

# Węgiel szklisty – nowa postać węgla do zastosowań przemysłowych

## WSTĘP

Węgiel występuje w wielu postaciach, lecz tylko dwie z nich: diament i grafit są całkowicie scharakteryzowane; obie też występują w przyrodzie. Dla potrzeb przemysłowych wytwarza się wiele odmian węgla i grafitów przez ogrzewanie bez powietrza mieszanin koksu i smoły /paku/ do temperatury około 1200°C /węgle spiekane/ lub około 2500°C /grafity/. Produkty te składają się z granulowanych materiałów, a ich struktura i właściwości są zależne od zawartości ziarn koksu i pozostałości węglowej powstałej w wyniku karbonizacji paku, jak również od wysokości temperatury obróbki cieplnej. Wytwarzane przemysłowo grafity wykazują widoczną anizotropię właściwości mechanicznych.

Szybki rozwój w zakresie syntezy wielkocząsteczkowych polimerów spowodował możliwość otrzymywania nowych typów węgla. Nową postacią przygotowywaną przez rozkład termiczny polimerów organicznych jest "węgiel szklisty", nazywany tak z powodu jego podobieństwa do szkła – z wyglądu /wysoki połysk i muszlowaty przełom/ i struktury. Węgiel szklisty wykazuje wiele dodatnich cech w stosunku do grafitu i węgla otrzymywanych przez grafityzację. Wytwarzanie, struktura, właściwości i potencjalne zastosowania tej postaci węgla są przedmiotem niniejszego opracowania.

## 1. WYTWARZANIE

Generalnie proces otrzymywania węgla szklistych składa się z trzech głównych stadiów:

- 1/ nadawania kształtu z wybranej żywicy przez prasowanie przetłoczone lub wtryskiwanie do matrycy,
- 2/ karbonizacji wyprasek w obojętnej atmosferze do 900°C przez okres około dwu tygodni,
- 3/ końcowego wypalania wyrobu w piecu próżniowym do temperatury 1800 °C lub wyższej przez okres jednego tygodnia.

Proces wypalania jest tutaj najtrudniejszym i najdroższym etapem technologicznym. Podczas tego etapu następuje wydalenie gazów o objętości ~ 600 razy większej od objętości wyjściowej żywicy /musi być zatem ściśle kontrolowane/ i towarzyszy mu około 20-procentowa skurczliwość.

Obecnie na świecie produkuje się wiele typów węgla szklistych. Ze względu na stosowane różne surowce wyjściowe i metody wytwarzania noszone różne nazwy handlowe /tabl. 1/.

Tablica 1

Produkowane obecnie węgle szkliste

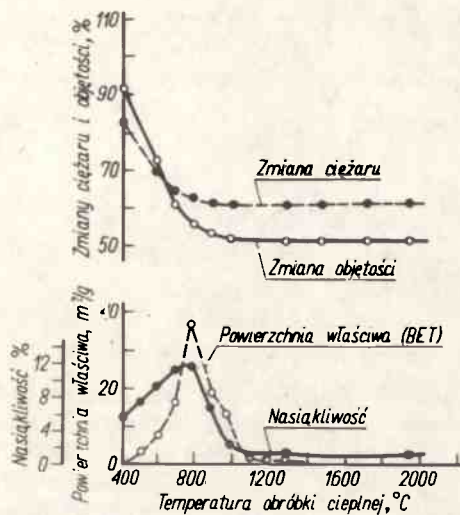
Nazwa handlowa	Wytwórca
Carbone Vitreux Cellulose Carbon Glassy Carbon Vitreous Carbon Vitrocarbon	Le Carbone-Lorraine, Francja General Electric Co., Anglia Tokai Electrode Mfg. Co., Japonia Vitreous Carbon Ltd., Anglia Nippon Carbon Co., Japonia

Uwaga. LMSC Glassy Carbon jest wytwarzany w skali laboratoryjnej przez Lockheed Missile and Space Co., USA

Cellulose Carbon [1, 2] jest wytwarzany z proszku celulozowego, który po zdyspergowaniu w wodzie i centrifugowaniu umożliwia uzyskanie wyrobu o konkretnym kształcie. Po procesie suszenia wyrób jest wystarczająco wytrzymały, tak że może być obrabiany mechanicznie w celu zachowania dokładności wymiarowych, a następnie ogrzewany do około 500°C pod ciśnieniem 140 kG/cm<sup>2</sup>. Kolejnym i ostatnim etapem jest tutaj wypalanie końcowe w temperaturach pomiędzy 1300 a 3000°C pod ciśnieniem atmosferycznym. Tubularne pory o średnicy 500 Å tworzące się podczas rozkładu celulozy maleją ze wzrostem temperatury obróbki cieplnej, tak że węgiel szklisty otrzymany po wygrzewaniu w około 1500°C ma już jednorodną strukturę o nieznacznej zawartości por o wielkości 20-1000 Å [3].

