostsza i tańsza od poprzednio omówionych, jednak jakość ścierniwa jest niekiedy gorsza (ziarna nie w pełni wykryształizowane i niekiedy spękane).



Rys.8. Widok ziaren z monokrystalicznego węgla krzemu w klinierze 98C



Rys. 9. Amorficzne włókna SiC (Nicalon) [19]

Kolejną grupę ścierniw z SiC stanowią obecnie amorficzne mikrowłókna z węgla krzemu, zbudowane z tysięcy ultradispersyjnych kryształów β – SiC o wymiarach 2 nm i charakteryzujące się nie tylko wysoką twardością, ale także silnymi wiązaniami kowalencyjnymi, ponieważ wysoka twardość jest konsekwencją tych wiązań. W Polsce znane są pod nazwą handlową Nicalon. Ich podstawowe właściwości przedstawiono w tabeli 3. W odmianie Nicalon cechują się dużą sztywnością i kruchością. W fazie laboratoryjnej próbuje się wykorzystać je jako ścierniwa promieniowo oriento-

wane w ściernicach do polerowania (rys.9). W przeciwieństwie do nich monowłókna SiC, często o powierzchniach zabezpieczonych powłokami z węgla pirolitycznego wykorzystuje się jako wzmocnienie korpusów ściernic do szlifowania wg techniki HSG (High Speed Grinding). Włókna SiC otrzymuje się przy zastosowaniu metody chemicznego osadzenia z fazy gazowej CVD (Chemical Vacuum Deposition). Jako prekursorów wykorzystuje się włókna wolframowe lub węglowe, na które nanosi się węgiel krzemu w procesie CVD[3,4,5,15]

Tab. 3 Właściwości włókien SiC [4, 17]

L.p	Wielkości	Jednostka miary	Nicalon	Monowłókna SiC
1	2	3	4	5
1.	Średnica włókien	μm	12	100 ÷ 150
2.	Długość włókien	μm	300 ÷ 500	4000 ÷ 6000
3.	Gęstość ρ	g/cm^3	2,60	3,00 ÷ 3,05
4.	Wytrzymałość na rozciąganie Rm	MPa	2200	2920 ÷ 3450
5.	Współczynnik sprężystości wzdłużnej E (Younga)	GPa	250	400 ÷ 406

W pierwszej połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku podjęto próbę wytwarzania ziaren ściernych ze spiekane w kształcie wałków i graniastosłupów czarnego węgla krzemu (rys. 10). W procesie wytwarzania zastosowano tzw. technologię „mokrą”, bardzo zbliżoną do stosowanej przy produkcji korundu spiekane pod ciśnieniem atmosferycznym, z tą oczywiście różnicą, że jako materiały wsadowe użyto głęboko rozdrobniony węgiel krzemu (submikroziarna < od 0,8 μm), o wysokiej czystości chemicznej (suma zanieczyszczeń < od 0,5%), pokryty powierzchniowo

węgłem (ca. 4% obj.), z niewielką ilością węgla boru B_4C lub samego boru [2,3,5]. Po przefiltrowaniu, odpowietrzeniu i wyłoczeniu masy uformowane ziarna spiekano w temperaturze ca 2500K, w atmosferze argonu. Ścierniwo takie oznaczono symbolem SSiC. W celu polepszenia właściwości takiego ścierniwa zastosowano również spiekanie pod ciśnieniem izostatycznym. Podstawowe właściwości obu odmian ścierniw ze spiekane węgla krzemu przedstawiono w tabeli 4.

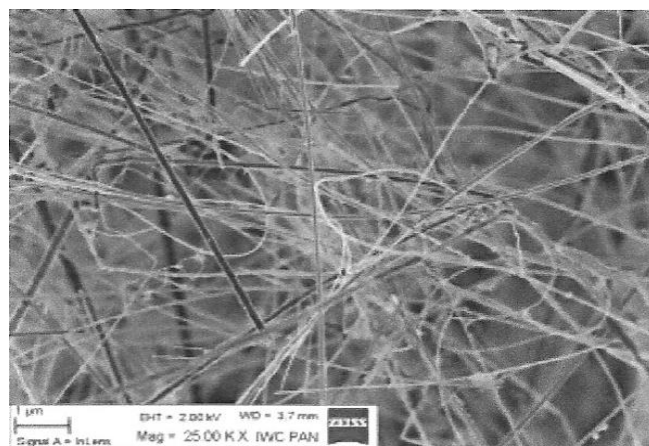
Tab. 4. Właściwości ścierniw ze spiekane węgla krzemu [4, 17].

