

MATERIAŁY I PROCESY INSPIROWANE PRZEZ SYSTEMY ORGANICZNE I EKOLOGIE

ROMAN PAMPUCH

KATEDRA CERAMIKI SPECJALNEJ
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ W KRAKOWIE

Streszczenie

Artykuł oparty jest na treści wykładu wygłoszonego z okazji przyznania autorowi tytułu doktora honoris causa AGH. Przypomniano w nim kierunki i wyniki niektórych badań autora i jego współpracowników nad materiałami o budowie zainspirowanej przez systemy organiczne oraz nad procesami stymulowanymi przez zagrożenia takie jak wyczerpywanie się nieodnawialnych źródeł energii i surowców.

Wstęp

Być badaczem to nieustannie starać się aby być lepszym. Sposobem na to jest stałe zdawanie egzaminu czy to przed przyrodą czy przed kolegami. Takim egzaminem stało się również sprawozdanie z niektórych moich badań w dziedzinie nauki o materiałach i inżynierii materiałowej przedstawione z okazji przyznania mi przez moją Uczelnię wysokiego wyróżnienia. Podobnie jak cała nauka również i ta jej dyscyplina oznacza „czasem specjalną metodę odkrywania rzeczy, czasami całą wiedzę, która wynika z tego co odkryto, czasem nowe rzeczy, które można robić dzięki odkryciu czegoś i wreszcie czasem sam proces robienia nowych rzeczy” [1]. Po burzliwym rozwoju w latach siedemdziesiątych i początku osiemdziesiątych naszego wieku i tutaj nastąpił moment, w którym przy dużej ogólnej liczbie badań dominuje udział wnoszących tylko niewiele. Dla ponownego wzrostu istotności badań trzeba więc nowego impulsu. Impulsu, który rodzi się np. z nowego spojrzenia na stary problem, z nacisku ze strony gospodarki, z przypadkowego odkrycia i wielu innych jeszcze przyczyn. Inicjując badania - prowadzone najczęściej ze współpracownikami - takiego impulsu szukałem nawiązując z jednej strony do budowy żywych organizmów celem wytwarzania doskonalszych materiałów oraz, z drugiej, do działań, stymulowanych przez zagrożenia takie jak wyczerpywanie się nieodnawialnych źródeł energii i surowców.

Materiały o budowie zainspirowanej przez systemy organiczne

Wiadomo, że przyroda wykształciła budowę systemów organicznych tak, aby mogły one spełniać swe funkcje w sposób optymalny. W przypadku spełniania funkcji mechanicznych chodzi o unikalną kombinację: niskiego ciężaru, odporności na ścieranie, wytrzymałości połączonych z giętkością i odpornością na kruche pęknięcie. Zapewnia to budowa w postaci:

MATERIALS AND PROCESSING INSPIRED BY ORGANIC SYSTEMS AND ECOLOGY

...3...

ROMAN PAMPUCH

DEPARTMENT OF ADVANCED CERAMICS
UNIVERSITY OF MINING AND METALLURGY, CRACOW

Introduction

To be a research worker means to endeavour to become better. One of the ways to do it is to submit constantly one's work to the judgement of Nature and of colleagues. The conferring of the highest honorary degree of my Alma Mater gives me another opportunity to submit to your judgement some results of my research work into materials science and engineering.

Like all branches of science materials science and engineering means 'sometimes a method of discovering things, sometimes all the knowledge which results from that what has been discovered, sometimes new things which can be made thanks to the discoveries, and sometimes the process of making new things' [1]. I have worked in all these fields.

It is well to note that after a rapid development in the sixties and seventies the moment has been attained, also in materials science and engineering, that the numerical growth of research is no more accompanied by an increase of the quality of research and new impulses are needed to increase it. An impulse such as an accidental discovery, a new optics of seeing things, an economic pressure and many others. In the research made by me and my collaborators I have looked for such an impulse by developing materials mimicking the constitution of organic systems and by working into processing stimulated by the requirements of a sustainable development.

Materials inspired by the constitution of organic systems

Organic systems created by Nature are characterised by a constitution which permits them to perform their functions in an optimum way. As far as the mechanical functions are concerned the combination of a low weight, high wear resistance, strength, flexibility, and fracture toughness is ensured by constitution in form of:

- laminates of hard and soft tissue;
- systems of interpenetrating fibres.

A utilisation of this knowledge should be especially advantageous with ceramic materials because they are characterised by a low fracture toughness, K_{IC} , and a low reliability as indicated by a low Weibull modulus, m . This is shown in FIG.1 against a background of properties of high-melting metals (grey field). I have here in mind both ceramic materials utilised in medicine and structural ceramic materials for general use where the number of those mimicking organic system is increasing (FIG.2).