Materialami wyjściowymi do wytwarzania węgla szklistego o nazwie handlowej Glassy Carbon są termoutwardzalne żywice, takie jak: alkohol furfurylowy [4] lub żywice fenolowo-formaldehadowe. Z żywicy osiąga się żądany kształt przez wielokrotne nanoszenie na pierwowzór, wyciąganie i inne techniki typowe dla przemysłu tworzyw sztucznych. Po obróbce mechanicznej /jeśli jest konieczna/ wyrób wykonany z żywicy jest poddawany procesowi karbonizacji, początek której obserwuje się w około 800°C. Podczas tego procesu widoczne są istotne zmiany w teksturze. Ilustracją tych zmian mogą być wyniki pomiarów względnej powierzchni właściwej metodą BET w funkcji temperatury /rys. 1/. Zmiany te również wpływają na istotne obniżenie się ciężaru i objętości [5, 6]. Nagły spadek ciężaru i objętości do 800°C jest spowodowany rozkładem materiału wyjściowego, czemu towarzyszy duży skurcz. Powolne obniżanie się objętości powyżej 800°C koresponduje ze stopniowym zanikiem porowatości. Ciężar nie wykazuje tutaj prawie żadnych zmian. Maksimum nasiąkliwości po obróbce w 800°C może być porównywane z porowatością struktury w tej temperaturze.

Rothwell [7] mierzył kształt i objętość por w Glassy Carbon po obróbce cieplnej w 1000, 2000 i 3000°C. Zgodnie z jego badaniami węgiel szklisty otrzymany po wygrzewaniu do temperatury 3000°C posiadał pory sferyczne, prawie jednorodne w wymiarze i o średnicy ok. 50 Å, których objętość całkowita była równa ok. 1/3 całkowitej objętości.



Rys. 1. Zmiany ciężaru, objętości, powierzchni właściwej /BET/ i nasiąkliwości węgla szklistego Glassy Carbon z temperaturą obróbki cieplnej [5, 6]

Vitreous Carbon jest produkowany przez formowanie żywic fenolowo-formaldehydowych i ich karbonizację [8]. Z mieszaniny acetonu i furfurołu jest wytwarzany Vitrocarbon [9], zaś LMSC Glassy Carbon - przez karbonizację pod ciśnieniem 140-700 kG/cm<sup>2</sup> tionaftolu [10]. Otani otrzymał węgiel bliski szklistemu z paku, modyfikowanego przez działanie tlenem lub ozonem [11].

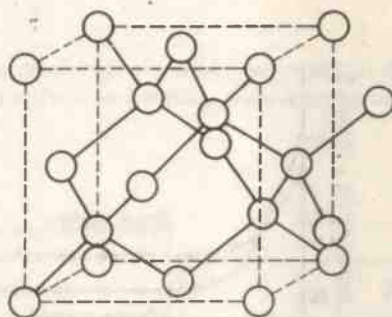
Wykonywana jest również włóknista postać węgla szklistego przez snucie z mieszaniny żywic termoutwardzalnych [12] lub modyfikowanych paków [11]. Włókna z węgla szklistego mają wysoką wytrzymałość i bardziej izotropową strukturę niż inne włókna węglowe. Do specjalnych zastosowań produkuje się także porowatą odmianę węgla szklistego [13].

Węgłe szkliste są trudne do obróbki, wobec czego wyrób wykonywany z celulozy lub żywic jest, jak już wspomniano, obrabiany przed karbonizacją dożądanego kształtu z uwzględnieniem skurczliwości występującej w wyniku karbonizacji. Gdy wymagana jest szczególnie wysoka dokładność, niejednokrotnie obrabia się je po karbonizacji przy użyciu techniki ultradźwiękowej lub przez polerowanie z proszkiem SiC.

## 2. STRUKTURA WĘGLA SZKLISTEGO I INNYCH WĘGLI

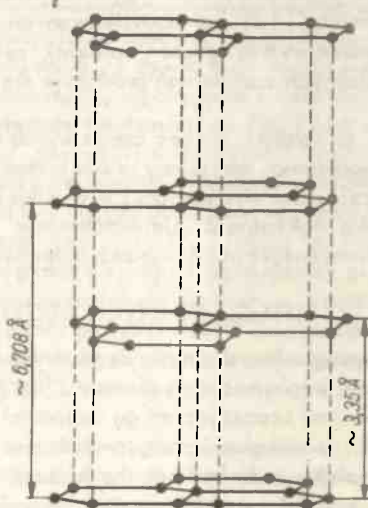
Najdoskonalszą postacią węgla jest diament. Jego strukturę krystaliczną przedstawiono na rys. 2. Każdy atom węgla w siatce diamentu jest połączony wiązaniami kowalencyjnymi z czterema innymi otaczającymi go sąsiadami rozmieszczonymi w narożach regularnego tetraedru z odległością międzyatomową 1,54 Å.