L.p	Wielkości	Jednostki Miary	SSiC	Spiekany pod ciśnieniem izostatycznym
1	2	3	4	5
1.	Średnica ziaren o numerach 12÷24	mm	2,1÷1	1,9÷0,9
2.	Długość ziaren o numerach 12÷24	mm	4÷2	3,7÷1,8
3.	Gęstość	g/cm^3	3,06÷3,15	3,21
4.	Porowatość	%	<2	0
5.	Twardość $\text{HV}_{0,5}$	GPa	<25	25
6.	Współczynnik sprężystości wzdłużnej E (Younga)	GPa	380-420	440-450
7.	Wytrzymałość na ściskanie Rc	MPa	<2000	2000



Rys.10. Ziarna ściernie ze spiekane czarnego węgla krzemu (SSiC)

Próby implementacji ścierniw ze spiekane węgla krzemu do szlifowania wysokonaciskowego, bloków, kęsów i kęsisk ze stali odpornych na korozję o strukturze austenicznej, nie powiodły się, tak z przyczyn ekonomicznych



Rys.11 Nanowłókna (ultrawiskery) SiC [13]

(ścierniwo znacznie droższe od korundu spiekane) jak i technicznych (ścierniwo podatne w temperaturze powyżej 1274 K na utlenianie i rozkład w obecności tlenków Cr_2O_3 , Fe_2O_3 i MnO) [14] Kolejnym krokiem w rozwoju ścierniw z

węgliku krzemu było wytworzenie mikrowłókien (whiskerów) SiC, a następnie nanowłókien (ultrawhisckerów) SiC (rys. 11) Porównanie podstawowych właściwości obu rodzajów włókien SiC, przedstawiono w tabeli 5.

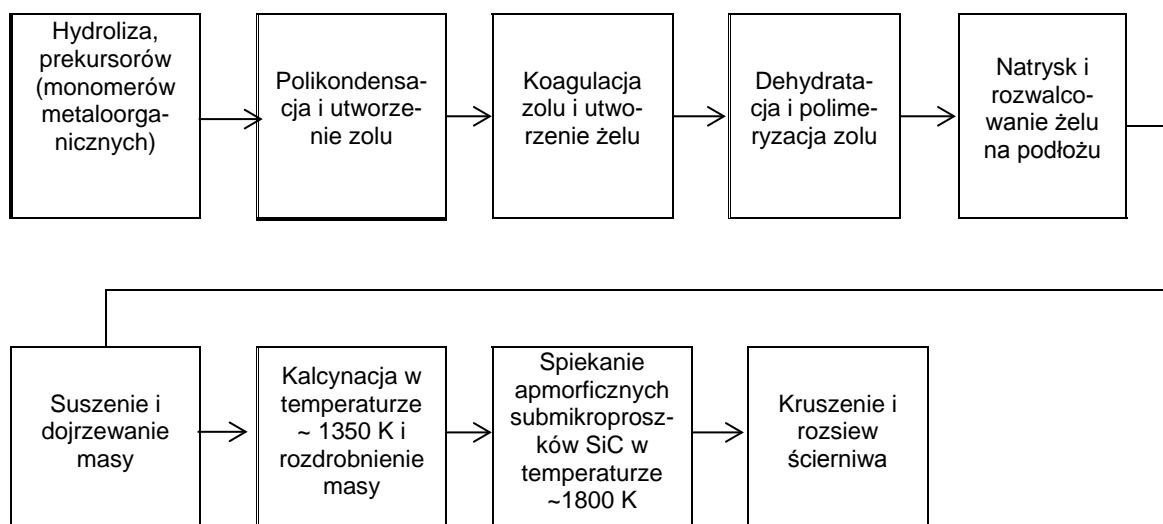
Tab. 5. Właściwości mikro – i nanowłókien SiC [9,11,13,20]

L.p	2	3	Mikrowłókna SiC	Nanowłókna SiC
1	Średnica whiskerów	μm	1÷2	0,1÷0,2
2	Długość whiskerów	μm	50÷100	5÷50
3	Gęstość	g/cm ³	3,19	2,89
4	Wytrzymałość na rozciąganie Rm	GPa	14	24
5	Współczynnik sprężystości wzdłużnej E	GPa	700	490