One part of our research into ceramic materials having improved properties has been made in the field of laminates. The research concentrated on a nanolaminate, namely Ti_3SiC_2 [2,3,4]. It has a hexagonal structure in which stiff layers of Ti-C octahedra are separated by silicon layers

- laminatów złożonych na przemian z twardych i miękkich (organicznych) warstw oraz
- sieci przenikających się wzajemnie włókien.

what facilitates shearing of the Ti-C layers past each other and enables a pseudo-plastic deformation of Ti_3SiC_2 [5,6]. This research, backed by still other publications [7] has per-

RYS.1. Porównanie średnich właściwości faz ceramicznych (o wiązaniach jonowych, kowalencyjnych oraz o strukturze warstwowych) i wysokotopliwych metali. Zewnętrzny perymetr wykresu kołowego odpowiada maksymalnym wartościom danej właściwości wśród wszystkich porównywanych faz; niższe wartości właściwości występujące w pozostałych fazach podane są w procentach tych wartości maksymalnych.

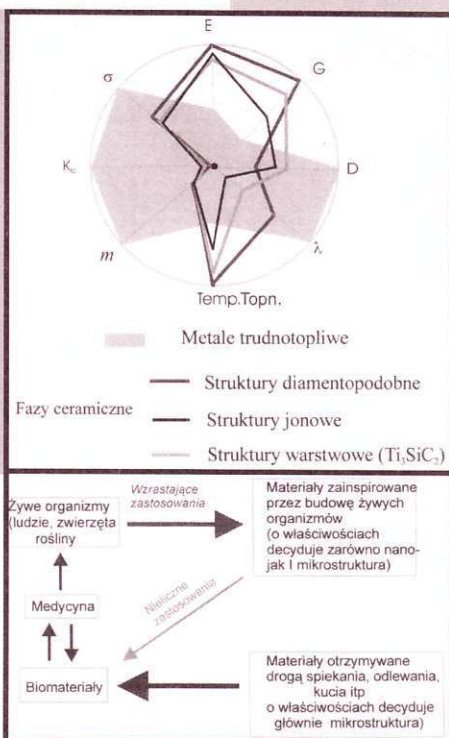


FIG.1. Comparison of average properties of ceramic phases (ionic, covalent, and laminar) with the ones of high-melting metals. The perimeter of the plot corresponds to the maximum value of a given property among the compared phases; the lower values of the given property found with other phases are given as percentage of the maximum value.

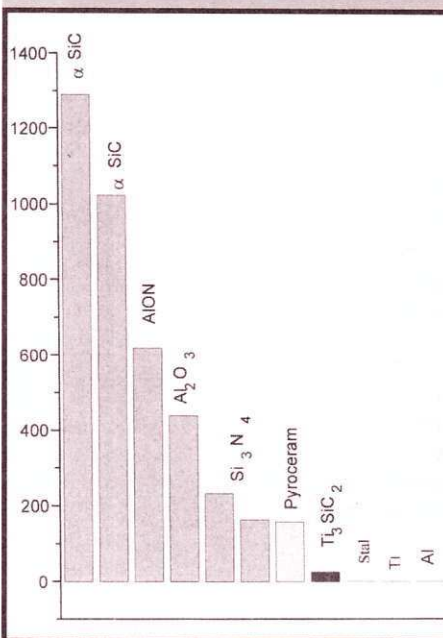
Wykorzystanie tej wiedzy może być szczególnie ważne w przypadku materiałów ceramicznych, które odznaczają się, np. w porównaniu z wysoko topliwymi metalami (szare pole na RYS.1) o wiele mniejszą odpornością na kruche pękanie K_{IC} i małą niezawodnością, którą symbolizuje niski moduł Weibulla, m . Dotyczy to zarówno materiałów ceramicznych stosowanych w medycynie jak i ceramicznych materiałów konstrukcyjnych o innych zastosowaniach. Liczba materiałów naśladujących budowę systemy organicznie rośnie (RYS.2).

Część naszych badań w kierunku polepszenia tych właściwości nawiązywała do budowy laminatów występujących w systemach organicznych. Prowadziliśmy mianowicie badania nad otrzymywaniem i własnościami laminatu w skali atomowej, węgla tytanowo krzemowego, Ti_3SiC_2 [2,3,4]. Jego heksagonalna struktura złożona jest ze sztywnych warstw oktaedrów tytanowo-węglowych, rozdzielonych przez warstwy krzemu. Ułatwia to wzajemne przemieszczanie się sztywnych warstw i pozwala na pseudoplastyczne odkształcenie tego materiału [5,6]. Zarówno wspomniane wcześniej jak i inne prace [7] pozwoliły wykazać, że Ti_3SiC_2 jest istotnie mniej kruchy niż typowe zaawansowane wysokotemperaturowe materiały ceramiczne i zbliża się pod tym względem do właściwości metali konstrukcyjnych (RYS.3).