Tego rodzaju ułożenie atomów może być opisane jeszcze inaczej, a mianowicie sieć diamentu można traktować jako składającą się z dwu sieci kubicznych płaskoscentrycznych przenikających się nawzajem. Twardość, wysoka gęstość i wysoki punkt topnienia diamentu wynikają z silnych wiązań kowalencyjnych łączących atomy węgla.



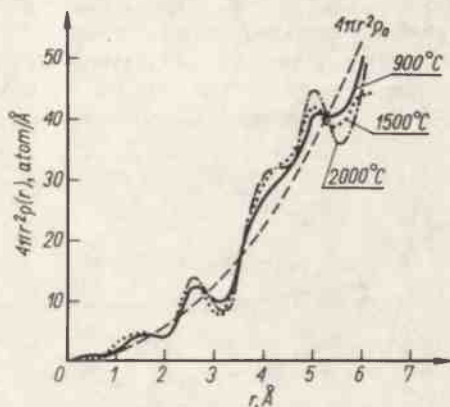
Rys. 2. Struktura krystaliczna diamentu

Grafit - w przeciwieństwie do diamentu - ma wyraźną budowę warstwową. W obrębie poszczególnych warstw każdy atom węgla tworzy 3 wiązania kowalენტne, zaś poszczególne warstwy łączą się ze sobą dzięki działaniu sił międzycząsteczkowych. Wiązanie między warstwami jest więc słabe, co doskonale tłumaczy łatwą łupliwość i miękkość grafitu /rys.3/. Odległość między przyległymi warstwami, jak widać z rys. 3, wynosi w przybliżeniu  $3,35 \text{ \AA}$ , zaś pomiędzy atomami w warstwie  $1,42 \text{ \AA}$ . Warstwy mogą być ułożone tak, że połowa atomów węgla w jednej warstwie leży pod punktem środkowym sześcioboku drugiej warstwy, atomy zaś trzeciej warstwy są usytuowane dokładnie tak samo jak w warstwie pierwszej. Jest to ułożenie typu ABAB lub struktura heksagonalna. Natomiast struktura, w której ułożenie trzeciej warstwy w stosunku do drugiej jest takie same, jak drugiej w stosunku do pierwszej, jest ułożeniem typu ABCABC lub strukturą romboedryczną i występuje w większości próbek grafitu. Struktura heksagonalna jest bardziej stabilna i może w wyniku ściskania częściowo przechodzić w romboedryczną, jednakże podczas ogrzewania do  $2000\text{--}3000^\circ\text{C}$  przejście jest odwrotne.



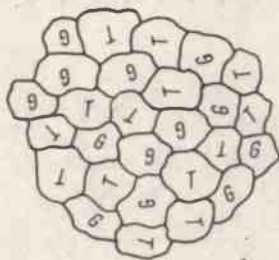
Rys. 3. Struktura krystaliczna grafitu

Struktura węgla szklistych nie jest jeszcze dokładnie zdefiniowana. Na bazie studiów nad Glassy Carbon były proponowane trzy różne modele. Pierwszą propozycję dotyczącą tego gatunku węgla podali Noda i Inagaki [14] oraz Furukawa [15]. Dla Glassy Carbon ogrzewanego do różnych temperatur w zakresie 500-3000°C otrzymali oni krzywą rozkładu radialnego atomów przedstawioną na rys. 4.



Rys. 4. Krzywa rozkładu radialnego atomów w Glassy Carbon [14]

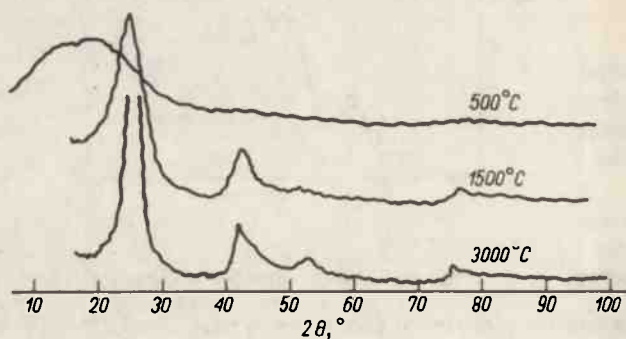
Na podstawie analizy pierwszego pików krzywej sugerowali, iż trójwymiarowa sieć atomów węgla szklistego składa się z dwóch typów węgla: jednych - mających koordynację tetraedryczną  $/sp^3/$  - domeny T i drugich - mających koordynację trygonalną  $/sp^2/$  - domeny G, w stosunku do swych najbliższych sąsiadów /rys. 5/. Odległość