Mikrowłókna SiC znajdują zastosowanie do wytwarzania niewielkich ściernic trzpieniowych, służących do tępienia ostrych krawędzi otworów o niedużych średnicach, występujących powszechnie w częściach i podzespołach aparatury hydraulicznej, pneumatycznej i pneumonicznej. Natomiast nanowłókna SiC próbuje się wykorzystać do zwiększenia ciągłości ziaren ściernych mikrokryształicznego korundu i mikrokryształicznego węgliku krzemu [18]. Zarówno mikrowłókna jak i nanowłókna SiC mogą być, produkowane przy zastosowaniu kilku różnych metod wytwarzania, ale najczęściej mikrowłókna SiC produkuje się metodą para-ciecz-kryształ, zwaną FLS (vapour-liquid-solid), a nanowłókna SiC metodą syntezy spaleniowej SHS (Self-propagating High-Temperature Synthesis), prowadzonej w zmodyfikowanej bombie kalorymetrycznej po zainicjowaniu przez przyłożenie napięcia do elementu oporowego umieszczonego w proszkowej mieszaninie reagentów (krzem + teflon). Technologią takiego otrzymywania nanowłókien SiC

szczegółowo opisano w kilku artykułach A. Huczko i współautorów [11,12,13]. Nanowłókna węgliku krzemu można też otrzymać w reakcji metanu z silanem ($\text{CH}_4 + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiC} + 4\text{H}_2 \uparrow$) w silnie egzotermicznej, osiowo ukierunkowanej reakcji [12].

W roku 2008 F. Aldinger i V.A. Weberruss opracowali technologię otrzymywania submikroproszków węgliku krzemu przy zastosowaniu metody zol-żel [3]. Docelowo submikroproszki te służyć mogą do produkcji mikrokryształicznego, spiekane węgliku krzemu, jednak dotychczas wizja ta nie wykroczyła poza fazę badań laboratoryjnych. Ponieważ mikrokryształiczny, spiekany węgiel krzemu wytworzyć można tylko z materiałów wyjściowych o bardzo wysokiej czystości i jednorodności, przetwarzanych na zol o właściwym składzie stechiometrycznym dlatego też submikroproszki, cechują się barwą białą. Uogólniony schemat procesu wytwarzania mikrokryształicznego, spiekane węgliku krzemu przedstawiono na rys.12.



Rys. 12. Uogólniony schemat procesu wytwarzania mikrokryształicznego spiekane węgliku krzemu -opracowanie własne na podstawie [3,5,10]

Nieznane są przyczyny, dla których żaden ze światowych potentatów produkcji ścierniwi nie oferuje w swych katalogach firmowych ziaren ściernych z mikrokryształicznego, spiekane węgliku krzemu. Można tylko przypuszczać że przyczyną jest walka o prawa własności intelektualnej albo trudności z rozrostem ziaren ściernych podczas spiekania. Ostatnim elementem w łańcuchu rozwoju ścierniwi z węgliku krzemu jest nanokryształiczny SiC. Próby wytworzenia tego ścierniwa prowadzone są intensywnie od kilku lat w laboratoriach wielu państw świata, w tym także w Polsce w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. Oczekuje się, że ziarna

ściernie nanokryształicznego węgliku krzemu zbudowane będą z krystalitów α – SiC o wymiarach od 1 do 100 nm i cechować się będą twardością istotnie wyższą od twardości zielonego węgliku krzemu (10,8 zamiast 9,7 w nowej skali Mohsa). Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że nanokryształiczny węgiel krzemu może być wytwarzany zarówno przy wykorzystaniu wybranych metod klasy bottom – up (atom po atomie) jak i klasy top – down (rozdrobnienie cząstek). Z sygnałnych informacji literaturowych wynika, że w obszarze metod pierwszej klasy najbardziej obiecujące efekty uzyskuje się przy zastosowaniu osadzania z fazy

gazowej (PVD – physical vapour deposition, CVD – chemical vapour deposition) lub epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych czyli MOVPE (metaloorganic vapour phase epitaxy) Podstawową wadą syntezy nanokrystalicznego węgla krzemu przy zastosowaniu wymienionych metod jest niezbyt duża szybkość osadzania się warstw na podłożu (1 do 3 μm na godzinę). Natomiast w obszarze metod drugiej klasy obiecującym rozwiązaniem wydaje się być metoda łącząca cechy wyciskania hydrostatycznego (HE – Hydrostatic extrusion) i sitodruku umożliwiającą rozdrobienie nanoproszków SiC do wymiarów 50÷80 nm [1,2]