Innym przykładem nawiązania do budowy laminatów w systemach organicznych było opracowanie pancerzy ceramicznych dla ochrony obiektów przed pociskami [9]. Mianowicie, i tutaj najbardziej efektywne okazały się laminaty, złożone z naprzemian ułożonych warstw sztywnej i kruchej ceramiki, np. z tlenku glinu, oraz warstw łatwiej odkształcalnej ceramiki, np. z Ti_3SiC_2 (RYS.4).

RYS.2. Wzajemne oddziaływania między nauką o materiałach i medycyną.

FIG.2. The interaction of materials science and engineering and medicine.



RYS.3. Parametr kruchości, B, typowych ceramicznych materiałów konstrukcyjnych i metali oraz Ti_3SiC_2 ; wg [8].

FIG.3. The brittleness parameter, B, for typical structural ceramic and metallic materials; according to [8].

mitted to show that Ti_3SiC_2 is, indeed, less brittle than other advanced structural ceramic materials and approaches from this viewpoint the properties of structural metals (FIG.3).

A second example has furnished ceramic armour where most effective have been found laminates which had been made of alternating layers of stiff ceramics, like Al_2O_3 , and of soft ceramics, like Ti_3SiC_2 (FIG.4).

Another direction of research was inspired by systems of interpenetrating fibres in organic systems [11,12,13]. When our research into carbon fibres and carbon fibres-reinforced composite started more than twenty years ago the numerous structures formed by carbon atoms, including the fullerenes, were not known yet. However, a use could be made of changes in the structure and form of graphite-based materials. On the one hand, production of such materials in form of fibres permitted to decrease the number of defects in comparison with bulk materials and, therefore, to increase the mechanical strength. On the other, mechanical properties could be modified by tailoring the nanostructure of the fibres.

The layers of carbon atoms which occur in the graphite structure are very stiff and strong due to the high strength of the carbon-carbon bonds. Therefore, if the layers of the packets are oriented approximately parallel to the fibre axis only low elastic strains are possible and high Young's moduli result (FIG.5). The elastic strain of the packets can, however, be high at an angle of 45-52 degrees to the plane of the layers because weak van der Waals forces between the layers enable an appreciable shearing of the layers past each other. Therefore, fibres produced in such a way that the planes of the C-layers in the packets are not oriented parallel to the fibre axis show a higher elastic strain and are less brittle than the former, better oriented type (FIG.6). The variations of

Z kolei, do doskonałych właściwości sieci wzajemnie przenikających się włókien w systemach organicznych nawiązywały nasze badania nad włóknami węglowymi i kompozytami zbrojonymi przez te włókna [11, 12, 13]. Kiedy rozpoczynaliśmy te badania przeszło dwadzieścia lat temu daleko było do wiedzy o niezwykle szerokiej gamie struktur, jakie tworzy pierwiastek węgiel, łącznie z fullerenami. Niemniej okazało się, że można zmieniać w szerokich granicach budowę i właściwości także materiałów węglowych, które wywodzą się z grafitu. Z jednej strony, przez ich makroskopowe ukształtowanie w postaci cienkich włókien. Pozwala to zmniejszyć prawdopodobieństwo występowania defektów a więc zwiększyć wytrzymałość mechaniczną w porównaniu z innymi postaciami materiałów węglowych. Z drugiej, uzyskać włókna o różnych właściwościach przez zmiany budowy włókien w skali atomowej.

Heksagonalne warstwy atomów węgla, które występują w graficie są bardzo sztywne i wytrzymałe dzięki wyjątkowo dużej sile wiązań węgiel-węgiel w płaszczyźnie warstw. Jeśli pakiety tych warstw ułożone są w przybliżeniu równoległe do osi włókien to przy rozciąganiu notuje się i dużą sztywność i małe odkształcenie sprężyste

RYS.4. Efektywne pancerze ceramiczne w postaci laminatów sztywnych i miękkich warstw; wg [10].

RYS.4. Efektywne pancerze ceramiczne w postaci laminatów sztywnych i miękkich warstw; wg [10].

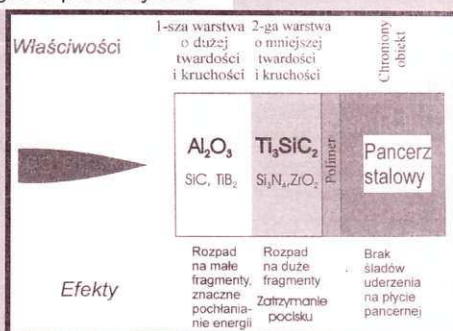


FIG.4. Effective armour made up of laminates of soft and stiff ceramic layers; according to [10].

development is "a way to attain a better quality of life by all which does not endanger the quality of life of future generations" [15]. These goals can be reached in the materials-produc-

RYS.5. Wykres kołowy odkształcalności pakietów warstw węglowych w strukturze grafitu w zależności od kierunku krystalograficznego; odkształcalność wyrażona jako odwrotność modułu Young'a, E; wg [14].