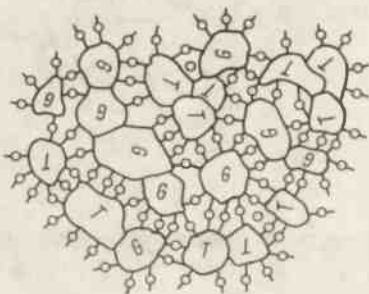
Rys. 5. Strukturalny model węgla szklistego proponowany przez Nodę i Inagaki [14] oraz Furukawę [15]; T - domeny tetraedyczne, G - domeny grafityczne

między sąsiadami w domenach T wynosi, zdaniem autorów, 1,55 Å, co wskazuje na normalne pojedyncze wiązania kowalencyjne, tymczasem w domenach G odległość ta wynosi 1,42 Å /tak jak w graficie/. Zawartość trygonalnych atomów węgla w węglu szklistym wzrasta ze wzrostem temperatury obróbki cieplnej, przy czym konsekwentnie maleje ilość tetraedrycznych atomów węgla, co potwierdzałyby linie  $/C02/$  w rentgenogramie na rys. 6. Przedstawiony model węgla szklistego jest podobny do proponowanego przez Kakinoki, Katada, Honowa oraz Ino [16] na podstawie badań nad cienkimi warstwami węgla. Model ich składał się również z dwóch typów domen, z których

każda zawierała tetraedryczne lub trygonalne atomy węgla, powiązane mostkami tlenowymi z sąsiednimi domenami /rys. 7/. Założenie obecności mostków tlenowych wydaje się być zgodne z wynikami otrzymanymi przez Yamadę [17], który stwierdził w węglu szklistym zawartość tlenu w ilościach ok. 5-6%. W modelu tym mostki tlenowe były odpowiedzialne za niską gęstość Glassy Carbon i niski stopień grafityzacji w temperaturach poniżej 1100-1200°C. Shimada i Kikuchi [17] informowali, że niektóre próbki węgla szklistego wskazywały na nieznaczny wzrost przewodności elektrycznej we wczesnych stadiach bombardowania neutronami. Fakt ten mógł być wyjaśniony przez powyżej przedstawiony model, jeśli przyjmie się, że mostki tlenowe są częściowo niszczone podczas bombardowania. Usunięcie mostków tlenowych umożliwiałoby zachodzenie grafityzacji i prowadzi do wzrostu przewodnictwa elektrycznego.



Rys. 6. Rentgenogramy węgla szklistego [14]



Rys. 7. Strukturalny model węgla szklistego proponowany przez Kakinoki i pozostałych [16]; T - domeny tetraedryczne, G - domeny graficzne, o - mostki tlenowe

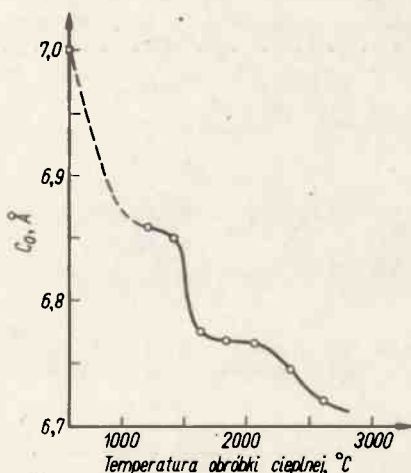
Takahashi i Westrum [18] znaleźli  $T^2$  - zależność ciepła właściwego Glassy Carbon ogrzewanego do temperatury 3000°C. Fakt ten sugerowałby, że węgiel szklisty zawiera głównie warstwową sieć. Model Furukawy nie korespondowałby zatem z tymi

sugestią. Obserwowane eksperymentalnie wyniki wyjaśniałyby model Noda, Inagaki i Yamada [19], w którym grafitopodobne warstwy trójwymiarowe są połączone wiązaniami tetragonalnymi C-C bez uporządkowania, co powoduje izotropowość, jednorodność i niską gęstość węgla szklistego. W ogrzewanym w niskich temperaturach Glassy Carbon zgodnie z tym modelem rozmiar grafitopodobnych obszarów /trygonalnych/ jest mały, zaś zawartość łączących atomów węgla jest relatywnie wysoka. Rozmiar obszarów grafitopodobnych wzrasta jednakże z temperaturą obróbki cieplnej, a zawartość wiążących atomów węgla maleje. Wysoka wytrzymałość, twardość i nieprzepuszczalność węgla szklistego są, zdaniem autorów [19], wynikiem wysokiej zawartości atomów węgla wiążących grafityczne domeny w trójwymiarową sieć bez uporządkowania. Wysoka zawartość wiążących atomów węgla jest również głównym powodem niegrafityzowalności Glassy Carbon.