Podsumowanie

Powszechnie wydaje się, że rozwój pierwszego w świecie ścierniwa syntetycznego tj. węgla krzemu zakończył się na ziarnach monowęgla krzemu i mikrowłóknach SiC. Tak jednak nie jest! Przedstawione w tym artykule trendy dalszego rozwoju ścierniwi z tego rodzaju materiału ściernego świadczą o tym, że może on wkrótce powtórzyć drogę rozwoju korundów spiekanych. Opanowany bowiem został proces technologiczny produkcji spiekanego węgla krzemu (tzw. karborundu spiekanego), a proces wytwarzania nanowłókien SiC (nanowhiskerów) ustalony został w skali ćwierćtechnicznej. Trwają równocześnie wielowariantowe, intensywne badania laboratoryjne w obszarze uzyskania ścierniwi z mikrokrystalicznego oraz nanokrystalicznego węgla krzemu. Podstawowe problemy techniczne w procesach wytwarzania tych dwóch ostatnich z wymienionych gatunków węgla krzemu są sukcesywnie rozwiązywane, równoległe z poszukiwaniem nowych obszarów ich zastosowań. Aktualnie nadal jednak poważnym problemem pozostaje efektywność ekonomiczna ewentualnego uruchomienia produkcji ścierniwi z mikro – i nanokrystalicznego węgla krzemu.

LITERATURA

1. Kelsall R.W., Hamley I.W., Geoghegan i inni Nanotechnologie. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2009
2. Koch C.C., Nonstructured Materials. Processing, Properties and Applications, institute of Physics, 2002
3. Aldinger F., Weberuß V.A., Advanced Ceramics and Future Materials, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2010
4. Kaczorowski M., Krzyńska A., Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe. Ofic. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2008
5. Pampuch R., Współczesne materiały ceramiczne. Uczelniane Wyd. Nauk. – Dydak. AGH, Kraków 2005
6. Borkowski J., Podstawy stosowania monokrystalicznych ziarn węgla krzemu w obróbce ścierniej. Wyd. WSI, Koszalin 1979
7. Woźniak K., Materiały ściernie – wytwarzanie i własności. WNT, Warszawa 1982
8. Katalogi i prospekty FMIWŚ „Korund” Materiały i narzędzia ściernie. Wyd. „WEMA”, Wyd. „Opal”, Warszawa 1998
9. Wysiecki M., Nowoczesne materiały narzędziowe. WNT, Warszawa 1997
10. Oczó K.E., Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych. Ofic. Wyd. Polit. Rzesz., Rzeszów 1996
11. Huczko A., Dąbrowska A., Soczyński M., Cudziło S., Nanowłókna węgla krzemu SiC i produkcja, charakteryzacja, zastosowania. Dostęp: 8.02.2015, www.google.pl/science/24.com
12. Pielaszek R., Węgiel krzemu SiC. Dostęp: 22.03.2015, www.google.pl/science24.com/phd-pielaszek/phd.html/atex/node
13. Dąbrowska A., Deuszkiewicz P., Huczko A., Nanokompozyty SiC / żywica epoksydowa – nowy materiał konstrukcyjny w przemyśle jachtowym, Przegląd Mechaniczny nr 5'13, IMBiGS, Warszawa 2013, s. 40 - 44
14. Katalogi i prospekty firmy 3M. Minnesota 1988-2008
15. Nadachowski F., Jonas S., Ptak W., Wstęp do projektowania technologii ceramicznych. Uczeln. Wyd. Nauk. AGH, Kraków 1999, s. 293-295
16. Woźniak K., Podstawy procesu wytwarzania ziarn ściernych w aspekcie regulowania ich kształtu. Wyd. Uczeln. WSI w Koszalinie, Koszalin 1982
17. Matthews F.L., Rawliger R.D., Composite Materiale, Engineering and Science, Chapman & Hall, London 1994
18. Katalogi i prospekty firmy Xebec Technology, 2010
19. KU LEUVEN Nederlands., Overview of Materials under Investigation., Dostęp: 25.04.2015 <https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Ceramics/Materials>
20. Brechignac C., Houdy P., Lahmani M., "Les nanosciences-Nanomateriaux et nanochimie", Edit. 2, Belin, France 2015