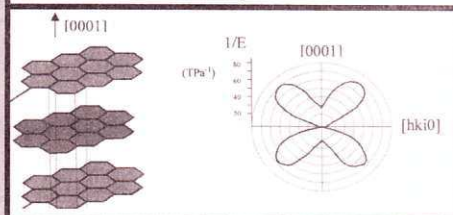


FIG.5. Deformability of the graphite structure in function of the crystallographic direction, expressed as the reciprocal value of Young's modulus; after [14].

RYS.6. Odkształcenie sprężyste przy rozciąganiu włókien węglowych w przypadku uporządkowanej (włókna węglowe wysokomodułowe) i nieuporządkowanej (włókna węglowe wysokowytrzymałe) orientacji pakietów warstw węglowych.

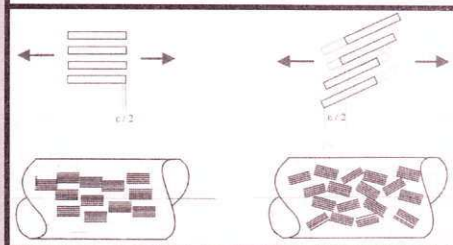


FIG.6. Elastic deformation in tension for carbon fibres having a better oriented (high modulus fibres) and a lesser oriented (high strength fibres) graphite structure.

(RYS.5). Podatność na odkształcenie pakietów warstw węglowych jest natomiast bardzo duża pod kątem 45-52 stopni do płaszczyzny tych warstw a to dzięki znacznemu udziałowi odkształcenia wskutek ścinania. Jeśli więc włókna wytworzyć tak, aby pakiety warstw atomów węgla nie były zorientowane równoległe do osi włókien, to przy rozciąganiu włókien można osiągnąć większe odkształcenie sprężyste i wytrzymałość na rozciąganie oraz mniejszą kruchość (RYS.6).

Wszystkie te sposoby pozwoliły dostosować właściwości włókien węglowych do spełniania przez nie różnych funkcji, szczególnie w zastosowaniach w medycynie [13]. Jeszcze dalej idące dostosowanie można było uzyskać w przypadku kompozytów o osnowie węglowej wzmacnianych włóknami węglowymi. Przez ułożenie włókien, odpowiednio, w jednym (1D), w dwu (2D) i w trzech (3D) wzajemnie prostopadłych kierunkach można było otrzymać kompozyty węgiel-węgiel, których wytrzymałość mechaniczna i moduł Young'a różniły się o jeden rząd wielkości (RYS.7).

the structure of the fibres brought about by an adequate processing have permitted to tailor the properties of carbon fibres to given applications, especially to applications in medicine [13]. A still more important variation of the properties has been achieved in carbon-carbon composites. Namely, by using, respectively, a one-dimensional (1D), a two-dimensional (2D) and a three-dimensional arrangement of the fibres in the carbon matrix C-C composites could be produced in which the strength and Young's modulus differed by one order of magnitude from each other (FIG.7).

Time- and energy-saving processing

Our research into time and energy-saving processing of ceramic has been prompted by economy and ecology. Namely, by trends in research the goal of which is an attainment of sustainable development. The sustainable development is "a way to attain a better quality of life by all which does not endanger the quality of life of future generations" [15]. These goals can be reached in the materials-produc-

ing economy by reduction of consumption of not renewable energy sources and other raw materials. Some of the ways to reach these goals are: a development of energy and time-saving technologies, a tailoring of material properties to functions, a high reliability of materials, and a recycling of waste materials (FIG.8). Steps in the same direction are made by the service economy. The role of the latter constantly increases and manifests itself by shorter and more elastic processing in order to produce goods 'just in time'.

The majority of traditional and many of more modern processing routes for ceramic materials is characterised by a high energy consumption and low time efficiency. One of the methods which permits overcome this handicap by being not only energy- and time saving but also very flexible is solid combustion [16, 17].

In order to realise a thermally activated synthesis of compounds in solid combustion internal energy sources, i.e. heat of exothermic reactions between the synthesis reactants, are utilised for producing high temperatures. This becomes feasible when the heat remaining in the system is higher than the heat losses to the environment and cooler parts of the system (FIG.9). Because the reaction rates increase exponentially with temperature, the rise of tem-

RYS.7. Wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga kompozytów o osnowie węglowej zbrojonych włóknami węglowymi w zależności od ułożenia włókien w jednym (1D), w dwu (2D) oraz w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (3D); wg [15].