Zmiany strukturalne węgla szklistego z oddziaływaniem cieplnym badano na Cellulose Carbon [3, 20], Viterous Carbon [21] i Glassy Carbon [14]. Wyniki otrzymane dla tych trzech materiałów były podobne, o zatem dyskusja nad modelem strukturalnym może być zastosowana do wszystkich typów węgla szklistych. Węgłe te są typowymi węglami szklistymi, słabo grafityzowalnymi w wysokich temperaturach.

Dyfrakcja rentgenowska Glassy Carbon wskazuje tylko kilka szerokich linii /rys. 6/. Wymiar  $c_0$  dla Glassy Carbon po obróbce w 3000°C wynosi 6,81 Å, co wskazuje, że stopień grafityzacji węgla szklistego jest znacznie niższy niż dla miękkich węgli, takich jak pak naftowy, po obróbce w 3000°C. Jednakże węgiel szklisty /Glassy Carbon/ był grafityzowany przez obróbkę cieplną pod ciśnieniem 10 kbar [22]. Zmiany wymiaru  $c_0$  z obróbką cieplną pod ciśnieniem pokazano na rys. 8. Jak widać, wymiar  $c_0$

obniża się dwustopniowo i osiąga wartość 6,708 Å, równą dla grafitu. Grafityzację zaobserwowano również w węglu szklistym ogrzewanym do 2500°C pod ciśnieniem 5 kbar [23].



Rys. 8. Zmiany wymiaru  $c_0$  Glassy Carbon ogrzewanego w różnych temperaturach pod ciśnieniem 10 kbar przez okres 3 minut [22]

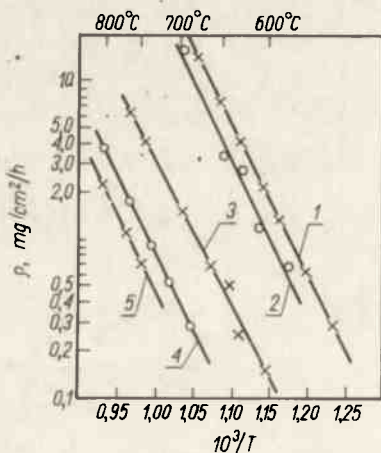
### 3. WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIE

Charakterystyki typowych węgli szklistych zestawiono w tabl. 2. Dla porównania przedstawiono tu również właściwości typowych elektrografityzowanych węgli. Jak widać z tabeli, węgle szkliste mają bardzo podobne właściwości, zaś różnią się istotnie od węgli regularnych.

#### 3.1. Właściwości chemiczne

Jedną z najmniej pożądaných cech węgli i grafitów jest ich niska odporność na utlenianie, gdy tymczasem węgle szkliste są odporne na utlenianie mokre i suche. W mieszaninie kwasu siarkowego i azotowego 1:1 w temperaturze pokojowej, Glassy Carbon nie zmienia się wagowo ani objętościowo nawet po 150 dniach, podczas gdy grafityzowane węgle rozsypują się na drobny proszek już po 50 godzinach [25] - prawdopodobnie na skutek utleniania i tworzenia się blaszkowych połączeń.

Szybkość utleniania w gazach utleniających, takich jak tlen i  $\text{CO}_2$ , jest znacznie niższa dla węgli szklistych niż dla typowych węgli. [21]. Kinetyka utleniania Vitreous Carbon badana w suchym powietrzu wskazuje, iż jest on bardziej odporny niż grafit pirolityczny, który - jak wiadomo - jest najlepszym z wielu węgli ze względu na jego odporność na gazowe utlenianie /rys. 9/. Wyniki półilościowej spektrochemicznej analizy zanieczyszczeń w Glassy Carbon zestawiono w tabl. 3.



Rys. 9. Szybkości utleniania różnych węgli w suchym powietrzu po ogrzewaniu wstępnym w argonie w temp.  $900^{\circ}\text{C}$  [21]:  
1 - grafit typu Morganite EY 9106, 2 - grafit typu Pile - A, 3 - węgiel szklisty - I,  
4 - grafit pirolityczny, 5 - węgiel szklisty - II



Tablica 2

Charakterystyki węgla szklanych [24]