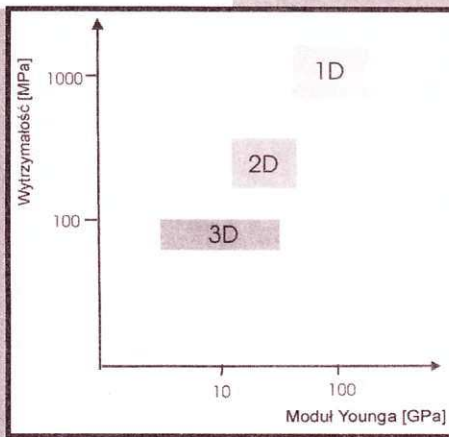


FIG.7. Tensile strength and Young's modulus of carbon-carbon composites vs. the carbon fiber orientation in the carbon matrix: 1D- one-dimensional; 2D- two-dimensional, 3D- three-dimensional; according to [15].

Energo- i czasoszczędne procesy otrzymywania materiałów

Badania nad tymi procesami mieściły się w nurcie zainspirowanym przez gospodarkę, ekonomię oraz ekologię. Mianowicie, w strumieniu badań, które wiążą się z przeciwdziałaniem zagrożeniom bytu społeczeństw i służą osiągnięciu podtrzymującego się rozwoju. Podtrzymujący się rozwój to - jak wiadomo - "sposób trwałego osiągnięcia lepszej jakości życia przez wszystkich, który nie zagraża osiągnięciu tego celu przez przyszłe pokolenia i szanuje środowisko"[15]. W gospodarce wytwarzania materiałów cel ten można osiągnąć przez zmniejszenie konsumpcji nieodnawialnych źródeł energii i innych nieodnawialnych surowców. Jak ilustruje to RYS.8, służą temu m.in. energo- i czasoszczędne technologie, dostosowanie właściwości materiałów do spełnianych funkcji i szereg innych działań. Cel ten można także osiągnąć przez dostosowanie kierunków badań do wymogów gospodarki usług. Jej rola stale wzrasta i przejawia się m.in. naciskiem na skrócenie czasu i uproszczenie procesów wytwarzania materiałów, tak aby zapewnić ich produkcję na czas.

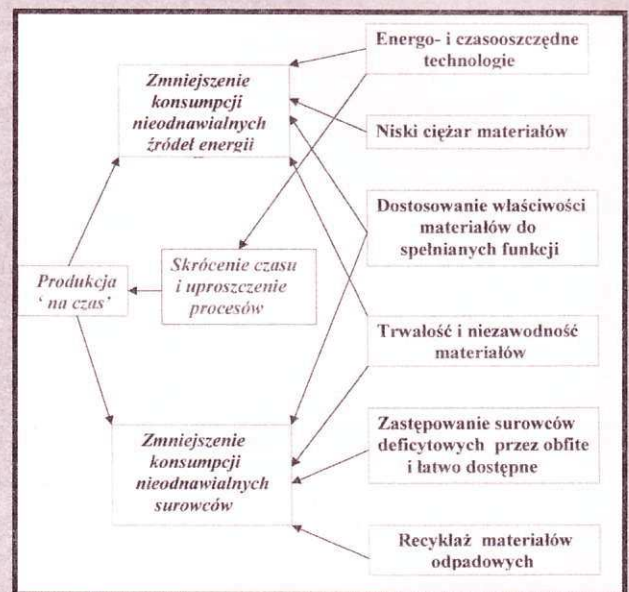
Większość tradycyjnych a i wiele nowych procesów wytwarzania materiałów ceramicznych odznacza się albo dużym zużyciem zewnętrznych źródeł energii albo długim czasem operacji, albo też jednym i drugim. Natomiast jedną z nowszych metod, która spełnia nie tylko wymóg oszczędności energii ale i pozwala uprościć procesy i skrócić czas operacji jest spalanie w fazie stałej [17,18].

W metodzie tej dla przeprowadzenia aktywowanej termicznie syntezy związków wykorzystuje się ciepło egzotermicznych reakcji chemicznych tak, aby wytwarzały wysokie temperatury w układzie. Jest to możliwe, gdy ciepło które pozostaje w układzie przewyższa straty ciepła do otoczenia.(RYS.9.). Ponieważ szybkość reakcji wzrasta wykładniczo z temperaturą powoduje to przyspieszenie zapoczątkowanych reakcji zwiększenie intensywności wydzielania ciepła. Powstaje w ten sposób dodatnie sprzężenie zwrotne, w którym wspomniany cykl powtarza się. Dzięki temu może nastąpić lawinowy wzrost temperatury układu i szybkości reakcji.

Jeśli reagenty i produkt reakcji są stałe to zrealizowanie tego stanu możliwe jest tylko przy intensywnym przenoszeniu atomów reagentów do granic rozdziału, na których mogą za sobą reagować. W przypadku badanej przez nas syntezy węglików z pierwiastków warunek ten nie jest możliwy do spełnienia w klasycznych warunkach syntezy, gdzie węglikowa

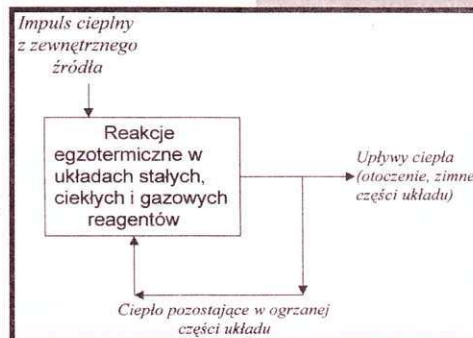
perature brings about an increase of the reaction rate and of heat evolution. In this way a positive feedback is established and an avalanche-like increase of temperature and reaction rate can be observed.

When both the reagents and the product are solid the positive feedback is realizable only when there is an intensive



RYS.8. Sposoby, które pozwalają w gospodarce wytwarzania materiałów i w gospodarce usług osiągnąć podtrzymujący się rozwój.

FIG.8. Ways in materials and service economy which permit to establish a sustainable development.



RYS.9. Schemat logiczny spalania w fazie stałej.

FIG.9. The logical scheme of solid combustion.

diffusion of atoms to the respective interfaces. In the synthesis of carbides which has been of interest to us the solid products of the reactions are characterised by a low diffusibility. Therefore, the reaction layer formed by the product constitutes a diffusional barrier. However, in case of solid combustion in the Si - C system (and also in other ones) a specific mechanism occurs, which permits to rationalise the very high reaction rates and the conversion to product(s) in a few minutes' time [18,19,20,21]. Namely, solid combustion in this system takes place at a temperature of 1950-2150°C. At this temperature growth of the SiC-reaction layer at the carbon substrate / reac-

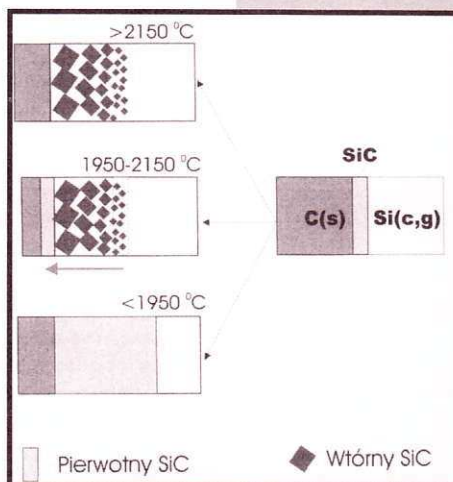
warstwa reakcyjna, rozdzielająca reagenty, jest barierą dyfuzyjną z uwagi na bardzo niskie współczynniki dyfuzji w węglkach.

W przypadku spalania w fazie stałej w układzie Si-C występuje jednak specyficzny mechanizm, który tłumaczy możliwość błyskawicznej syntezy SiC [19,20,21,22]. Mianowicie, spalanie w fazie stałej przebiega w tym układzie w temperaturze od 1950 do 2150°C. W temperaturach tych warstwa reakcyjna, która narasta po stronie granicy rozdziału: warstwa reakcyjna SiC - reagent węglowy, równocześnie rozpuszcza się z podobną szybkością po przeciwległej stronie w ciekłym krzemie (RYS.10). W ten sposób zachowuje ona cały czas niewielką grubość przesuwając się w głąb reagenta węglowego. Mała grubość wędrującej warstwy reakcyjnej pozwala więc na duże szybkości reakcji. Końcowy produkt - wtórny węgiel krzemu - tworzy się przez krystalizację z przesyconego roztworu ciekłego, który przesuwa się za ciekłą warstwą reakcyjną. To, z kolei, powoduje, że węgiel krzemu powstający w wyniku reakcji substratów węglowych z krzemem tworzy pseudomorfozy reagenta węglowego, tj. utwory, które zachowują jego pierwotną postać [23].

Mechanizm taki wykorzystano w niedawno opublikowanej przez innych autorów metodzie [24]. W metodzie tej przekształca się najpierw drewno, drogą pirolizy, w materiał węglowy. Następnie, przez reakcję krzemu z produktem pirolizy otrzymuje się węgiel krzemu w postaci pseudomorfoz wyjściowego drewna. Końcowym produktem jest więc odporny chemicznie, wysokotemperaturowy materiał, który jednak zachowuje w makro i mikroskali budowę drewna. Badania te zostały przywołane dla ilustracji splatania się badań nad mechanizmem spalania w fazie stałej z badaniami nad materiałami o budowie zainspirowanej przez systemy organiczne.