	Gęstość /g/cm <sup>3</sup> /	Porowatość pozorna %/	Gazowo przepuszczalność /cm <sup>2</sup> /s/	Zawartość popiołu /ppm/	Wyrzynalność no zginanie /kG/cm <sup>2</sup> /	Twardość wg Shore'a	Moduł Youngo /kG/mm <sup>2</sup> /	Współczynnik rozszerzalności cieplonej /10 <sup>-6</sup> /°C/	Przewodność ciepła /kal/cm.s °C/	Oporność elektryczna /10 <sup>-4</sup> Ω.cm/
Cellulose Carbon	1,55	-	10 <sup>-12</sup>	-	1800	95	2800	3,4	0,01	40
Glassy Carbon GC-10	1,48-1,51	0,2-0,4	10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-12</sup>	1000-2000	900-1000	110-120	3000-3500	2,0-2,2	0,009-0,011	45-50
Glassy Carbon GC-20	1,47-1,50	1-3	10 <sup>-10</sup> -10 <sup>-12</sup>	1000-2000	1000-1200	100-110	3000-3300	2,0-2,2	0,020-0,022	40-45
Glassy Carbon GC-30	1,44-1,47	3-5	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-9</sup>	70-100	500-600	70-80	2200-2500	2,0-2,2	0,036-0,042	35-40
Carbone Vitreux V10	1,50-1,55	0	10 <sup>-10</sup>	200	1000	120-125	2850	3,2	-	55
Carbone Vitreux V25	1,5-1,55	0	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-8</sup>	50	60-80	120-125	2200	3,2	0,06	45
Vitreous Carbon	1,3-1,5	-	2,5x10 <sup>-11</sup>	50	700-2100	-	-	3,0	0,01-0,02	10-50
Vitrocarbon	1,28	13	10 <sup>-9</sup>	-	-	100-120	-	-	-	200
Vitrocarbon	1,30	12	10 <sup>-9</sup>	-	-	90-110	-	-	-	80
LMSC Glassy Carbon	1,43-1,50	-	-	-	1260	-	1400	-	0,017	-
Węgle elektrofgrafityzowane	1,5-1,8	20-30	10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-1</sup>	100-5000	150-300	3-60	7,0-1000	1-3	0,3-0,4	6,12

## Analizy spektrochemiczne Glassy Carbon [24]

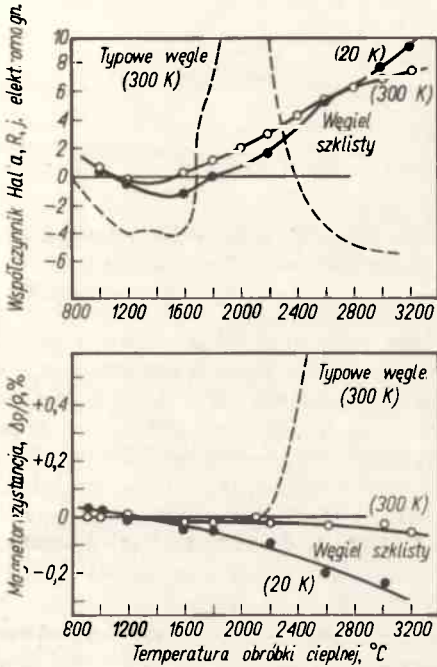
	Temperatura obróbki cieplnej		
	2000°C /ppm/	3000°C /ppm/	3000°C specjalnie czysty /ppm/
Si	5-15	50-100	1,8
Al	20-40	5-15	15,2
Fe	20-40	<5	2,1
Ti	10-20	<5	-
Cu	<5	<5	0,1
Mn	<1	<1	nie wykryto
Ca	300-700	<5	nie wykryto
Mg	<1	<1	0,6
B	<5	<5	0,08
Ba	15-30	<10	-
Na	3-10	3-10	-
K	15-30	<10	-
Ni	<5	<5	nie wykryto
Cr	<5	<5	nie wykryto
V	<5	<5	nie wykryto

Ze względu na niską zawartość zanieczyszczeń i zgodność z wieloma metalami węgle szkliste są szeroko stosowane jako płytki, tygle i łódki o wielu kształtach i rozmiarach w produkcji materiałów półprzewodnikowych. Zastosowanie węgla szklistych w chemii analitycznej omawiano w wielu publikacjach. Naczynia wykonane z węgla szklistego są używane do topienia i wytrawiania w kwasie solnym, alkaliach, czynnikach utleniających i połączeniach ołowiu. Są one lepsze dla tego typu prac niż naczynia z platyny, niklu czy tantal. Elektrody z węgla szklistych - zamiast elektrod platynowych - z powodzeniem stosowano w emisyjnej płomieniowej spektrochemicznej analizie [26], woltometrii [27], oscylopolarografii [24], chromatografii elektrolitycznej [24] i w potencjometrii. Uprzywilejowaną zdolność absorpcji węgla szklistego na specjalne typy gazów wykazywano w wielu pracach dotyczących gazowej chromatografii [24]; fakt ten sugeruje stosowanie go jako specjalnego typu absorbentu.