Podsumowanie

Omówione w wykładzie kierunki badań ilustrują szerszą tendencję w naukach doświadczalnych. Mianowicie, po intelektualnym zróżnicowaniu nauk doświadczalnych w toku ich rozwoju (RYS.11) obecnie, pod koniec XX wieku, obserwuje się tendencję do ich integracji lub wzajemnego przejmowania idei. Wynika to z aktualnego przekonania, że najważniejszą dźwignią rozwoju nauki jest jej transdyscyplinarność. Wystarczy przytoczyć dwa przykłady tej tendencji. Jednym jest integracja fizjologii, genetyki i biochemii jaka nastąpiła w ramach biologii molekularnej. Drugim - ukształtowanie się nauki o materiałach jako zintegrowanego wokół zagadnień materiałowych systemu poglądów, z których każdy z osobna wywodzi się z różnych dziedzin myśli i działalności. Ponieważ najważniejsze linie naszego myślenia mają swe prototypy greckie, wspomniane zmiany można też opisać słowami Empedoklesa z Akragas: "Czasem jedność rozwija się z wielu rzeczy a czasem całość dzieli się na wiele części. Takie zmiany zdarzają się w sposób ciągły". Jeśli dąży się obecnie do integracji to trzeba mieć także na uwadze dalszy ciąg myśli Empedoklesa, który brzmi że "miłość jest siłą, która łączy rzeczy razem. Konflikty - siłą, która je rozdziela".



Rys.10 Mechanizm 'wędrującej cienkiej warstwy reakcyjnej', który występuje podczas spalania w fazie stałej w układzie Si-C; wg [19].

Fig.10 Mechanism of the 'migrating thin reaction layer' during solid combustion which occurs in the Si-C system); according to [19].

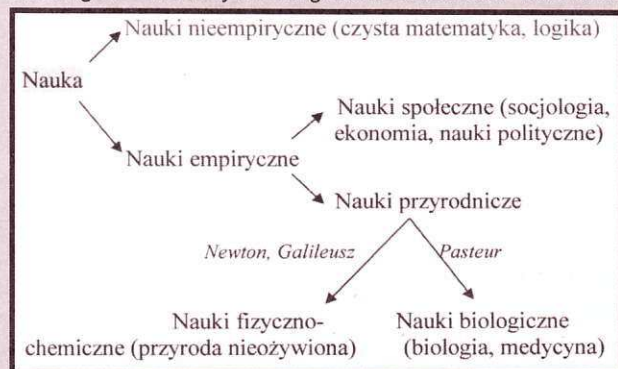
tion layer interface and dissolution of the reaction layer in liquid silicon at the opposite side of the layer have an approximately identical rate. Therefore, the reaction layer, moving into the carbon reactant retains all the time its small thickness (FIG.10.) what ensures a high conversion rate of the reactants. The final product, secondary SiC, is formed by precipitation from the supersaturated C solution in liquid Si which moves in the wake of the thin reaction layer. This brings about a formation by silicon carbide of pseudomorfozes of the carbon reactant [22]. The latter mechanism has been recently utilised to produce silicon carbide products which have the constitution of wood [23]. In this method wood is first transformed, by pyrolysis, to a carbonaceous residue which retains the original constitution of wood. By reacting this residue with silicon a SiC material of the same constitution is formed. That is, a refractory material having the advantageous structure of wood is formed.

The above research has been recalled in order to illustrate ways of combining energy- and time-efficient method of solid combustion with production of materials mimicking organic systems.

Summary

The directions of research mentioned in the lecture illustrate more general trends in experimental science which can be observed at the present time. Namely, after an intellectual diversification of branches of experimental science in the XVIII-XIX centuries a tendency to their integration occurs at present. At the origin of this tendency lies the recognition that the main impulse for development of science is a transdisciplinary approach. Two examples may be given. One is the integration of physiology, genetics and biochemistry in the frame of molecular biology. Another is the establishment of materials science and engineering. This system of opinions integrates elements from various sources around material problems.

Our main lines of thought have their Greek prototypes. Therefore, in connection with the above mentioned changes let me quote Empedokles from Akragas: "Sometimes a unity develops of many things, and sometimes a whole separates into many parts. Such change goes on continuously". Considering the tendency for integration as desirable we should



RYS.11. Intelektualne różnicowanie się nauk doświadczalnych w XVIII-XX w.

FIG.11. The intellectual diversification of experimental sciences in the XVIII-XX centuries.