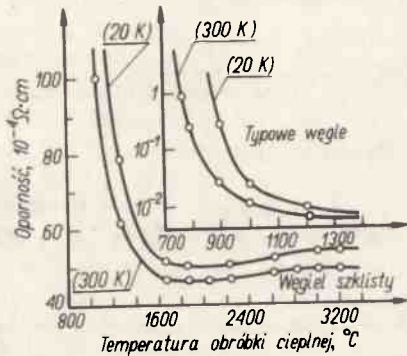
### 3.2. Właściwości fizyczne

Zmiany oporności, współczynnika Halla i magnetorezystancji węgla szklistego wraz ze zmianą temperatury obróbki cieplnej są istotnie różne niż dla miękkich węgla /rys. 10, 11/. Właściwości te zmieniają się, jak wynika z przedstawionych wykresów, głównie w zakresie stosunkowo wysokich temperatur. Zmiany siły termoelektrycznej węgla szklistego przedstawiono na rys. 12. Wykorzystując różnicę w sile termoelektrycznej pomiędzy węglem szklistym a typowymi węglami, stosuje się je do wytwarzania termopar do wysokotemperaturowego użycia [28]. Podobne zahamowania w zmianach właściwości wraz ze zmianą temperatury znaleziono w elektronowym rezonansie Glassy Car-

bon [24]. Dla typowych węgli maksimum intensywności absorpcji EMR znajduje się w ok. 700°C, gdy tymczasem dla Glassy Carbon obserwuje się je w temperaturze 12 0°C. Wytrzymałość na złamanie węgli, jak wiadomo, wzrasta ze wzrostem temperatury do 2500°C. W tej temperaturze obserwuje się 2-3 razy wyższą wytrzymałość niż w temperaturze pokojowej. Powyżej 2500°C wytrzymałość węgli na złamanie nagle maleje, ponieważ wzrasta ich szybkość pękania. Dla Glassy Carbon podobny wzrost wytrzymałości na rozciąganie ze zmianą temperatury obserwowali Kotlensky i Martens [29] /rys. 13/.

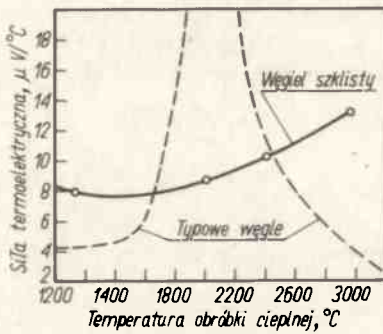


Rys. 10. Zmiany współczynnika Halla i magnetorezystancji węgla szklistego i typowych węgli ze zmianą temperatury obróbki cieplnej [24]

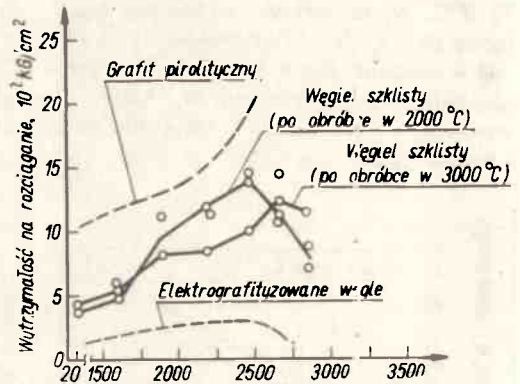


Rys. 11. Zmiany oporności elektrycznej węgla szklistego i typowych węgli ze zmianą temperatury obróbki cieplnej [24]

Właściwości mechaniczne węgli szklistych, ich termiczna stabilność i odporność chemiczna umożliwiają zastosowanie ich jako elementów grzejnych i innych mechanicznych, np. jako komór do oddziaływania trawiącymi roztworami, wodoszczelnych mechanicznych pierścieni, form dla przemysłu szklarskiego. Podobieństwo współczynnika rozszerzalności cieplnej węgla szklistego ze szkłem borokrzemiankowym umożliwia łączenie rur ze szkła i węgla. Takie złącza, ze względu na właściwości elektryczne i odporność na korozję, mogą być stosowane w urządzeniach chemicznych. Ponadto z węgla szklistego mogą być wykonywane biurety z gwintem o tym samym kącie stożka jak normalne szklane. Nie wymagają one przy tym pokrycia PTFE, który - jak wiadomo - wykazuje tendencję do płynięcia w podwyższonej temperaturze.



Rys. 12. Zmiany siły termoelektrycznej węgla szklanego i typowych węgli ze zmianą temperatury obróbki cieplnej [24]



Rys. 13. Wytrzymałość na rozciąganie węgla szklanego Glassy Carbon w wysokich temperaturach [29]

Ważną właściwością węgla szklanego jest jego niezwilżalność przez wiele metali, takich jak: Al, Zn, Ag, Cu, Ga, Sn, Pb. Wynika z tego szerokie zastosowanie w postaci np. zanurzanych rurek probierczych w procesie odwodniania chlorem stopionego aluminium. Urządzenia do flotowania, czyszczenia, filtrowania i odlewania - to przyszłościowe zastosowania węgla szklanego w przemyśle metalurgicznym. Do innych należą osłony dla elementów paliwowych reaktorów z węgla uranu i toru. Węgiel szklany jest również doskonały jako materiał pierścieni rotacyjnych pomp chemicznych podających trudne ciecze. Znajduje także zastosowanie no łożyska w tych przypadkach, gdy wymagana jest wysoka gładkość powierzchni i niskie tarcie w obecności czynników smarujących.