Piśmiennictwo

- [1] Feynman R.: Sens tego wszystkiego, Prószyński i Ska., Warszawa, 1999 (tłum.z ang.).
- [2] Pampuch R., Lis J., Stobierski L., Tymkiewicz M.: Solid Combustion Synthesis of Ti_3SiC_2 , J.European Ceram. Soc., 5, (1989), 283-287.
- [3] Pampuch R., Lis J., Piekarczyk J., Stobierski L.: Ti_3SiC_2 -based materials produced by SHS and ceramic processing, J.Mater. Synthesis and Processing, 1, (1993), 93-99.
- [4] Morgiel J., Lis J., Pampuch R.: Microstructure of Ti_3SiC_2 -based ceramic materials, Mater.Lett. 27, (1996), 85-89.
- [5] Pampuch R., Lis J.: " Ti_3SiC_2 a pseudoplastic ceramic material" w CERAMICS:CHARTING THE FUTURE, P.Vincenzini ed., Techna, Faenza, 1995.
- [6] Barsoum M.W., El-Raghy T.: Synthesis and characterization of a remarkable ceramic: Ti_3SiC_2 , J.Am.Ceram.Soc. 79, (1996), 1953-1956.
- [7] Okano T., Tano T., Iseki T.: Synthesis and mechanical properties of Ti_3SiC_2 , ceramics, Trans. Met. Soc. Jpn., 14A, (1993), 597-599.
- [8] Pampuch R.: Stuijts Memorial Lecture 1997: Ceramic Science and Technology Facing Changing Paradigms, J.Europ. Ceram. Soc., 18, (1998), 993-1000.
- [9] Pampuch R., Lis J., Stobierski L.: Pękanie dynamiczne materiałów ceramicznych, Szkło i ceramika, 6, (1995), 1-4.
- [10] Lis J., Pampuch R., Stobierski L., Wiśniewski A., Kata D., Ceramic armour materials prepared by the self-propagating high-temperature synthesis, Proceed.Vth World Ceramic Congr. CIMTEC Florencia, 1998, Techna Faenza
- [11] Pampuch R., Błażewicz S., Chłopek J., Balcerzyk E., Tekhnologiya proizvodstva uglerodnikh volokon, Obzor Pol'skoy Tekhniki, 4, (1988), 9-10.
- [12] Pampuch R., Błażewicz S., Chłopek J.: Włókna węglowe. Przegląd aktualnego stanu badań, Acta Ceramica (Szkło i Ceramika), 7, (1981), 111-117.
- [13] Pampuch R., Błażewicz S., Chłopek J., Górecki A., Kuś W.M.: Nowe materiały węglowe w technice i medycynie, PWN, Warszawa, 1988.

have in mind the continuation of these thoughts of Empedocles. Namely, that "love is the force that brings things together. Strife the force that separates them".

References

- [14] Chłopek J.: Kompozyty węgiel-węgiel. Otrzymywanie i zastosowanie w medycynie. Prace Kom. Nauk Ceram. O/PAN w Krakowie, Ceramika, 52, (1997), 5-146.
- [15] Anon: Indicators of sustainable development, Office for official Publications of the European Communities Luxembourg, 1997, 19.
- [16] Merzhanov A.G.: Self-propagating high-temperature synthesis and powder metallurgy, Adv. Powder Metall. and Particulate Mater. 9, (1992), 341-366.
- [17] Lis J., Pampuch R., Stobierski L.: Simplifying processing to sinterable Powders by using solid combustion, Ann.de Chimie Fr., 20, (1995), 151-156.
- [18] Pampuch R., Lis J., Stobierski L.: Mechanism of heterogeneous reactions in the Si-C system under conditions of self-propagating combustion, w: Combustion and plasma synthesis of high-temperature materials, Z.A.Munir, J.B. Holt Rds., VCh Weinheim, New York, 1990.
- [19] Pampuch R., Lis J., Rudnik T.: Solid combustion synthesis w: Flash reaction processes, T.W.Davies ed. Kluwer Sci.Ed. New York, 1995, 64-75.
- [20] Rudnik T., Lis J., Pampuch R., Lihman J-M., Stobierski L.: Parameters of the bed of reactants and solid combustion in the Si-C system, Archivum Combustionis, 16, (1996), 3-12. 66.
- [21] Pampuch R.: Some fundamental versus practical aspects of self-propagating high-temperature synthesis, Solid State Ionics, 101-103, (1997), 899-907.
- [22] Pampuch R., Stobierski L., Lis J., Rączka M.: Solid combustion synthesis of SiC, Mater.Res.Bull., 22, (1987), 1225-1230.
- [23] Greil P., Kifka T., Kandl A.: Cellular silicon carbide ceramics from wood, J.Europ. Ceram. Soc., 18, (1998), 1960-1983.