Niejonowa struktura węgla szklanego czyni go szczególnie konkurencyjnym w stosunku do szkła i tworzyw alundowych przy wytwarzaniu wysoko czystych materiałów dla tranzystorów, laserów i kryształów optycznych. Jest on również ważny przy reakcjach, procesach i wzroście kryształów z materiałów zawierających arsen, gal, german, selen, fosfor, tellur i z ich połączeń halogenkowych.

Szczególnie ciekawym zastosowaniem węgla szklanego może być inżynieria biologiczna, gdzie wymagano jest nietoksyczność i chemiczna obojętność. Ważno jest tutaj wyjątkowa czystość i gładkość węgla szklanego w kontakcie z krwią. Z tych względów jest on szczególnie przydatny do protez cyrkulacyjnych, jak np. sztuczne zastawki sercowe lub przewody arteriowo-żylny, przez które pacjent jest podłączany do maszyny dializacyjnej nerkowej. Przeprowadzone ze zwierzętami testy zakończyły się powodzeniem i należy mieć nadzieję, że w przyszłości protezy takie będą użyte również dla ludzi.

#### 4. PODSUMOWANIE

Z przedstawionego przeglądu wynika, że węgiel szklisty jest nader ciekawym i przyszłościowym materiałem w aspekcie różnorodnych zastosowań, począwszy od przemysłu elektronicznego do maszynowego i medycznego. Biorąc pod uwagę rolę, jaką ma spełniać ONPMP w naszym przemyśle /jako producent materiałów dla wszystkich dziedzin przemysłu/, wydaje się konieczne bliższe zainteresowanie technologią otrzymywania węgla szklistego.

#### Literatura

1. Davidson H. W., Losty H. H. W.: G.E.C.J., 30, 22, 1963
2. British Patents: 860342, 1961, 889351, 1962
3. Phillip M., Losty H. H. W., presented at the 6-th Conference on Carbon, Pittsburgh, June 1963
4. Japanese patent: 412380, 1963 British patent: 1033277, 1966
5. Sato H., Yamada S., presented at the 8-th Conference on Carbon, Buffalo, June 1967
6. Yamada S.: A review of glasslike carbons, issued by Defence Ceramic Information Center, Battelle Memorial Institute, Columbus Laboratories, April 1968
7. Rothwell W. S.: J. Appl. Phys., 39, 1840, 1968
8. British patent 956452, 1964
9. Honda H., Sanada Y., Funita T., Teranishi H.: Tanso, 46, 2 1966
10. Bradshaw W., Pinoli P., Watsey G., Wigton H., presented at the 8-th Conference on Carbon, Buffalo, June 1967
11. Otani S.: Carbon, 3, 213, 1965
12. Yamada S., Yamamoto M.: DAJB-67-C-0178 Nov. 1968, presented at the 156-th Am. Chem. Soc. National Meeting, Atlantic City, September 1968
13. British patent 1031126, 1966
14. Noda T., Inagaki M.: Bull. Chem. Soc. Japan., 37, 1534, 1964
15. Furukawa K.: J. Cryst. Japan., 6, 101, 1964
16. Kakinoki J., Katada K., Hanada T., Ino T.: Acta Cryst., 13, 171, 1960
17. Kakinoki J.: Acta Cryst., 18, 578, 1965
18. Takanashi Y., Westrum E.F.: presented at the first Japanese Calorimetry Conference, Osaka November 1965
19. Noda T., Inagaki M., Yamada S.: Bull. Chem. Soc. Japan., 41, 3032, 1963
20. Davidson H. W.: Nucl. Eng., 7., 159, 1962
21. Lewis J. C., Redfern B., Cowlard F. B.: Solid-State Elektron., 6, 251, 1963
22. Noda T., Kato H.: Carbon, 3, 289, 1965
23. Kamiya K., Inagaki M., Mizutani M., Noda T.: Bull. Chem. Soc. Japan, 41, 2169, 1968
24. Noda T., Inagaki M., Yamada S.: J. of Non-Cryst. Solids. 1, 265, 1969
25. Yamada S., Sato H., Ishii T.: Carbon, 2, 253, 1964
26. Dumecke G., Wiegmann J.: Silikattechnik, 16, 287, 1965
27. Zittel H. E., Miller F. J.: Anal. Chem., 37, 200, 1965
28. Yamoguchi S.: Carbon, 1, 535, 1964
29. Kotlensky W. V., Martens H. E., presented at Symposium on Carbon, No. V-2, Tokyo, July, 1964